



## Evaluation of the Effect of Zycotherm on Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt Containing Crumb Rubber

M. Fakhri<sup>1</sup>, E. Shahebrahimi<sup>1\*</sup>, M. Khodadadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** Reducing the temperature of asphalt mixture production is one of the essential benefits of using warm mix asphalt, but this advantage also causes some pavement problems. One of the most critical issues is creating a higher moisture potential in road pavement due to asphalt mixtures' lower production temperatures. Subsequently, some of the aggregate moisture does not evaporate. This study aims to evaluate the effect of zycotherm on the moisture reduction of warm mix asphalt. Besides, Waste crumbs replaced some of the fine-grained aggregates.

Materials include different percentages of Zycotherm (0.1, 0.15, and 0.2% by total weight of bitumen) and crumb rubber (0, 10, and 20% by total weight of the fine aggregate) bitumen 60/70 and granite sum make nine mix designs. Experiments include Boiling Water Test, Indirect Tensile Test; And Resilient Modulus (MR) Test evaluated the asphalt mixture's moisture sensitivity. The boiling water test results showed that the increase in Zycotherm improves moisture susceptibility. However, the crude rubber does not significantly affect boiling water tests because of the Crumb rubber's lower density of aggregates, despite the apparent improvement in the bitumen adhesion to the sum. Resilient modulus, a model for predicting tensile strength ratio (TSR), was made based on the experimental results using one-way ANOVA. The minimum required percentage of Zycotherm for replacing 10% of the crumb rubber was 0.128%. For 20% of the crumb rubber, it is equal to 0.149%. According to the resilient modulus results, the addition of a Zycotherm increases MR, while the crumb rubber's substitution causes a slight increase in MR.

### Review History:

Received: 11/08/2018

Revised: 03/11/2018

Accepted: 06/02/2019

Available Online: 06/02/2019

### Keywords:

Warm mix asphalt

Moisture susceptibility

Zycotherm

Crumb rubber

Resilient modulus

## 1. INTRODUCTION

One of the most important problems of warm mix asphalt is moisture sensitivity, because of mixing temperature reduction. [1, 2]. To mitigate the effects of this problem, it should prevent water from entering the pavement using proper drainage or limestone aggregates and anti-stripping additive. Due to the high cost of transferring the materials, it is not always possible to use limestone aggregate. Therefore, to reduce the moisture susceptibility, in some cases, an anti-stripping material should be used [3, 4]. So far, many studies have been done to improve the adhesion of bitumen in order to reduce moisture damage in asphalt mixtures using additives such as Nanomaterials [5-8]. On the other hand, given the growth of waste rubble, annual production of more than 1.5 billion rubber rings in the world, it can be used as a substitution of aggregate to achieve both environmental and economic benefits [9-14]. Therefore, the purpose of this study is to investigate the effect of using Nano-anti-stripping (Zycotherm) and crumb rubber as a substitute for asphalt aggregates on the moisture susceptibility of warm mix asphalt using a qualitative test (boiling water) and quantitative tests

\*Corresponding author's email: username@EmailServer.com

(modified Lattman and a resilient modulus).

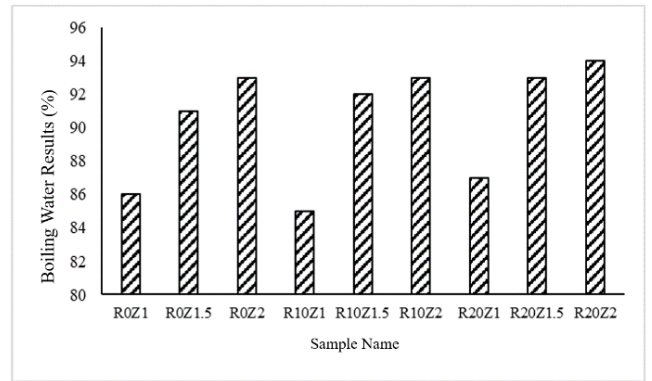
## 2. EXPERIMENTAL PROGRAM

In this research, granite aggregate and the crumb rubber with a specific gravity of 1.2 with percentages of 0%, 10% and 20% as substitute values of aggregate were prepared. The bitumen with penetration grade of 60-70 (PG58-16) was modified by Zycotherm with a total weight of 0.1, 0.15 and 0.2% (based on the previous studies) using high shear at a temperature of 120°C for 1 hour [15-18]. The asphalt mixture samples were generated by Marshall Method (ASTM D1559) and the optimum bitumen percentage was obtained, 5.6, 5.6, 6 and 6.3%, for mixtures containing 0%, 10% and 20% of crumb rubber, respectively. It should be noted that Zycotherm had no effect on this percentage. The labeling system was used as described in Table 1, where  $R$  represents the replacement percentage of crumb rubber and  $Z$  percent the percentage of Zycotherm. In this study, 15 samples were made for each mix design (a total of 135 samples), of which 95 samples were applied to construct the base model, and 40 samples were used to validate the base model. This model was used to determine the optimal percentage of additives. Finally, the

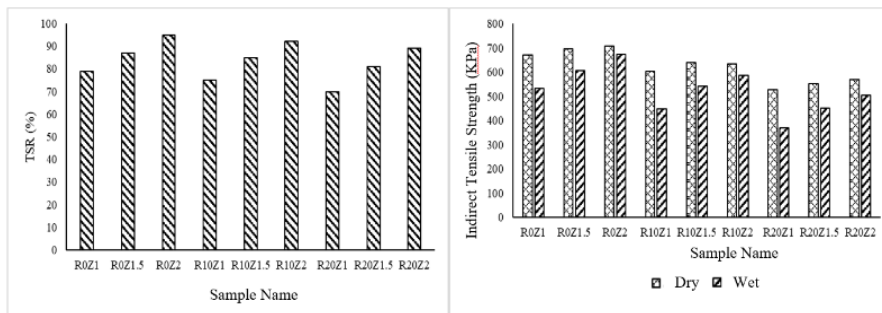


**Table 1. Labeling samples of asphalt mixture**

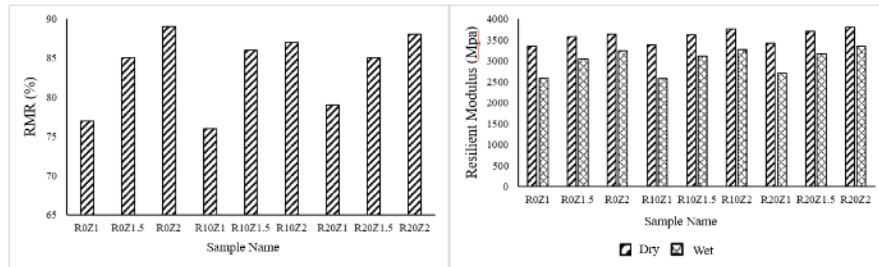
Sample Name	Percentage of Crumb Rubber	Percentage of Zycotherm	Percentage of Bitumen
R0Z1	0	0.10	5.6
R0Z1.5	0	0.15	5.6
R0Z2	0	0.20	5.6
R10Z1	10	0.10	6.0
R10Z1.5	10	0.15	6.0
R10Z2	10	0.20	6.0
R20Z1	20	0.10	6.3
R20Z1.5	20	0.15	6.3
R20Z2	20	0.20	6.3



**Fig. 1. Boiling water test results**



**Fig. 2. Results of ITS and TSR**



**Fig. 3. Results of Mr and RMR**

tests of boiling water, moisture susceptibility, and resilience modulus were performed on the samples according to ASTM D3625, ASTM D3625, and ASTM D4123-82, respectively.

### 3. RESULTS AND ANALYSIS

According to the results of the boiling water test (Figure 1), the addition of Zycotherm from 0.1 to 0.15% resulted in an improvement of 7% in boiling water and an increase in Zycotherm from 0.1 to 0.2%, resulting in an improvement of 8.5% of the test results. The addition of crumb rubber had no significant effect on the moisture properties of the samples.

According to the results of the indirect tensile strength (ITS) in Figure 2, with an increase in Zycotherm dosage from 0.1 to 0.2%, an increase of 6% and 31% can be seen in dry ITS and wet ITS, respectively. While increasing the crumb rubber

percentages from 0 to 20%, the weakening ITS value was equal to 20% and 27% in dry and wet conditions, respectively. Also, with an increase in the percentage of Zycotherm from 0.1 to 0.2, an increase of 23% was observed in the values of TSR, while about 8% of the TSR values would be decreased when the dosage of crumb rubber rises from 0 to 20%. According to these results, the asphalt mixtures of crumb rubber with Zycotherm dosage less than 0.15% were not suitable for pavement because of their TSRs being lower than 80%.

According to the resilient modulus test (Mr) and its ratio (RMR) in Figure 3, increasing the percentage of Zycotherm from 0.1 to 0.2 caused an increase in dry and wet Mr (10% and 25%, respectively). However, by increasing the percentage of crumb rubber from 0 to 20%, this increase was equal to 3% and 4% for dry and wet conditions, respectively. According

to these results, all mix designs had satisfied the minimum requirement of the RMR parameter (70%).

Finally, a linear regression was used to determine the relationship between TSR and RMR (as independent parameters) with the percent of Zycotherm additive and crumb rubber substitution (as dependent parameters) applying SPSS software and one-way ANOVA analysis for 70% of the samples. The remaining samples (30%) validation model was done and the results are the relations given in Eq. 1 ( $98.8=R^2$ ) and Eq. 2 ( $88.8=R^2$ ), respectively.

$$\text{TSR} = 61.17 + (173.33 \times Z) - (0.35 \times R) \quad (1)$$

$$\text{RMR} = 67.56 + (106.67 \times Z) \quad (2)$$

#### 4. CONCLUSIONS

The results of this study are summarized as the following:

- Using Zycotherm as an anti-stripping modifier had significant effects on the boiling test results, while the addition of crumb rubber had a little effect on improving the moisture resistance of the warm mix asphalt.

- Improvement of bitumen with gyro increased the indirect tensile strength, but with the increase in the percentage of the tire, decreasing of indirect tensile strength was observed in all samples.

- Modifying of bitumen with Zycotherm increased the indirect tensile strength (ITS), but with the increase in the percentage of crumb rubber, decreasing of ITS was observed in all samples.

- According to the obtained linear equations for TSR and RMR, in order to control the moisture susceptibility of mixtures containing 10% and 20% of crumb rubber, the minimum required value of the Zycotherm was equal to 0.128% and 0.149%, respectively.

#### 5. REFERENCES

- [1] Emily D. Shrum, 2010, "Evaluation of moisture damage in warm mix asphalt containing recycled asphalt pavement", a thesis presented for the Master of Science degree at the University of Tennessee, Knoxville.
- [2] Arakan Aksoy, Kurtulus Samlioglu, Sureyya Tayfur, Halit Ozen, 2005, "Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures", *Construction and building materials*, 11-18.
- [3] B. M. Kiggundu and F. L. Roberts, 1988, "Stripping in HMA mixture: state of the art and critical review of test methods", *national center for asphalt technology*, NCAT, rep No 88-2.
- [4] C. W. Curtis, 1990, "A literature review liquid anti stripping and tests for measuring stripping", *strategic highway research program, Washington D.C, rep SHARP-A/UIR*, 90-016.
- [5] Subrata K.D, 2004, "Evaluation of asphalt aggregate bond and stripping potential", a thesis in civil engineering, *Texas Tech University, Texas, USA*.
- [6] G.H. Hamed, F.M. Nejad, K. Oveisi, 2015, "Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide", *Mater. Struct.*, 49 (4), pp. 1165-1174.
- [7] Azarhoosh, A., Moghaddas Nejad, F., & Khodaii, 2016, "Evaluation of the effect of nanoTiO2 on the adhesion between aggregate and asphalt binder in hot mix asphalt", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 8189, 1-16.
- [8] G.H. Hamed, Nejad F. Moghadas, 2015, "Use of aggregate nanocoating to decrease moisture damage of hot mix asphalt", *Road Mater. Pavement Des.* 17 (1), pp. 32-51.
- [9] Siddique R, Naik TR, 2004, "Properties of concrete containing scrap-tire crumb rubber—an overview", *Waste Management*, 563-569.
- [10] Weiguo Shen, Lai Shan, Tao Zhang, Hongkun Ma, Zhi Cai, Hua Shi, 2013, "Investigation on polymer-crumb rubber aggregate modified porous concrete", *Constr Build Mater.*, 667-674.
- [11] Azevedo F, Pacheco-Torgal F, Jesus C, de Aguiar JB, Camões AF, 2012, "Properties and durability of HPC with tire crumb rubber wastes", *Constr Build Mater.*, 186-191.
- [12] Cindy Estakhri, Joe Button, Alex E. Alvarez, 2010, "Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in Texas", *FHWA/TX-10/0, 5597-5602*.
- [13] Graham C. Hurley, 2006, "Evaluation of new technologies for use in warm mix asphalt", *A Thesis Submitted to the graduate faculty of auburn university in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science*.
- [14] D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B., 2008, "Warm-Mix Asphalt: European Practice", *American Trade Initiatives, Alexandria, USA*, Report No. FHWA-PL-08-007.
- [15] Graham C. Hurley, Brian D. Prowell, 2005, "Evaluation of aspha-min zeolite for use in warm mix asphalt", *NCAT report*, 05-04.
- [16] Graham C. Hurley, Brian D. Prowell, 2005, "Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt", *NCAT report*, 05-06.
- [17] Almudaiheem J.A, Al-sugair F.H, 2008, "Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials", *Construction and building materials*, 30-40.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Fakhri, E. Shahebrahimi, M. Khodadadi, Evaluation of the Effect of Zycotherm on Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt Containing Crumb Rubber, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(3) (2020) 169-172.

DOI: 10.22060/ceej.2019.14814.5749







## ارزیابی اثر زایکوترم بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی خرده لاستیک ضایعاتی

منصور فخری<sup>۱</sup>، ابراهیم شاه ابراهیمی<sup>۱\*</sup>، مجتبی خدادادی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۲۰

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۱۲

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

### کلمات کلیدی:

آسفالت نیمه گرم

حساسیت رطوبتی

زایکوترم

خرده لاستیک

مدول برجهندگی

**خلاصه:** یکی از مزایای مهم استفاده از مخلوط آسفالتی نیمه گرم، کاهش درجه حرارت تولید آسفالت است اما همین مزیت سبب بروز مشکلاتی در روسازی می گردد. یکی از مهمترین مشکلات، ایجاد پتانسیل بیشتر حساسیت رطوبتی در روسازی راه است که به دلیل درجه حرارت کمتر تولید مخلوط آسفالتی، تمامی رطوبت موجود در مصالح سنگی تبخیر نمی شود. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی تأثیر زایکوترم بر کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی نیمه گرم است. علاوه بر آن، از خرده لاستیک ضایعاتی به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگ دانه های ریزدانه استفاده گردید. در مجموع ۹ طرح اختلاط مختلف شامل ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد زایکوترم، ۱۰، ۰ و ۲۰ درصد خرده لاستیک و ترکیب آن ها با قیر ۶۰/۷۰ و مصالح سنگی سیلیسی ساخته شد. جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی، آزمایش های آب جوشان، کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی بکار گرفته شد. نتایج آزمایش آب جوشان نشان می دهد که افزایش زایکوترم سبب بهبود حساسیت رطوبتی می گردد ولی خرده لاستیک به دلیل چگالی کمتر نسبت به مصالح سنگ دانه های علی رغم بهبود ظاهری چسبندگی قیر به مصالح دانه ای، تأثیر زیادی بر نتیجه نهایی آزمایش آب جوشان نمی گذارد. بر اساس نتایج آزمایش کشش مستقیم و معیار نسبت مقاومت کششی (TSR)، مدلی برای پیش بینی TSR ساخته شد که طبق آن، درصد حداقل زایکوترم مورد نیاز برای جایگزینی ۱۰ درصدی خرده لاستیک، ۰/۱۲۸ درصد و برای جایگزینی ۲۰ درصدی خرده لاستیک، ۰/۱۴۹ درصد می باشد. طبق نتایج آزمایش مدول برجهندگی، افزودن زایکوترم سبب افزایش مدول برجهندگی می گردد، درحالی که جایگزینی خرده لاستیک سبب افزایش اندکی در مدول می شود. علاوه بر این، کنترل پارامتر نسبت مدول برجهندگی (RMR)، بیانگر کارآیی مناسب تمامی مخلوط ها در برابر خرابی حساسیت رطوبتی می باشد.

### ۱- مقدمه

ایجاد زیرساخت های حمل و نقل شامل ساخت و ساز جاده های یکی از صنایع آلوده کننده محیط زیست می باشند. برای ساخت مخلوط های قیری سازگارتر با محیط زیست، نیاز به استفاده از روش ها و افزودنی هایی می باشد که با حفظ خصوصیات مکانیکی مخلوط های ساخته شده، موجب کاهش دمای ساخت و عمل آوری شود. مخلوط آسفالتی نیمه گرم، مخلوطی است که در مقایسه با مخلوط های آسفالتی گرم با دمای ۲۰ الی ۴۰ درجه پایین تر تولید می شوند. با توجه به دمای تولید مخلوط های آسفالتی به چهار گروه مخلوط

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: fakhri@knt.ac.ir

آسفالتی گرم (۱۵۰ الی ۱۹۰ درجه سانتی گراد)، مخلوط آسفالتی نیمه گرم (۱۰۰ الی ۱۴۰ درجه سانتی گراد)، مخلوط آسفالتی متعادل (۶۰ الی ۱۰۰ درجه سانتی گراد) و مخلوط آسفالتی سرد (۰ الی ۴۰ درجه سانتی گراد) تقسیم می گردند [۲۱].

روش های نوین کاهش دمای تولید مخلوط آسفالتی شامل روش کفزایی، موم آلی و افزودنی های شیمیایی می باشد. هدف تمامی این روش ها که هر کدام مزایای منحصر به خود را دارند، کاهش ویسکوزیته قیر در مخلوط های آسفالتی می باشد که سبب بهبود کارایی، کاهش تولید گازهای گلخانه ای و به طور کلی ایجاد شرایط بهتر عملکردی مخلوط های آسفالتی می باشد. در تحقیقات انجام شده در مورد مخلوط



ضد عریان‌شدگی استفاده کرد [۸ و ۷].

از طرفی با توجه به رشد روز افزون تعداد لاستیک‌های فرسوده در انبارها، می‌توان از آن به عنوان افزودنی جایگزین مصالح سنگی استفاده نمود. حلقه‌های لاستیک فرسوده در سرتاسر جهان تبدیل به تهدید زیست‌محیطی بزرگی شده‌اند. طبق برآورد محققان سالانه بیش از ۱/۵ میلیارد حلقه لاستیک در جهان تولید می‌گردد [۹ و ۱۰]. در سالیان اخیر نوعی چالش برای به کارگیری مصالح بازیافتی به عنوان جایگزین مصالح سنگدانه‌ای که برای حفاظت بیشتر از محیط زیست صورت می‌گیرد، آغاز گردیده است. یکی از راه‌کارهای موجود استفاده از لاستیک‌های ضایعاتی به عنوان جایگزین مصالح سنگدانه‌ای است. با این کار می‌توان از لاستیک‌های ضایعاتی استفاده و از آلودگی‌های دفع آن جلوگیری نمود. این عمل که باعث جلوگیری از آزادسازی حجم زیاد گاز دی‌اکسیدکربن می‌شود، از لحاظ اقتصادی نیز با کاهش حجم سنگدانه‌های مصرفی باعث صرفه‌جویی اقتصادی می‌گردد [۱۱-۱۴].

هدف از این تحقیق بررسی اثر استفاده از خرده لاستیک به عنوان جایگزین حجمی سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی و نانو ماده ضد عریان‌شدگی (زایکوترم) با درصدهای اختلاط مختلف بر خصوصیات حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم می‌باشد. به منظور بررسی خصوصیات حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها از دو نوع آزمایش کیفی (شامل آب جوشان) و کمی (شامل کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده و مدول برجهندگی) استفاده می‌گردد.

## ۲- مروری بر مطالعات پیشین

عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم در برابر رطوبت یک موضوع پیچیده است و در طی شش دهه گذشته موضوع تحقیقات مختلفی بوده است که محققان زیادی به این مسئله پرداخته‌اند. البته این حقیقت که چسبندگی بین قیر و سنگدانه در حضور آب کاهش می‌یابد و پیوستگی در داخل قیر به علت رطوبت از بین می‌رود، از مدت‌ها پیش برای اجراکنندگان مخلوط آسفالت آشکار بوده است. بررسی صورت گرفته در سال ۲۰۰۲ که شامل ۵۵ اداره راه و ترابری ایالات متحده و برخی از سایر سازمان‌های رسمی مرتبط با روسازی بوده است، نشان می‌دهد که ۸۷ درصد این نهادها از آزمایش‌های حساسیت رطوبتی استفاده می‌کنند. بیشتر نهادهای استفاده‌کننده،

آسفالتی نیمه گرم فوایدی مانند کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، سلامت بیشتر کارگران به دلیل کاهش تولید گازهای سمی، کاهش انرژی مورد نیاز برای تولید مخلوط، افزایش سرعت ساخت روسازی و افزایش فاصله حمل مخلوط آسفالت نیمه گرم به دلیل کاهش دمای با سرعت کمتر اشاره گردیده است. از سوی دیگر معایبی همچون هزینه‌های بالاتر تولید به دلیل رایج نبودن خطوط تولید مخلوط آسفالتی، کمبود اطلاعات در مورد عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی، حساسیت رطوبتی بیشتر به دلیل دمای عمل‌آوری پایین‌تر و مشکلات عدم ایجاد پوشش کافی قیر در سطح مصالح سنگدانه‌ای برای مخلوط‌های آسفالت نیمه گرم ذکر گردیده است [۳ و ۴].

به دلیل کاهش دمای تولید مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم، مشکلاتی به وجود آمده که یکی از مهم‌ترین این مشکلات، حساسیت رطوبتی در آسفالت می‌باشد. درجه حرارت تولیدی این مخلوط‌ها قادر به تبخیر تمام رطوبت موجود در سنگدانه‌ها نیست و در هنگام آماده‌سازی مصالح و تولید مخلوط مقداری رطوبت در مصالح باقی می‌ماند. این رطوبت محبوس در سنگدانه‌ها در هنگام تراکم نیز در مخلوط باقی مانده و سبب افزایش حساسیت در برابر آسیب‌های رطوبتی روسازی راه می‌شوند [۵]. متغیرهای گوناگونی بر میزان حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی تأثیر می‌گذارند. نوع و ویژگی‌های مصالح و دانه‌بندی آن، سختی قیر و نوع فیلر بکار رفته و ویژگی‌های مخلوط از قبیل نفوذپذیری و فضاهای خالی سنگ‌دانه‌ها، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها می‌باشند. عوامل دیگری شامل ضخامت لایه‌های روسازی، شرایط محیطی و ترافیک عبوری نیز می‌توانند در میزان خرابی‌های ناشی از حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها نقش داشته باشند [۶].

برای کاهش حساسیت رطوبتی و جلوگیری از پدیده عریان‌شدگی، یا باید با استفاده از زه‌کشی مناسب مانع از ورود آب به روسازی راه شد، یا از مصالح سنگدانه‌ای آهکی مناسب استفاده کرد و یا با استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مناسب مانع از این خرابی شد. زه‌کشی مناسب می‌تواند تا حدود زیادی از عریان‌شدگی جلوگیری کند ولی به هر حال این روش به تنهایی نمی‌تواند به طور کامل از عریان‌شدگی جلوگیری نماید. همچنین به دلایل هزینه‌های بالای حمل و نقل در راه‌سازی، امکان استفاده از مصالح آهکی همواره میسر نیست. بنابراین برای کاهش حساسیت رطوبتی در مواردی باید از مواد



بار الکتریکی غالب را در سطح سنگدانه معکوس کند و در نتیجه انرژی سطح سنگدانه‌ها را کاهش دهد، پوشانده شود (مانند اضافه کردن آهک به سنگدانه). رویکرد دوم کاهش انرژی سطح قیر و دادن بار الکتریکی مخالف سطح سنگدانه‌ها با آن می‌باشد (مانند اضافه کردن مواد ضد عریان‌شدگی مایع به قیر) [۲۰]. یکی از راه کارهای مقابله با عملکرد ضعیف و خرابی‌های زودرس مخلوط‌های آسفالتی، بهبود عملکرد قیر است. استفاده از افزودنی‌های قیر یکی از روش‌های بهبود عملکرد قیر می‌باشد که این امر، ایده استفاده از مواد نانو را برای برخی اهداف بوجود آورده است. حامدی و همکاران با بکارگیری نانو زایکو اکسید در مخلوط آسفالتی به این نتیجه رسیدند که استفاده از این افزودنی باعث بهبود چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی شده و در نتیجه حساسیت رطوبتی مخلوط حاصله، کاهش خواهد یافت [۲۱]. آذرهوش و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی اثر نانو اکسیدتیتانیوم ( $TiO_2$ ) بر عملکرد مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی پرداختند. آن‌ها با استفاده از قوانین ترمودینامیک و روش انرژی آزاد سطحی<sup>۱</sup> بیان کردند که انرژی آزاد کل قیر در اثر اصلاح افزایش یافته و در نتیجه پوشش سنگدانه‌ها توسط قیر به شکل مناسب تری صورت گرفت. این چسبندگی بهتر قیر به مصالح سنگی منجر به کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با  $TiO_2$  شده است [۲۲]. مقدس‌نژاد و همکاران [۲۳] قیر خالص را با نانو کلسیم کربنات ( $CaCO_3$ ) اصلاح کردند که نتایج انرژی آزاد سطحی قیر و همچنین کشش غیرمستقیم مخلوط آسفالتی بیانگر افزایش مقاومت مخلوط در برابر خرابی رطوبتی شده است.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- مصالح مصرفی

##### ۳-۱-۱- مصالح سنگی و ضایعات دانه‌های لاستیک

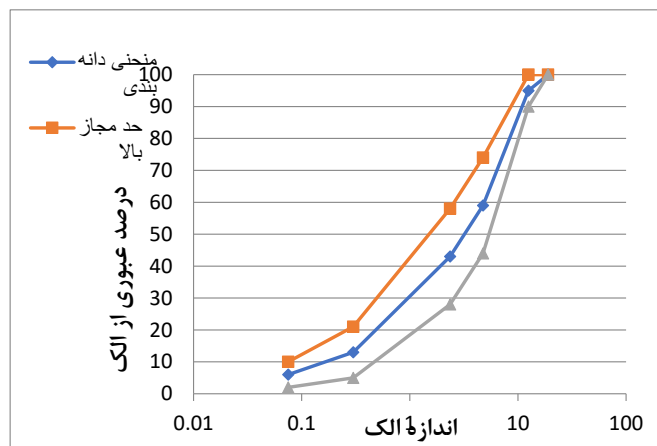
در این پژوهش از مصالح سنگی سیلیسی موجود در معدن رودهن واقع در شرق تهران استفاده شده است. دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ نشریه ۲۳۴ [۲۴] برای دانه بندی مصالح سنگی انتخاب شد که نمودار آن مطابق شکل ۱ است:

خرده لاستیک نیز با وزن مخصوص خرده لاستیک برابر ۱/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب از یکی از کارگاه‌های واقع در شهریار تهران تهیه

۶۲ درصد، از آزمایش‌های حساسیت رطوبتی به عنوان بخشی از فراین طراحی مخلوط آسفالتی خود استفاده می‌کنند [۱۵].

اولین آزمایش‌های معرفی شده بر روی مخلوط‌های آسفالتی غیرمتراکم انجام می‌شدند که شامل آزمایش آب جوشان (ASTM D3625) و آزمایش استاتیک-غوطه وری (AASHTO T182) بوده‌اند. این آزمایش‌ها کیفی بوده و ارتباط مناسبی با عملکرد میدانی نشان نمی‌دادند [۱۶]. در ادامه، آزمایش غوطه وری فشاری (ASTM D1075 یا AASHTO T165) معرفی شد تا تأثیر تراکم را نیز در نظر بگیرد. در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰، لاتمن یک روش آزمایشی را ابداع کرد که بیشترین پذیرش را در صنعت روسازی داشت که تحت استاندارد (ASTM AASHTO T283 (D4867 نامگذاری شد. بیشتر نهادهای راه و ترابری، ۸۱ درصد، در حال حاضر از این استاندارد استفاده می‌کنند. مهم‌ترین ایراد وارد به این روش آزمایش این است که تأثیر ترکیبی رطوبت و بارگذاری دینامیکی ناشی از ترافیک را ثبت نمی‌کند [۱۷]. در دهه ۱۹۹۰، آزمایشی مانند ابزار اثر چرخ هامبورگ معرفی شدند [۱۸]. در حدود ۴ درصد از نهادهای راه و ترابری مورد بررسی از این روش برای تعیین حساسیت رطوبتی استفاده می‌کنند [۱۵]. قابل ذکر است که آزمایش اثر چرخ هامبورگ ویژگی مهندسی خاصی از مخلوط آسفالتی را بیان نمی‌کند و در این آزمایش تأثیر شیارشدگی و خرابی رطوبتی به صورت مجزا بیان نمی‌شود؛ البته درک مفهومی از مکانیزم خرابی رطوبتی در تحقیقات انجام شده با آن ارائه می‌شود [۱۹]. در حالت کل، آزمایش‌هایی که برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند را می‌توان به آزمایش‌هایی که بر روی مخلوط‌های غیرمتراکم و آزمایش‌هایی که بر روی مخلوط‌های متراکم انجام می‌شود، تقسیم بندی کرد. همه این آزمایش‌ها در نهایت می‌گویند که مخلوط مورد نظر آیا در برابر رطوبت مقاوم است و یا خیر. در این حالت، هیچ کدام از این آزمایش‌ها اطلاعاتی که بتوان از آن در مورد نحوه تأثیر رطوبت بر مخلوط آسفالت آگاهی به دست آورد را فراهم نمی‌آورند.

به منظور بهبود چسبندگی و کاهش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی دو رویکرد مختلف وجود دارد. رویکرد اول پیشنهاد می‌کند که سطح سنگدانه‌ها توسط یک عامل مناسب که



شکل ۱. منحنی دانه بندی سنگدانه ها

Fig. 1. Aggregate grading curve

جدول ۱. خصوصیات خرده لاستیک

Table 1. Crumb rubber properties

مقدار	اجزاء
٪ ۱۶	استون استخراج شده
٪ ۵	خاکستر
٪ ۲۸	کربن سیاه
٪ ۵۱	هیدروکربن لاستیک
۱/۰۲	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )

جدول ۲. مشخصات قیر

Table 2. Bitumen specifications

واحد	استاندارد آزمایش	حدود مجاز	نتایج آزمایش	خصوصیات
کیلوگرم بر متر مکعب	ASTM D70	۱/۰۱-۱/۰۶	۱/۰۴	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی گراد
دهم میلی متر	ASTM D5	۷۰-۶۰	۶۵	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد
درجه سانتی گراد	ASTM D36	۵۶-۴۹	۵۳	نقطه نرمی
سانتی متر	ASTM D113	بزرگتر از ۱۰۰	۱۰۶	انگمی در ۲۵ درجه سانتی گراد
درجه سانتی گراد	ASTM D92	بزرگتر از ۲۵۰	۳۰۱	نقطه اشتعال
درجه سانتی گراد	ASTM D70	-	۳۱۶	نقطه احتراق

### ۲-۱-۳- قیر و زایکوترم

قیر مورد استفاده در این پژوهش، قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰-PG58-16) است که از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شده است. خصوصیات قیر مصرفی در جدول ۲ آمده است:

شد. خرده لاستیک را با توجه به منحنی دانه بندی در نظر گرفته شده، با مصالح سنگدانه ای مخلوط کرده و در ساخت نمونه های آزمایشگاهی استفاده گردید. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این ماده در جدول ۱ ارائه شده است.



جدول ۳. مشخصات زایکوترم  
Table 3. Zycotherm specifications

نتایج	خصوصیات
وزن مخصوص ۰/۹۷ گرم بر سانتی متر مکعب	
حالت ماده مایع	
رنگ ماده زرد کم رنگ	
بوی ماده بدون بو	
نقطه اشتعال ۸۰ درجه سانتی گراد	
نقطه انجماد ۵ درجه سانتی گراد	

جایگزینی زایکوترم می‌باشند. قابل به ذکر است که در این پژوهش برای هر طرح اختلاط، ۵ نمونه ساخته شده که از ۳۰ نمونه برای ساخت مدل اولیه و از ۱۵ نمونه دیگر برای اعتبارسنجی مدل (مدل جهت تعیین درصد بهینه افزودنی‌ها) استفاده شد.

### ۳-۳- آزمایش آب جوشان

آزمایش آب جوشان طبق استاندارد ASTM D3625 انجام می‌گیرد. این آزمایش اثر حساسیت سنگدانه‌های قیر اندود شده با آب را بررسی می‌کند. برای انجام این آزمایش، آب مقطر را درون ظرف ریخته، به صورتی که نصف ظرف پر شود. سپس حدود ۲۵۰ گرم مخلوط را آماده کرده به طوری که نحوه آماده کردن، میزان هم زدن آن و همچنین زمان قرار دادن در اون بایستی مشابه ساخت نمونه‌ها باشد. قبل از اضافه کردن نمونه به ظرف آب، دمای آن را به ۸۵-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رسانده، سپس به آب در حال جوش اضافه می‌شود. پس از اضافه کردن مخلوط آسفالتی به آب در حال جوش، دمای آن کاهش پیدا کرده و باید مجدداً به دمای جوش برسد. سپس آب به مدت ۱۰ دقیقه جوشانده می‌شود. سپس آب ظرف را خالی نموده و بلافاصله پس از خنک شدن مصالح، نمونه‌های درشت دانه و ریزدانه را مشاهده چشمی کرده تا آن‌هایی که پوشش قیری خود را از دست داده‌اند از نمونه جدا شوند. سپس نسبت وزن دانه‌هایی که پوشش قیری خود را از دست نداده‌اند به وزن کل نمونه اندازه‌گیری می‌شود. این نسبت می‌تواند یک شاخص بصری از میزان عریان‌شدگی مصالح باشد [۲۹].

نانو-ماده ضد عریان‌شدگی با نام تجاری زایکوترم شناخته می‌شود. زایکوترم یک ترکیب ارگانو سیلان است که گروه‌های سیلانول تشکیل می‌دهد. گروه‌های سیلانول فعال هستند و با گروه‌های سیلانول سطح مواد غیرآلی مثل گراو، خاک و ماسه پیوندهای سیلوکسانی تشکیل می‌دهند. قیر اصلاح شده با زایکوترم به دلیل افزایش خاصیت ترکنندگی، سریع‌تر به پوشش‌دهی کامل دست می‌یابد، همچنین به اشباع کامل منافذ ریز و حفره‌های سطح مصالح کمک می‌نماید. این ماده به دلیل از بین بردن لایه هوای موجود در سطح مصالح سنگی، باعث کاهش پتانسیل عریان‌شدگی و تأثیر اکسیداسیون در محل تلاقی بین قیر و مصالح سنگی می‌گردد. در واقع این ماده به صورت شیمیایی سطح مصالح سنگی را از آب دوست به قیر دوست تغییر می‌دهد. میزان مصرف زایکوترم در قیر حدود ۰/۱ الی ۰/۲ درصد وزنی قیر است [۲۵-۲۷]. مشخصات زایکوترم در جدول ۳ ارائه شده است:

جهت اصلاح قیر با زایکوترم از همزن برقی با دور موتور بالا استفاده شد. نحوه همزدن به این صورت است که ابتدا قیر را تا دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد گرم کرده تا رقیق شده و پس از افزودن زایکوترم نیز به مدت ۲۵ الی ۳۰ دقیقه، همزن با دور موتور بالا کار می‌کند.

### ۳-۲- آماده سازی نمونه‌ها و تعیین درصد قیر بهینه

در این پژوهش با به کارگیری استاندارد ASTM D1559، ساخت نمونه‌ها به روش مارشال صورت گرفت و درصد قیر بهینه برای مخلوط شاهد ۵/۶٪ بدست آمد. در تحقیقات منصور فخری و همکارانش [۲۸] نشان داده شد که درصد زایکوترم تأثیر محسوسی در مقدار قیر بهینه ندارد. به همین دلیل فقط درصد خرده لاستیک در مخلوط را تغییر داده و برای تمام نمونه‌ها، درصد زایکوترم در هنگام محاسبه درصد قیر بهینه، ۱/۵ درصد وزنی قیر به مخلوط اضافه می‌گردد. در این راستا، ۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ به عنوان مقادیر جایگزین خرده لاستیک بجای مصالح سنگی انتخاب گردید که درصد قیر بهینه آنها به ترتیب برابر ۵٫۶٪، ۶٪ و ۶٫۳٪ بدست آمد. به عنوان نمونه، محاسبات طرح اختلاط برای ۰٪ خرده لاستیک در جدول ۴ ارائه شده است.

نام گذاری مخلوط‌های آسفالتی در این پژوهش، به شرح جدول ۵ بوده که  $R$  بیانگر درصد جایگزینی خرده لاستیک و  $Z$  درصد

جدول ۴. نمونه محاسبات طرح اختلاط مارشال برای ۰٪ خرده لاستیک  
Table 4. Sample calculations of Marshall mixing scheme for 0% crumb rubber

درصد فضای خالی پر شده با قیر V.F.A	درصد فضای خالی مصالح سنگی V.M.A	درصد فضای خالی AV	وزن مخصوص ماکزیمم $G_{mm}$	وزن مخصوص حقیقی $G_{mb}$	روانی (میلی متر)	استحکام مارشال KN	درصد وزنی قیر
۵۸/۵	۱۹/۵	۸/۱	۲/۳۷۵	۲/۱۸۳	۲/۴۳	۸/۷۴	۴/۵
۵۷/۴	۱۸/۸	۸	۲/۳۹۶	۲/۲۰۴	۳/۰۴	۸/۹۱	۴/۵
۵۷/۴	۱۹	۸/۱	۲/۳۹۱	۲/۱۹۷	۲/۶۹	۹/۱۳	۴/۵
۶۱/۸	۱۷/۳	۶/۶	۲/۴۱۵	۲/۲۵۶	۳/۲۱	۹/۰۸	۵
۶۵/۸	۱۸/۱	۶/۲	۲/۳۸۱	۲/۲۳۳	۳/۳۶	۹/۶۶	۵
۶۲/۱	۱۷/۱	۶/۵	۲/۴۱۷	۲/۲۶۰	۳/۴۷	۹/۸۰	۵
۶۸/۲	۱۶/۷	۵/۳	۲/۴۱۲	۲/۲۸۵	۳/۳۲	۹/۳۷	۵/۵
۷۴/۵	۱۵/۷	۴	۲/۴۰۷	۲/۳۱۱	۳/۱۹	۱۰/۲۴	۵/۵
۷۴	۱۴/۲	۳/۷	۲/۴۴۲	۲/۳۵۲	۳/۶۷	۱۰/۶۵	۵/۵
۸۰/۸	۱۷/۷	۳/۴	۲/۳۴۹	۲/۲۶۹	۳/۸۵	۹/۴۹	۶
۷۶/۶	۱۷/۵	۴/۱	۲/۳۷۱	۲/۲۷۴	۳/۵۴	۹/۷۸	۶
۷۲/۷	۱۶/۸	۴/۶	۲/۴۰۳	۲/۲۹۲	۳/۷۰	۹/۸۵	۶
۷۸	۱۹/۱	۴/۲	۲/۳۴۱	۲/۲۴۳	۴/۰۶	۸/۹۳	۶/۵
۷۵/۶	۱۹/۶	۴/۸	۲/۳۳۹	۲/۲۲۷	۳/۹۳	۹/۳۲	۶/۵
۷۶/۵	۲۰	۴/۷	۲/۳۲۷	۲/۲۱۸	۴/۱۶	۹/۳۵	۶/۵

جدول ۵. نام گذاری مخلوط های آسفالتی  
Table 5. The naming of asphalt mixtures

نام نمونه	درصد دانه لاستیکی	درصد زایکوترم	درصد قیر
R0Z1	۰	۰/۱	۵/۶
R0Z1.5	۰	۰/۱۵	۵/۶
R0Z2	۰	۰/۲	۵/۶
R10Z1	۱۰	۰/۱	۶
R10Z1.5	۱۰	۰/۱۵	۶
R10Z2	۱۰	۰/۲	۶
R20Z1	۲۰	۰/۱	۶/۳
R20Z1.5	۲۰	۰/۱۵	۶/۳
R20Z2	۲۰	۰/۲	۶/۳

وابسته به عملکرد اپراتور آزمایش دارد. نکته قابل توجه دیگر این است که در این آزمایش به دلیل اینکه مخلوط متراکم نشده آزمایش

از فواید این آزمایش می توان به سریع بودن و کم هزینه بودن اشاره کرد ولی این آزمایش نتایج خیلی دقیقی را ارائه نکرده و بسیار

بار که نمونه تحمل می کند ( $N$ )،  $t$ : ضخامت نمونه ( $mm$ )،  $D$ : قطر نمونه ( $mm$ ) است.

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \quad (2)$$

که در آن  $TSR$ : نسبت مقاومت کششی،  $S_1$ : مقاومت کششی نمونه خشک،  $S_2$ : مقاومت کششی نمونه عمل آوری شده است. این آزمایش برای همه نمونه ها انجام شد. همچنین ۲۰٪ نمونه ها برای نشان دادن تکرارپذیری آزمایش مجدداً ساخته شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج نهایی نمونه ها و تکرار آن ها کمتر از ۵ درصد اختلاف داشتند.

### ۳-۵- آزمایش مدول برجهندگی

آزمایش مدول برجهندگی قطری، مطابق استاندارد ASTM D4123-82 از مقاومت کششی غیرمستقیم با بارگذاری سیکلی انجام می شود. این استاندارد پیشنهاد می کند که مدول برجهندگی توسط تنش هایی با مقادیری در بازه ۱۰ تا ۵۰ درصدی از مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ها مطابق فرمول ۳ اندازه گیری شود. با توجه به اینکه بارهای وارده بسیار کوچکتر از مقاومت نهایی نمونه ها است، این آزمایش جزء آزمایش های غیر مخرب قرار می گیرد.

$$Mr = \frac{P(v+0.27)}{H*L} \quad (3)$$

که در آن  $Mr$ : مدول برجهندگی ( $Mpa$ )،  $P$ : میزان حداکثر نیروی عمودی تکرار شونده ( $N$ )،  $v$ : ضریب پواسون مخلوط آسفالتی که برابر با ۰/۳۵ در نظر گرفته شده،  $L$ : تغییر شکل افقی برگشت پذیر ( $mm$ ) و  $H$ : ارتفاع نمونه ( $mm$ ) است.

یکی دیگر از پارامترهای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی، تعیین نسبت مدول ارتجاعی در شرایط خشک و مرطوب ( $RMR$ ) می باشد. مدول ارتجاعی به دلیل اینکه حساسیت بیشتری به تغییر در ویژگی های قیر و مخلوط در برابر آسیب ناشی از رطوبت نسبت به مقاومت کششی دارد، مناسب برای ارزیابی حساسیت رطوبتی می باشد [۳۰-۳۲]. در این پژوهش نیز با در نظر گرفتن بارگذاری ۰/۱ ثانیه به شکل نیمه سینوسی، با بارگذاری اولیه ۲۰ سیکل و بارگذاری اصلی ۵ سیکل در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد برای نمونه های کنترلی و نمونه های تحت شرایط ذوب و یخبندان (عمل آوری شده) انجام شد. پارامتر  $RMR$  از طریق رابطه (۴) به

می شود؛ اثر تراکم نادیده گرفته می شود. به هر حال این آزمایش به صورت بصری می تواند میزان عریان شدگی مصالح سنگی را نشان دهد، اما تصمیم گیری قطعی بر اساس این آزمایش نمی تواند مورد قبول باشد.

### ۳-۴- آزمایش حساسیت رطوبتی

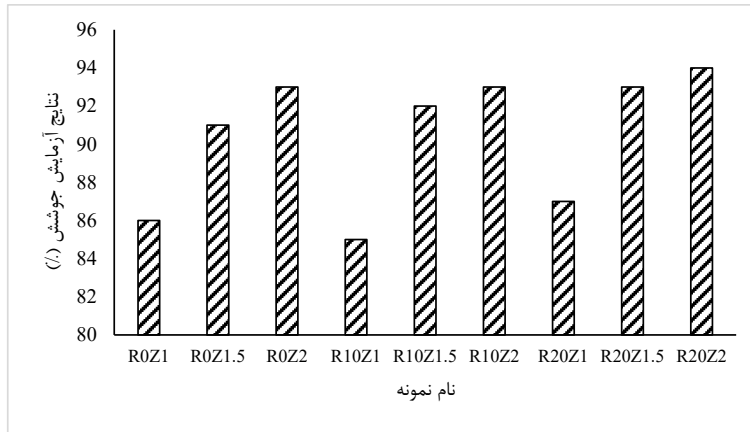
این آزمایش مطابق استاندارد AASHTO-T283 انجام شد. پس از آنکه نمونه های ۱۲۰۰ گرمی با دستگاه تراکم با درصد هوای  $0.5 \pm 0.7$  ساخته شدند، نمونه ها به دو دسته مرطوب و خشک تقسیم بندی می شوند. نمونه های خشک بدون تغییر باقی می مانند و نمونه های مرطوب بایستی طبق استاندارد اشوتو T283 عمل آوری شوند. برای این منظور ابتدا نمونه ها را تحت فشار منفی بین ۷۰٪ تا ۸۰٪ اشباع کرده و بلافاصله دور آن ها را سلفن کشیده و سپس درون پلاستیک قرار داده شوند و ۱۰ میلی لیتر آب به آن اضافه کرده و هوای ظرف پلاستیکی خارج می شود. جهت شبیه سازی شرایط یخبندان، نمونه به همراه ظرف پلاستیکی و درون فریزر با دمای ۱۸- درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده می شوند.

سپس نمونه را از فریزر بیرون آورده و پلاستیک و سلفن دور آن را باز کرده و در حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت قرار داده می شود. اکنون نمونه ها را که سیکل ذوب و یخبندان را تجربه کرده اند، در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت می مانند. پس از آن نمونه را در حمام با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و به مدت ۲ ساعت قرار داده و سپس توسط دستگاه کشش غیرمستقیم نمونه با نرخ بارگذاری ۵۰ میلی متر بر دقیقه تحت بار قرار گرفته و بیشترین باری که نمونه تحمل می کند ثبت می شود.

برای نمونه های خشک نیز پس از آنکه دور آن ها سلفن کشیده شد، به مدت ۲ ساعت در حمام آب گرم و با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد قرار داده و سپس بارگذاری می شوند و بیشترین باری را که نمونه تحمل می کند، ثبت می شود. نسبت مقاومت کششی نمونه مرطوب به نمونه خشک شاخصی از حساسیت رطوبتی می باشد. با استفاده از روابط (۱) و (۲) این نسبت محاسبه می شود.

$$s_i = \frac{200 \cdot P}{\pi t D} \quad (1)$$

که در آن  $s_i$ : حداکثر مقاومت کششی نمونه ( $KPa$ )،  $P$ : بیشترین



شکل ۲. نتایج آزمایش جوشش

Fig. 2. Boiling test results

درصد جایگزینی خرده لاستیک به نسبت کل سنگدانه‌ها مقدار اندکی می‌باشد و نتایج آزمایش جوشش به صورت درصد وزنی بیان می‌گردد؛ انعکاس نتایج واقعی در آزمایش جوشش به خوبی صورت پذیرفته است. با توجه به مشاهدات می‌توان گفت آزمایش جوشش در توصیف مخلوط‌هایی با دانه‌های غیر هم‌نوع و با چگالی‌های غیر همسان، نتایج ضعیفی را می‌دهد. با توجه به قیمت زایکوترم و در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، حالت بهینه با توجه به نتایج آزمایش جوشش ۰/۱۵ درصد افزودن آن توصیه می‌شود.

#### ۲-۴- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

نتایج حاصل از این آزمایش در حالت خشک و مرطوب در شکل ۳ و همچنین مقادیر TSR در شکل ۴ ارائه گردیده است.

با توجه به شکل ۳، افزایش زایکوترم سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم می‌گردد. طبق این نتایج، نرخ افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش درصد زایکوترم در نمونه‌های خشک آهسته می‌باشد ولی در نمونه‌های مرطوب، مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد. با افزایش زایکوترم از ۰/۱ به ۰/۱۵ درصد، در حالت خشک به طور میانگین حدود ۵ درصد و در حالت مرطوب به صورت میانگین حدود ۱۹ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش می‌یابد. این درحالی است که با افزایش زایکوترم از ۰/۱ به ۰/۲ درصد، در حالت خشک به طور میانگین حدود ۶ و در حالت مرطوب به صورت میانگین ۳۱ درصد، مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش می‌یابد.

دست می‌آید:

$$RMR = \frac{(Mr_{Wet})}{(Mr_{Dry})} \quad (4)$$

که در آن  $Mr_{Dry}$ : مدول برجهندگی برای نمونه شاهد و  $Mr_{Wet}$ : مدول برجهندگی نمونه عمل‌آوری شده است.

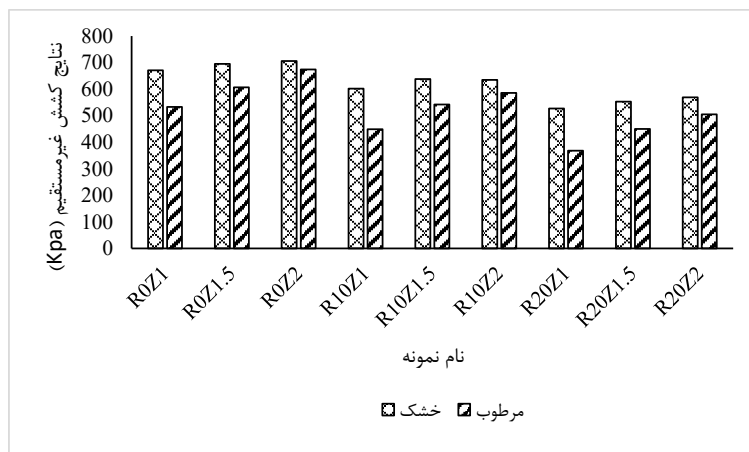
### ۳- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل آن‌ها

#### ۱-۴- نتایج آزمایش آب جوشان

نتایج حاصل از آزمایش آب جوشان در شکل ۲ آورده شده است. نتیجه آزمون جوشش براساس نسبت وزن سنگدانه‌های عریان نشده به کل سنگدانه‌ها محاسبه می‌شود. هرچه نتیجه آزمایش جوشش به ۱۰۰ نزدیک‌تر شود، میزان عریان‌شدگی آن کاهش می‌یابد و مقاومت نمونه در برابر حساسیت رطوبتی افزایش خواهد یافت.

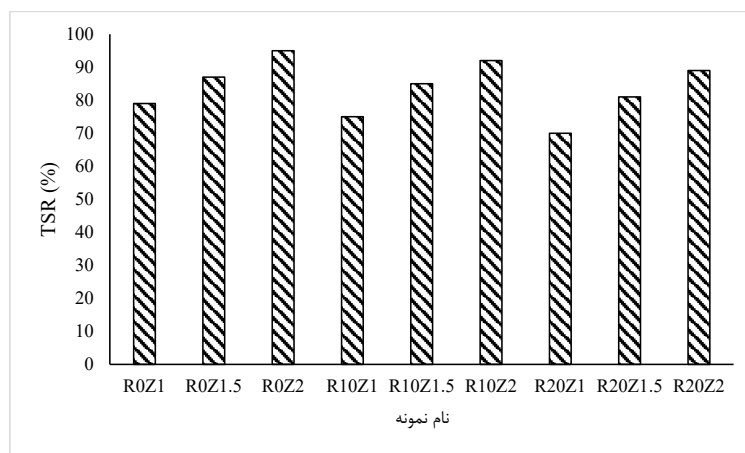
طبق نتایج این آزمایش، افزودن زایکوترم به عنوان یک ماده ضدعریان‌شوندگی، تأثیرات قابل توجهی بر نتیجه آزمایش جوشش گذاشته؛ به نحوی که بصورت میانگین افزایش زایکوترم از ۰/۱ به ۰/۱۵ درصد، سبب بهبود ۷ درصدی و افزایش زایکوترم از ۰/۱ به ۰/۲ درصد، سبب بهبود ۸/۵ درصدی نتایج آزمایش می‌گردد.

افزودن خرده لاستیک با توجه به نتیجه گزارش شده در آزمایشات، تأثیر چشم‌گیری بر بهبود خواص رطوبتی نمونه‌ها ندارد، اما واقعیت عینی در هنگام آزمایش چیز دیگری است و وجود خرده لاستیک سبب بهبود چسبندگی در حجم کل دانه‌ها می‌گردد. از آنجایی‌که چگالی خرده لاستیک تقریباً یک سوم دانه‌های سنگدانه‌ای است و



شکل ۳. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

Fig. 3. Indirect Tensile test results



شکل ۴. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب به خشک (TSR)

Fig. 4. The Indirect tensile ratio of wet to dry samples

بوده، افزایش ۲۳ درصدی را در مقادیر TSR شاهد هستیم. به هنگام جایگزینی خرده لاستیک نیز، در حالت افزایش درصد جایگزینی از ۰ به ۱۰٪ به صورت میانگین حدود ۳ درصد و در حالت جایگزینی از ۰ به ۲۰٪، حدود ۸ درصد از TSR مقادیر کاهش می‌یابد. طبق این نتایج، مخلوط آسفالتی حاوی خرده لاستیک کمتر از ۰/۱۵٪ زیکوترم، به دلیل کمتر شدن TSR آن‌ها از ۸۰٪، برای استفاده در روسازی مناسب نمی‌باشند.

۱-۲-۴- تخمین رابطه بین TSR با درصد افزودنی زیکوترم و خرده لاستیک

در این پژوهش، رگرسیون خطی جهت یافتن رابطه بین TSR

طبق نتایج شکل ۳، جایگزینی خرده لاستیک با مصالح ریزدانه سبب کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها می‌گردد. با افزایش درصد جایگزینی خرده لاستیک از ۰ به ۱۰٪، مقاومت نمونه‌ها در حالت خشک به صورت میانگین حدود ۹ درصد و در حالت مرطوب حدود ۱۳ درصد کاهش یافته، در حالی که با افزایش درصد جایگزینی از ۰ به ۲۰٪، مقاومت در حالت خشک حدود ۲۰ درصد و در حالت مرطوب حدود ۲۷ درصد به طور میانگین کاهش می‌یابد.

مطابق استاندارد، حداقل مقدار کنترلی پارامتر TSR جهت کارایی مخلوط آسفالتی در مناطق مستعد خرابی رطوبتی، ۸۰٪ می‌باشد. طبق نتایج شکل ۴، با افزایش درصد زیکوترم از ۰/۱ به ۰/۱۵، به طور میانگین ۱۳٪ و در حالتی که این افزایش از ۰/۱ به ۰/۲

جدول ۶. تحلیل ANOVA در رابطه بین TSR و درصد‌های افزودنی‌ها

Table 6. ANOVA analysis of the relationship between TSR and percentages of additives

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	فاکتور F	فاکتور سیگ (sig.)
رگرسیون	۵۲۴/۱۶۷	۲	۲۶۲/۰۸۳	۲۶۹/۵۷۱	۰/۰۰۰
باقیمانده	۵/۸۳۳	۶	۰/۹۷۲		
کل	۵۳۰/۰۰۰	۸			
متغیر وابسته: TSR					
متغیرهای وابسته: Z, R					

جدول ۷. ضرایب مدل نهایی TSR

Table 7. Coefficients of the final model TSR

مدل	ضرایب غیراستاندارد		ضریب استاندارد شده (بتا)	فاکتور t	فاکتور سیگ (sig.)
	خطای استاندارد	ضریب متغیر (B)			
مقدار ثابت مدل	۶۱/۱۰۷	۱/۳۱۵		۴۶/۵۲۶	۰/۰۰۰
متغیر R	-۰/۳۵۰	۰/۰۴۰	-۰/۳۷۲	-۸/۶۹۵	۰/۰۰۰
متغیر Z	۱۷۳/۳۳۳	۸/۰۵۱	۰/۹۲۲	۲۱/۵۳۰	۰/۰۰۰
متغیر وابسته: TSR					

$$TSR = 61/107 + (173/33 \times Z) - (0/35 \times R) \quad (5)$$

که در آن TSR: نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم مرطوب به خشک (%، Z: درصد افزودن زایکوترم (%، R: درصد جایگزینی خرده لاستیک می باشد. طبق رابطه فوق، حداقل زایکوترم مورد نیاز برای کارآیی مخلوط آسفالتی (یعنی TSR بیشتر از ۸۰٪) به همراه ۱۰٪ خرده لاستیک، ۰/۱۲۸ درصد می باشد و استفاده از درصد زایکوترم کمتر از این مقدار، سبب ناکارآمدی مخلوط آسفالتی خواهد شد. این مقدار برای ترکیب های دیگر از دانه های لاستیکی نیز قابل محاسبه می باشد. اعتبار سنجی مدل ارائه شده نیز با ۲ نمونه باقیمانده از هر طرح اختلاط انجام شد که بیانگر صحت این مدل می باشد.

۴-۳- نتایج آزمایش مدول برجهنگی

نتایج این تست غیرمخرب که بر روی نمونه های آزمایش کشش غیرمستقیم انجام شده بود، در شکل ۵ ارائه شده است: همچنین نسبت مدول برجهنگی (RMR) این نمونه ها در شکل زیر آمده است:

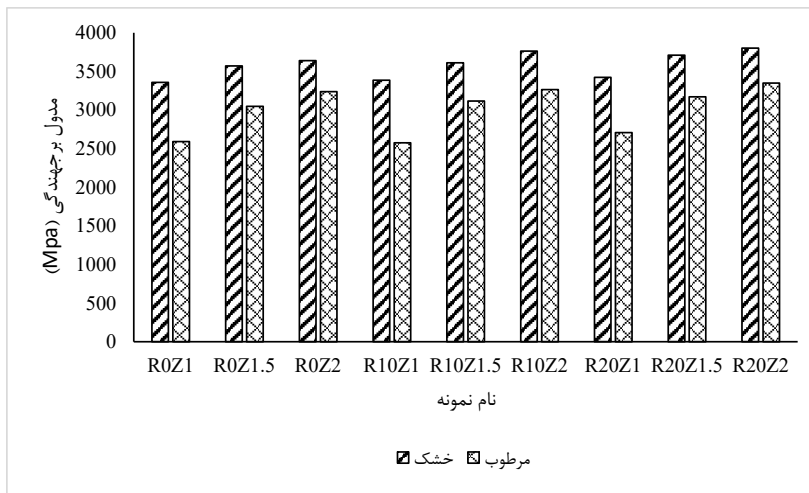
بر اساس این نتایج، افزودن زایکوترم باعث افزایش مدول

(پارامتر مستقل) با درصد افزودنی زایکوترم و درصد جایگزینی خرده لاستیک (پارامترهای وابسته)، بوسیله نرم افزار SPSS بکارگرفته شد که نتیجه آن، معادله ارائه شده در رابطه ۵ می باشد. نتایج تحلیل ANOVA جدول ۶ و جدول ضرایب مدل در جدول ۷ بیان می کند که مقادیر  $t$ ،  $b$ ، و  $sig$  برای تمامی ضرایب این رابطه، کنترل شده و دارای  $R^2 = 98/8$  می باشد که نشانگر معناداری مدل با درصد خیلی بالا است. تعداد طرح های پیشنهادی ۹ عدد است و برای هر طرح ۵ تکرار تست شده که در مجموع ۴۵ ردیف داده موجود می باشد. با سه تکرار از هر طرح یعنی ۲۷ ( $9 \times 3 = 27$ )، به علاوه ۳ نمونه که در مجموع ۳۰ نمونه (حداقل داده مورد نیاز برای ساخت مدل) مدل ساخته شد و با دیگر نمونه های باقیمانده (یعنی  $45 - 30 = 15$ ) اعتبار سنجی مدل ها صورت گرفت. این کار جهت یافتن درصد های بهینه هریک از افزودنی ها و کنترل پارامتر بحرانی مانند  $TSR = 80\%$  صورت گرفته است. این مدل ها در نهایت با تکرارهای باقیمانده، اعتبارسنجی شدند.

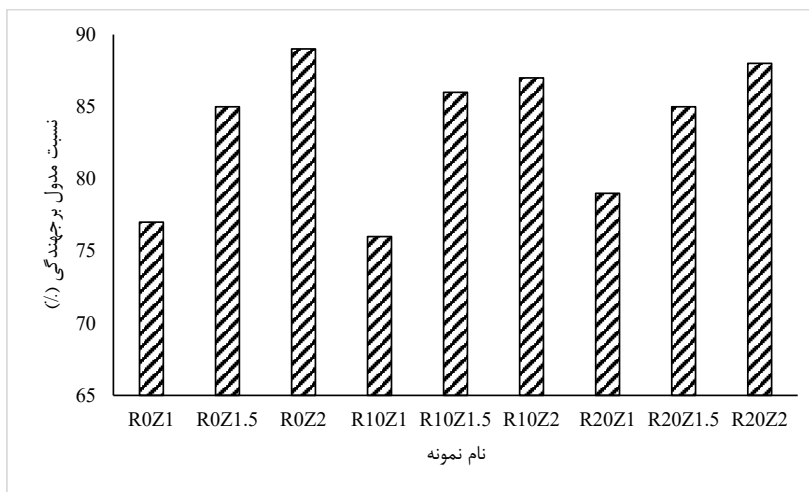
رابطه TSR بر حسب درصد زایکوترم و خرده لاستیک به صورت

زیر می باشد:





شکل ۵. مدول برجهندگی نمونه های خشک و مرطوب  
Fig. 5. resilience modulus of dry and wet samples



شکل ۶. نسبت مدول برجهندگی مرطوب به خشک (RMR)  
Fig. 6. Wet to resilience modulus ratio(RMR)

به طور میانگین حدود ۳ درصد و در حالت مرطوب حدود ۴ درصد مدول برجهندگی را افزایش می دهد. مطابق استاندارد، حداقل مقدار کنترلی پارامتر RMR جهت کارآیی مناسب مخلوط آسفالتی در مناطق مستعد خرابی رطوبتی، ۷۰٪ می باشد. براین اساس و مطابق نتایج شکل ۷، تمامی مخلوط های آسفالتی، کیفیت لازم برای استفاده در روسازی راه را خواهند داشت. به طور کلی افزایش درصد زایکوترم تأثیر محسوسی بر افزایش RMR نمونه ها داشته اما درصد جایگزینی خرده لاستیک تأثیر قابل توجهی بر این نسبت ندارد.

برجهندگی می گردد به طوری که با افزایش درصد زایکوترم از ۰/۱ به ۰/۱۵، در حالت خشک به طور میانگین حدود ۷٪ و در حالت مرطوب حدود ۱۹٪ مدول برجهندگی افزایش می یابد. این درحالی است که با افزایش درصد زایکوترم از ۰/۱ به ۰/۲، در حالت خشک حدود ۱۰٪ و در حالت مرطوب حدود ۲۵٪ مدول برجهندگی افزایش می یابد. با افزودن درصد جایگزینی خرده لاستیک از ۰ به ۱۰٪، در حالت خشک به طور میانگین حدود ۲ درصد و در حالت مرطوب حدود ۱ درصد مدول برجهندگی افزایش می یابد. این درحالی است که با افزایش درصد جایگزینی خرده لاستیک از ۰ به ۲۰٪، در حالت خشک

جدول ۸. تحلیل ANOVA در رابطه بین RMR و درصد افزودنی زایکوترم

Table 8. ANOVA analysis of the relationship between RMR and zykothem additive percentage

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	فاکتور F	فاکتور سیگ (sig.)
رگرسیون	۱۷۰/۶۶۷	۱	۱۷۰/۶۶۷	۵۵/۴۲۳	۰/۰۰۰
باقیمانده	۲۱/۵۵۶	۷	۳/۰۷۹		
کل	۱۹۲/۲۲۲	۸			
متغیر وابسته: RMR					
متغیرهای وابسته: Z					

جدول ۹. ضرایب مدل نهایی RMR

Table 9. Final RMR model coefficients

مدل	ضرایب غیراستاندارد		ضریب استاندارد شده (بتا)	فاکتور t	فاکتور سیگ (sig.)
	خطای استاندارد	ضریب متغیر (B)			
مقدار ثابت مدل	۶۷/۵۵۶	۲/۲۲۷		۳۰/۳۳۰	۰/۰۰۰
متغیر Z	۱۰۶/۶۶۷	۱۴/۳۲۸	۰/۹۴۲	۷/۴۴۵	۰/۰۰۰
متغیر وابسته: TSR					

۱-۳-۴- تخمین رابطه بین RMR با درصد افزودنی زایکوترم و خرده لاستیک

در ابتدا مدل رگرسیون خطی با وجود دو متغیر مستقل درصد زایکوترم و خرده لاستیک برای تخمین RMR در نظر گرفته شد. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون<sup>۱</sup> (r) بیانگر بی ارتباطی پارامتر درصد خرده لاستیک با RMR می باشد. به همین دلیل مدل نهایی بر اساس رگرسیون خطی بین درصد زایکوترم با RMR، در نظر گرفته شد. تحلیل ANOVA و جدول ضرایب مدل مطابق جدول ۸ و ۹ انجام شد و مدل آن در رابطه ۶ ارائه شده که دارای R<sup>2</sup> برابر ۸۸/۸ شده است.

$$RMR = 67/556 + (106/67 \times Z) \quad (6)$$

که در آن RMR: نسبت مدول برجهندگی مرطوب به خشک (%، Z: درصد افزودن زایکوترم می باشد. در پایان اعتبارسنجی مدل نیز با ۲ نمونه باقیمانده از هر طرح اختلاط انجام شد که بیانگر صحت مدل پیشنهادی می باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر خرده لاستیک و زایکوترم بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم بود. برای این منظور، آزمایش‌های آب جوشان، کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی بر روی نمونه های شاهد و اصلاح شده انجام گردید. میزان افزودنی زایکوترم دارای مقادیر ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد وزنی قیر و خرده لاستیک ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزین ریزدانه‌ها بود. نتایج زیر به طور خلاصه از این پژوهش بدست آمده است:

- افزودن زایکوترم به عنوان یک ماده ضدعریان‌شوندگی تأثیرات قابل توجهی بر نتایج آزمایش جوشش می گذارد به طوری که افزایش زایکوترم از ۰/۱ به ۰/۱۵ درصد، سبب بهبود ۷ درصدی و افزایش از ۰/۱ به ۰/۲ درصد سبب بهبود ۸/۵ درصدی نتایج آزمایش می گردد.
- با توجه به نتایج آزمایش جوشش، افزودن خرده لاستیک تأثیر چشم‌گیری بر بهبود خواص رطوبتی نمونه‌ها ندارد، اما واقعیت عینی در هنگام آزمایش چیز دیگری است. از آنجایی که چگالی خرده لاستیک تقریباً یک سوم دانه‌های سنگدانه‌ای است و درصد جایگزینی خرده لاستیک به نسبت کل سنگدانه‌ها مقدار اندکی بوده

1 Pierson's Correlation Factor

- 40, 2008.
- [4] Zaumanis, M., "Warm mix asphalt Investigation", PhD Thesis, Riga Technical University, Kgs. Lyngby, Denmark, 2010.
- [5] Emily D. Shrum, "Evaluation of moisture damage in warm mix asphalt containing recycled asphalt pavement", a thesis presented for the Master of Science degree the University of Tennessee, Knoxville, 2010.
- [6] Arakan Aksoy, Kurtulus Samlioglu, Sureyya Tayfur, Halit Ozen, "Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures", Construction and building materials, 11-18, 2005.
- [7] B. M. Kiggundu and F. L. Roberts, "Stripping in HMA mixture: state of the art and critical review of test methods", NCAT, rep No 88-2, national center for asphalt technology, 1988.
- [8] C. W. Curtis, "A literature review liquid antistripping and tests for measuring stripping", strategic highway research program, Washington D.C, rep SHARP-A/ UIR, 90-016, 1990.
- [9] Siddique R, Naik TR, "Properties of concrete containing scrap-tire crumb rubber—an overview", Waste Management, 563-569, 2004.
- [10] Weiguang Shen, Lai Shan, Tao Zhang, Hongkun Ma, Zhi Cai, Hua Shi, "Investigation on polymer-crumb rubber aggregate modified porous concrete", Constr Build Mater, 667-674, 2013.
- [11] Azevedo F, Pacheco-Torgal F, Jesus C, de Aguiar JB, Camões AF, "Properties and durability of HPC with tyre crumb rubber wastes", Constr Build Mater, 186191, 2012.
- [12] Cindy Estakhri, Joe Button, Alex E. Alvarez, "Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in Texas", FHWA/TX-10/0, 5597-5602, 2010.
- [13] Graham C. Hurley, "Evaluation of new technologies for use in warm mix asphalt", A Thesis submitted to the graduate faculty of auburn university in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 2006.
- [14] D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi,

و نتایج آزمایش جوشش به صورت درصد وزنی بیان می‌گردد؛ انعکاس نتایج واقعی در آزمایش جوشش به خوبی صورت نپذیرفته است.

- افزایش زایکوترم سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم می‌گردد. نرخ افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش درصد زایکوترم در نمونه‌های خشک و مرطوب، به ترتیب کم و زیاد است. این درحالی است که با افزایش درصد جایگزینی خرده لاستیک، کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم در تمامی نمونه‌ها مشاهده گردید.
- جهت کنترل حساسیت رطوبتی مخلوط‌های حاوی ۱۰٪ و ۲۰٪ خرده لاستیک، حداقل زایکوترم مورد نیاز به ترتیب برابر ۰/۱۲۸ و ۰/۱۴۹ می‌باشد. در غیر اینصورت، TSR این نمونه‌ها کمتر از ۸۰٪ خواهد شد. مدل رگرسیونی TSR برحسب درصد زایکوترم و خرده لاستیک با  $R^2 = 98,8$  بدست آمد.
- افزایش درصد زایکوترم سبب افزایش مدول برجهندگی می‌گردد، درحالی که درصد جایگزینی خرده لاستیک سبب افزایش اندکی در مدول برجهندگی می‌گردد. کنترل پارامتر RMR، بیانگر کارایی مناسب تمامی مخلوط‌ها در برابر خرابی حساسیت رطوبتی می‌باشد.
- برای قابل استفاده بودن مخلوط آسفالتی در روسازی نسبت مدول برجهندگی مرطوب به خشک نمونه‌ها، حداقل باید ۷۰ درصد باشد. تمامی نمونه‌های مورد آزمایش بر طبق معیار مدول برجهندگی، کیفیت لازم برای استفاده در روسازی راه را دارند. در نهایت مدل رگرسیونی RMR فقط برحسب درصد زایکوترم  $R^2 = 88,8$  به دست آمد.
- اعتبارسنجی مدل‌های پیشنهادی بر اساس یک سوم داده‌ها انجام شد که بیانگر صحت مدل‌های مذکور می‌باشد.

## مراجع

- [1] European Asphalt Pavement Association, "The Use of Warm Mix Asphalt", EPA position papere, 1-13, 2010.
- [2] Vaitkus, A., Ciegas, A., Laurinavicius, A., Perveneckas, Z., "Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania", The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 80-86, 2009.
- [3] You, Z., Goh, S.W., "Laboratory evaluation of warm mix asphalt: a preliminary study", International Journal of Pavement Research and Technology, 34-

- R. Christopher Williams, Andrea Kvasnak, "Investigation of warm mix asphalt performance using the mechanistic empirical pavement design guide", Proceedings of the 2009 mid continent transportation research symposium, 2009.
- [25] Iran Highway Asphalt Paving Code(2011).(in Persian)
- [26] Graham C. Hurley, Brian D. Prowell, "Evaluation of aspha-min zeolite for use in warm mix asphalt", NCAT report 05-04, 2005.
- [27] Graham C. Hurley, Brian D. Prowell, "Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt", NCAT report 05-06, 2005.
- [28] Fakhri, M., Vanaei, V., Rahi, M., "Rheological evaluation of the effect of liquid nanomaterials on the properties and performance of bitumen". In: Proceedings 8th National Congress of Civil Engineering, 7-8 May, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, 1-7, 2014. (in Persian)
- [29] Seraji M., "Investigation of the effect of polymer on the phenomenon of grooving in asphalts with Aggregate ossification and hot asphalt", A thesis presented for the Master of Science degree the University of Tehran, 2013. )in Persian)
- [30] Almudaiheem J.A, Al-sugair F.H, "Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials", Construction and building materials, 30-40, 2008.
- [31] National cooperative highway research program, "Compatibility of a test for moisture induced damage with superpave volumetric mix design", NCHRP report 444, Transportation research board, National academic press Washington DC, 2000.
- [32] Martin McCann, Peter E. Sebaaly, "Resilient modulus, tensile strength and simple shear test to evaluate moisture sensitivity and the performance of lime in hot mix asphalt mixtures", Transportation research board, Annual meeting, 9-16, 2003.
- M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B., "Warm-Mix Asphalt: European Practice", Report No. FHWA-PL-08-007. American Trade Initiatives, Alexandria, USA, 2008.
- [15] Hicks G, Santucci L, Aschenbrener T, "Moisture sensitivity of asphalt pavements", California Washington DC, Transportarion research board, 2003.
- [16] Kandhal P.S., "Moisture susceptibility of HMA mixes: identification of problem and recommended solutions", National asphalt pavement association NCAT report 92-01, 1992.
- [17] Copeland A.R, "Influence of moisture on bond strength of asphalt aggregate systems", Vanderbilt University, Tennessee, 2007.
- [18] Solaimanian M, Harvey J, Tahmoressi M, Tandon V, "Test methods to predict moisture sensitivity of hot mix asphalt pavements ", Transportarion research board national seminar, California, 2003.
- [19] Sebaaly P.E, "Comparison of lime and liquid additives on the moisture damage of hot mix asphalt mixtures", National lime association, Virginia, 2007.
- [20] Subrata K.D, "Evaluation of asphalt aggregate bond and stripping potential", A thesis in civil engineering, texas tech university, Texas, USA, 2004.
- [21] G.H. Hamed, F.M. Nejad, K. Oveisi, "Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxid", Mater. Struct., 49 (4) (2015), pp. 1165-1174.
- [22] Azarhoosh, A., Moghaddas Nejad, F., & Khodaii, A. (2016, September). Evaluation of the effect of nanoTiO2 on the adhesion between aggregate and asphalt binder in hot mix asphalt. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 8189, 1-16.
- [23] G.H. Hamed, Nejad F. Moghddas, "Use of aggregate nanocoating to decrease moisture damage of hot mix asphalt", Pavement Des., 17 (1) (2015), pp. 32-51.
- [24] Ashley buss, Mohamed Rashwan, Tamer Breakah.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Fakhri, E. Shahebrahimi, M. Khodadadi, Evaluation of the Effect of Zycotherm on Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt Containing Crumb Rubber, Amirkabir J. Civil Eng., 52(3) (2020) 641-654.

DOI: 10.22060/ceej.2019.14814.5749

