



## Technical and Economical Evaluation of Cold Recycled Asphalt Using Emulsified Asphalt Binder through Response Surface Method

B. Golchin<sup>1\*</sup>, B. Nouri<sup>2</sup>, R. Meshkabi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, East Azerbaijan, Iran

<sup>3</sup>Department of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

**ABSTRACT:** One of the common recycling methods of asphalt is the reuse of crushed asphalt with cement as a reinforcement of the base layer and its replacement in pavement layers. In this research, cold recycling of asphalt using emulsified asphalt binder has been investigated through the response surface method. In this regard, the technical and economic aspects of 15 fabricated samples of recycled cold asphalt mixtures using crushed asphalt materials, cationic emulsified binder and Portland cement (type II) were investigated. Marshall strength and flow, real specific weight and air void percentage of the mixture were determined by experiments. By performing an analysis of variance on the proposed models and determining the effective parameters, mathematical equations between independent and dependent parameters were developed and the effect of the parameters was investigated. Finally, an optimum mix design, which has 60% desirability, was suggested for cold asphalt recycling.

### Review History:

Received: Aug. 14, 2021

Revised: Oct. 04, 2021

Accepted: Nov. 02, 2021

Available Online: Nov. 06, 2021

### Keywords:

Cold recycled asphalt

Crushed asphalt

Response surface method

Design Expert software

### 1- Introduction

The cold recycling of asphalt using crushed asphalt has long been common. The main purpose of asphalt recycling is to reuse materials to repair and improve the pavement. Today, due to economic savings, preservation of natural resources, elimination of previous damages, reduction of destructive effects on the environment, speed of work, etc., the tendency towards asphalt recycling has increased. One common method of recycling is to reuse crushed asphalt with binders as cold recycling. Another method is to use these materials, along with cement as a reinforcement of the base layer and its replacement in pavement layers.

So far, limited aspects of the mixing design of recycled cold asphalt mixtures have been presented. The purpose of this study is to investigate the technical characteristics of cold asphalt mixtures by response surface method and their economic evaluation. In practical studies in the field of civil engineering, the response surface method has been used dramatically. In the field of concrete technology, Murali et al. [1], Ray et al. [2] and Habibi et al. [3], in the field of soil mechanics Yuan et al. [4] and Tsang et al. [5], in the field of

environmental engineering, Deng and Chen [6], and in asphalt technology, Hamzah et al. [7] and Abdullah et al. [8] were among the people who used the response surface method in the design and analysis of their experimental works.

### 2- Materials and methods

In this study, Design Expert software and response surface method were used to investigate the technical and economical behavior of cold recycled asphalt mixtures. The response surface method is a set of statistical techniques and applied mathematics for developing experimental models. The goal of this method is to optimize the response (output variable), which is affected by several independent variables (input variables). In this study, independent variables, including emulsified binder, cement and water, were defined. The minimum and maximum levels for these parameters are presented in Table 1. Dependent variables include real specific weight, air void percentage, Marshall strength and flow, and cost of preparing recycled cold asphalt mix. Table 2 shows the research experiment design.

\*Corresponding author's email: b.golchin@uma.ac.ir

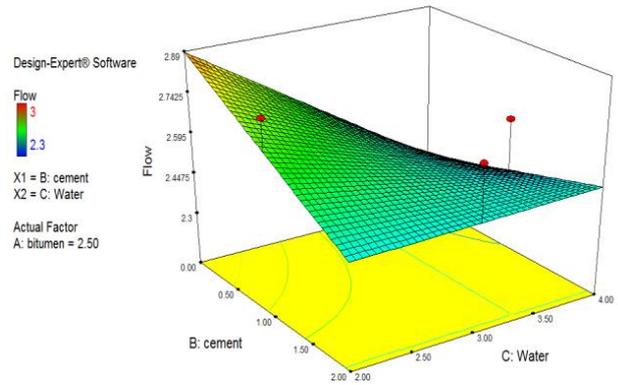


**Table 1. Input variables and their values**

Variable	Minimum value	Maximum value
Emulsified binder (%)	1	4
Cement (%)	0	2
Water (%)	2	4

**Table 2. Designed experiments through the response surface method**

Experiment	Emulsified binder (%)	Cement (%)	Water (%)
1	4	2	4
2	2.5	1	3
3	1	2	4
4	4	2	2
5	2.5	2	3
6	4	0	2
7	1	0	4
8	2.5	1	2
9	4	0	4
10	4	1	3
11	2.5	0	3
12	1	2	2
13	2.5	1	3
14	2.5	1	4
15	1	1	3
16	1	0	2
17	2.5	1	3



**Fig. 2. Three-dimensional Marshall flow model between water and cement**

**3- Results and discussion**

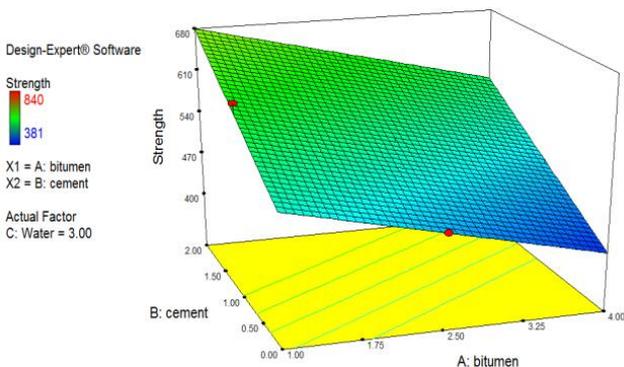
Figure 1 shows a three-dimensional graphical model of the relationship between the independent variables and the dependent variable for Marshall strength. As it is seen, with increasing the amount of cement from 0 to 2%, the Marshall strength increases with more slope, while with increasing the amount of binder from 1 to 4%, the strength decreases with a slight slope.

Figure 2 shows a three-dimensional graphical model of the relationship between independent variables and dependent variables for Marshall flow. As shown in the figure, by increasing the amount of cement from 0 to 2%, the Marshall flow decreases with a greater slope. Increasing the amount of water in 2% cement has no effect on Marshall flow. Such diagrams can be provided for other dependent variables of the research.

In order to obtain the optimal values of binder, cement and water, optimization was performed according to the criteria of publication No. 339. The allowable percentage of air void for cold recycled asphalt mixture is 9 to 14 (such as 11.5) percent recommended. Optimization was performed for maximum real specific weight, maximum Marshall strength and minimum cost. Marshall flow was considered to be 2 to 3 mm. In optimization, the desirability value for the optimal mixing design is 60%, which is shown in Table 3. Figure 3 shows the desirability diagram for the amounts of cement and binder.

**4- Conclusions**

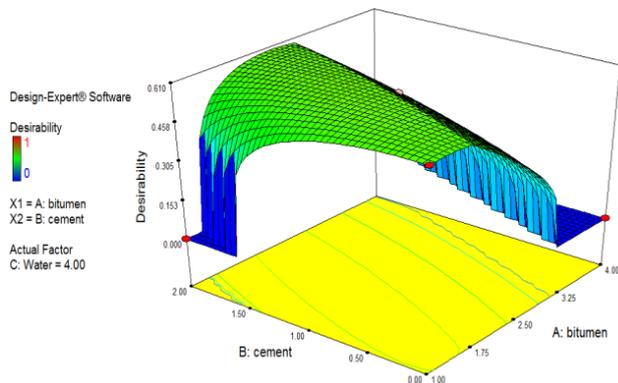
In this study, by analysis of variance, a linear model was presented to predict the amount of Marshall strength, air void percentage, real specific weight and construction cost between independent and dependent variables. In Marshall flow Prediction, the proposed model is a two-factor model. Marshall strength increases with increasing the amount of binder and cement. As the amount of cement increases, the



**Fig. 1. Three-dimensional model of Marshall strength between cement and binder**

**Table 3. Optimal values of binder, cement and water and the results obtained from these values**

Binder (%)	Cement (%)	Water (%)	Strength (Pa)	Flow (mm)	Air void (%)	Reald weight specific	Cost (Tomans)
2	1.16	4	573.2	2.42	11.94	2.12	53202.5

**Fig. 3. Desirability diagram for cement and binder for the proposed mixing design**

real specific weight decreases with a very small slope. In this study, the amount of binder, cement and water were defined as 2, 1.16 and 4, respectively, for the available materials and based on the response surface methodology.

## References

- [1] M. Murali, B.S. Mohammed, I. Abdulkadir, M. Liew, W.S. Alaloul, Utilization of Crumb Rubber and High-Volume Fly Ash in Concrete for Environmental Sustainability: RSM-Based Modeling and Optimization, *Materials*, 14(12) (2021) 3322.
- [2] S. Ray, M. Haque, T. Ahmed, T.T. Nahin, Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, (2021).
- [3] A. Habibi, A.M. Ramezani-pour, M. Mahdikhani, O. Bamshad, RSM-based evaluation of mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete containing GGBFS and silica fume, *Construction and Building Materials*, 270 (2021) 121431.
- [4] L. Yuan, L. Li, T. Zhang, L. Chen, J. Zhao, W. Liu, L. Cheng, S. Hu, L. Yang, M. Wen, Improving soil moisture estimation by identification of NDVI thresholds optimization: An application to the Chinese Loess Plateau, *Remote Sensing*, 13(4) (2021) 589.
- [5] H.H. Tsang, D.P. Tran, W.Y. Hung, K. Pitilakis, E.F. Gad, Performance of geotechnical seismic isolation system using rubber-soil mixtures in centrifuge testing, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(5) (2021) 1271-1289.
- [6] S. Deng, Y. Chen, A study by response surface methodology (RSM) on optimization of phosphorus adsorption with nano spherical calcium carbonate derived from waste, *Water Science and Technology*, 79(1) (2019) 188-197.
- [7] M.O. Hamzah, B. Golchin, D. Woodward, A quick approach for rheological evaluation of warm asphalt binders using response surface method, *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(4) (2017) 475-486.
- [8] N.H. Abdullah, M.O. Hamzah, B. Golchin, M.R.M. Hasan, An alternative protocol to artificially simulate short-term ageing of binders for selected regional condition, *Construction and Building Materials*, 161 (2018) 654-664.

## HOW TO CITE THIS ARTICLE

B. Golchin, B. Nouri, R. Meshkabadi, *Technical and Economical Evaluation of Cold Recycled Asphalt Using Emulsified Asphalt Binder through Response Surface Method and Developing an Optimized Mix Design*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(6) (2022) 429-432.

DOI: 10.22060/ceej.2021.20403.7413







## بررسی فنی و اقتصادی بازیافت سرد آسفالت با قیر امولسیون با روش سطح پاسخ

بابک گلچین<sup>۱\*</sup>، بهمن نوری<sup>۲</sup>، رامین مشک آبادی<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
۲- گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران  
۳- دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵

### کلمات کلیدی:

بازیافت سرد آسفالت  
مصالح خرده آسفالتی  
طرح اختلاط  
روش سطح پاسخ  
Design Expert

**خلاصه:** یکی از روش‌های رایج بازیافت، استفاده مجدد از خرده آسفالت همراه با سیمان برای تقویت لایه اساس و جایگزین آن در لایه‌های روسازی می‌باشد که انتخاب طرح اختلاط مناسب ضمن بالا بردن کیفیت لایه روسازی، در کاهش هزینه‌های اجرایی بسیار تأثیرگذار است. در این تحقیق بازیافت سرد آسفالت با قیر امولسیون با استفاده از روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، به روش سطح پاسخ و ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالت سرد بازیافتی با استفاده از مصالح خرده آسفالتی، قیر امولسیون کاتیونیک دیر شکن و سیمان پرتلند نوع II به بررسی مشخصات آزمایشگاهی و اقتصادی این مخلوط‌ها پرداخته شد. استقامت و روانی مارشال، وزن مخصوص حقیقی و درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی با انجام آزمایش‌ها تعیین شد. با انجام تحلیل واریانس بر روی مدل‌های پیشنهادی و تعیین پارامترهای مؤثر، معادلات ریاضی بین پارامترهای مستقل و وابسته ارائه گردید و تأثیر پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با انجام بهینه‌سازی طرح اختلاط مناسبی که دارای مطلوبیت ۶۰ درصد می‌باشد برای بازیافت سرد آسفالت پیشنهاد گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مقدار سیمان و قیر امولسیون اثر معناداری بر استقامت مارشال دارد. برای مخلوط آسفالت سرد حاوی ۴ درصد قیر، افزایش سیمان از مقدار صفر به ۲ درصد، استقامت مارشال را ۱۵/۴ درصد افزایش می‌دهد. همچنین در رفتار روانی مارشال، مقدار آب اثر معنادار ایجاد می‌کند. در مخلوط آسفالت سرد ساخته شده با ۴ درصد قیر و بدون سیمان، کاهش آب از مقدار ۴ به ۲ درصد، روانی مارشال را ۲۰/۸ درصد تغییر می‌دهد.

در تولید بتن نیز مورد استفاده قرار گرفته و مطالعات آزمایشگاهی بر روی

آن‌ها صورت می‌گیرد [۵ و ۴].

یکی از روش‌های رایج بازیافت، استفاده دوباره از خرده آسفالت همراه با کف قیر به عنوان یک روش برای بازیافت سرد است که امروزه با توجه به قیمت قیر، این روش صرفه اقتصادی کمی دارد. روش دیگر به کار بردن این مصالح، همراه با سیمان برای تقویت لایه اساس و جایگزینی آن در لایه‌های روسازی‌ها می‌باشد که انتخاب طرح مناسب موجب بالا بردن کیفیت ساخت لایه روسازی و کاهش هزینه‌های اجرایی می‌گردد. یکی از معیارهای مهم در طرح این مخلوط‌ها، انتخاب دانه‌بندی مناسب برای اختلاط با سیمان و به دست آوردن مقاومت مورد نظر است [۶]. افزودن سیمان باعث افزایش مقاومت، کاهش تغییر شکل ماندگار، افزایش دوام در برابر عریان شدن و کاهش حساسیت حرارتی می‌شود. اما افزایش مقاومت خود باعث کاهش انعطاف‌پذیری مخلوط شده و می‌تواند تأثیر مفید سیمان بر عمر خستگی مخلوط‌ها را تحت تأثیر قرار دهد [۷].

### ۱- مقدمه

امروزه از مصالح دورریز با رویکرد زیست‌محیطی در ساخت و طراحی پروژه‌های عمرانی استفاده می‌گردد. خرده آسفالت تولید شده در مراحل ترمیم روسازی‌های انعطاف‌پذیر یکی از چنین مصالحی است که مجدداً در ساخت رویه‌های آسفالتی به کار گرفته می‌شود. استفاده از این ماده، دارای مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی زیادی است [۱]. در فرآیند بازیافت، مقادیری از مصالح سنگی قدیمی موجود در لایه‌های آسفالتی استفاده می‌شود که این امر موجب حفظ میلیون‌ها تن مصالح می‌گردد. این در حالی است که برای تولید مصالح بازیافتی به مصرف انرژی کمتری نسبت به حالت معمولی نیاز است [۲]. امروزه به دلیل صرفه‌جویی‌های اقتصادی، حفظ منابع طبیعی، بهبود کیفیت راه، حذف خرابی‌های قبلی و ترک‌های موجود، کاهش اثرات مخرب بر محیط‌زیست، سرعت اجرای کار و ... تمایل به سمت بازیافت آسفالت افزایش یافته است [۳]. مصالح دورریز علاوه بر مخلوط‌های آسفالتی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: b.golchin@uma.ac.ir



(RSM) یک مجموعه از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی بر اساس ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در طرح‌های رویه پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) می‌باشد [۱۵]. در مطالعات آزمایشگاهی در رشته مهندسی عمران، روش سطح پاسخ به صورت چشم‌گیری مورد استفاده قرار گرفته است. در رشته تکنولوژی بتن مورالی و همکاران [۱۶]، رای و همکاران [۱۷] و حبیبی و همکاران [۱۸]، در رشته مکانیک خاک یوان و همکاران [۱۹] و تسانگ و همکاران [۲۰]، در زمینه مهندسی محیط‌زیست دنگ و چن [۲۱] و سوکویت و همکاران [۲۲] و در تکنولوژی آسفالت همزه و همکاران [۲۳] و عبدا... و همکاران [۲۴] از جمله افرادی بودند که از روش سطح پاسخ در طراحی و تحلیل‌های آزمایشگاهی خود استفاده کردند.

هدف از این تحقیق تعیین ترکیب بهینه متغیرهای مستقل در طرح اختلاط به روش سطح پاسخ است. این متغیرها، قیر امولسیون، سیمان و آب می‌باشد. متغیرهای وابسته شامل وزن مخصوص حقیقی، درصد فضای خالی، استقامت مارشال، روانی مارشال و هزینه تهیه مخلوط آسفالت سرد بازیافتی تعریف شد. پس از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های مارشال، این نمونه‌ها تحت آزمایش‌های مختلفی چون استقامت و روانی مارشال، وزن مخصوص حقیقی، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی قرار می‌گیرد. پس از به دست آوردن نتایج آزمایش‌های مربوطه، مقادیر بهینه قیر امولسیونی، سیمان و آب تعیین می‌گردد.

## ۲- مواد و روش‌ها

تمام آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در سال ۱۳۹۶ مطابق با الزامات مشخصات فنی اجرائی بازیافت سرد آسفالت (نشریه ۳۳۹) است و تمام موارد و ارزیابی‌های مرتبط با بازیافت سرد آسفالت بررسی شده است [۱۴]. همچنین تمام این آزمایش‌ها در یکی از آزمایشگاه‌های مکانیک خاک استان اردبیل انجام شده است.

### ۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

مواد و مصالح مصرفی جهت بازیافت سرد آسفالت شامل مصالح خرده آسفالتی حاصل از تراش رویه آسفالت کیلومتر ۳۵ محور اهر-مشگین شهر، قیر امولسیونی کاتیونی دیر شکن (CSS1)، سیمان و آب می‌باشد. قیر امولسیونی از کارخانه آذر دوام یول (آدیکو) واقع در جاده تبریز-صوفیان که تولید کننده قیرهای امولسیونی و سایر قیرها است، تهیه گردید. مشخصات

گودرزی و قنبری به ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی بازیافت روسازی‌های آسفالتی به روش سرد با کف قیر و مقایسه آن با روش‌های سنتی بهسازی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که بازیافت سرد را می‌توان به عنوان جایگزین مناسبی برای بهسازی بسیاری از راه‌های کشور استفاده نمود [۸]. میرشکاری و همکاران حساسیت رطوبتی و مشخصات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سیمان و میکرو آهک را در حضور کف قیر به عنوان یک روش بازیافت سرد، بررسی کردند و نشان دادند که بازیافت سرد آسفالت با استفاده از کف قیر می‌تواند رفتار قابل قبولی را برای مصالح سنگی و قیری روسازی موجود فراهم نماید [۹]. وامق و همکاران نشان دادند که استفاده از سرباره مس موجب بهبود تغییر شکل دائم، مدول برجهندگی و مقاومت مارشال مخلوط آسفالت سرد بازیافت شده می‌گردد [۱۰]. یوسف دوست و همکاران درصد قیر در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالت بازیافتی با کف قیر را بهینه‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند که به طور کلی بالاترین استقامت مارشال و مدول برجهندگی در قیر ۲ درصد است. همچنین مدول برجهندگی نسبت به استقامت مارشال حساسیت بیشتری به میزان قیر از خود نشان داد [۱۱].

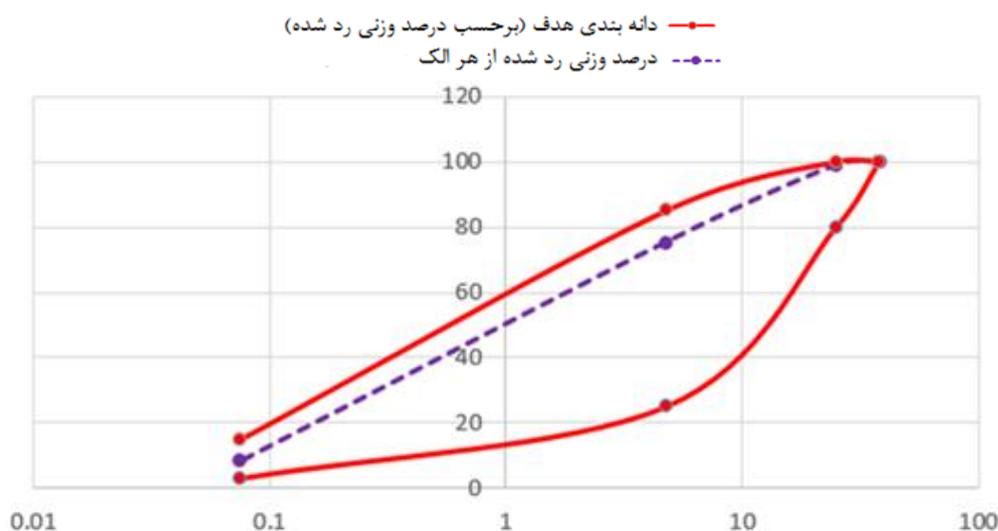
مدرس با بررسی تأثیر نوع سیمان بر خصوصیات رفتاری مخلوط آسفالت بازیافت شده با قیر امولسیونی نشان داد که عمر خستگی نمونه‌های حاوی سیمان پوزولانی در کرنش‌های پایین‌تر از حد مرزی، بیشتر از نمونه‌های سیمان نوع ۱ است. در مقابل در کرنش‌های بالا، نمونه‌های سیمان نوع یک عمر خستگی بالاتری دارد [۷]. دیباج و کاووسی با ارائه روش مارشال اصلاح شده برای طرح اختلاط و بهینه‌سازی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی با قیر امولسیونی نشان دادند که روش مارشال اصلاح شده، درصد قیر امولسیونی بهینه بیشتری ارائه می‌دهد، در حالی که خصوصیات مخلوط در درصد قیر امولسیون بهینه به روش پیشنهادی تا اندازه قابل توجهی از مخلوط‌های مشابه طراحی شده به روش مارشال اصلاح شده، بهتر است [۱۲].

تا به حال جنبه‌های محدودی از طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالت بازیافت شده به روش سرد ارائه شده است [۱۳]. هدف این تحقیق بررسی آزمایشگاهی مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالتی سرد به روش سطح پاسخ و ارزیابی اقتصادی بازیافت سرد آسفالت می‌باشد. در این تحقیق برای بررسی بازیافت سرد آسفالت با قیر امولسیونی و بررسی فنی و اقتصادی آن از طرح اختلاط بازیافت سرد آسفالت در نرم‌افزار Design Expert، با استفاده از روش سطح پاسخ و طرح ترکیب مرکزی و با توجه به مشخصات فنی اجرائی بازیافت سرد آسفالت (نشریه ۳۳۹) استفاده شده است [۱۴]. روش سطح پاسخ

جدول ۱. مشخصات فنی قیر امولسیون مصرفی

Table 1. Technical specifications of emulsified asphalt binder

مقدار	استاندارد	مشخصه
۴۵	ASTM D244	کندروانی سی بولت-فیورل (ثانیه)
۰/۷	ASTM D244	نشست ۵ روزه (درصد)
۰/۴	ASTM D244	اختلاط با سیمان (درصد)
خوب	ASTM C127, 128	قابلیت اندود مصالح سنگی
مثبت	ASTM D244	بار ذره‌ای دانه‌های قیر
۵۷	-	مقدار قیر خالص (درصد)
۳۷	-	مقدار آب (درصد)
۱/۵	-	مقدار امولسیون ساز (درصد)
۴	-	حلال نفت (درصد)
۰/۵	-	اسید کلریدریک (درصد)



شکل ۱. دانه‌بندی برای مصالح خرده آسفالتی فاقد پوشش قیر

Fig. 1. Granulation of the crushed asphalt without binder coatings

در برابر سولفات سدیم به ترتیب برابر ۷۷، ۲۰ و ۸ درصد تعیین شد. شکل ۱ دانه‌بندی مصالح سنگی جدا شده از قیر را نشان می‌دهد. در این تحقیق در تهیه نمونه‌های مارشال از مصالح سنگی جدید به دلیل قرار گرفتن دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی در محدوده دانه‌بندی هدف استفاده نشد. در این تحقیق برای طرح اختلاط بازیافت سرد آسفالت در نرم‌افزار Design Expert، از روش سطح پاسخ و طرح ترکیب مرکزی استفاده

فنی قیر امولسیون به کار رفته در جدول شماره ۱ ارائه شده است. در نمونه‌گیری از مصالح خرده آسفالتی، مقدار قیر موجود با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ ۴/۲۲ درصد به دست آمد. میزان درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر جدا شده از خرده آسفالت، در آزمایش درجه نفوذ برابر ۳۱ دهم میلی‌متر و ۷۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. ارزش ماسه‌ای مصالح سنگی جدا شده از قیر، درصد سائیدگی این مصالح در آزمایش لس‌آنجلس و درصد افت وزنی آن‌ها

جدول ۲. متغیرهای مستقل و مقدار مجاز آن ها مطابق با نشریه ۳۳۹

Table 2. Independent variables and their allowable values according to the publication No. 339

متغیر	حداقل	حداکثر
قیر امولسیون (برحسب درصد وزنی)	۱	۴
سیمان (برحسب درصد وزنی)	۰	۲
آب (برحسب درصد وزنی)	۲	۴

شکل ۲ نحوه تهیه نمونه‌های مارشال را نشان می‌دهد.

۲-۲- آزمایش‌های صورت گرفته

در طرح اختلاط آسفالت به روش مارشال، وزن مخصوص حقیقی آسفالت یکی از پارامترهایی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق تعریف این پارامتر عبارت است از نسبت وزن آسفالت مورد آزمایش در هوا به حجم واقعی آن. استقامت مارشال پارامتر دیگری است که در طرح اختلاط استفاده می‌شود. استقامت مارشال، در واقع شاخصی از مقاومت فشاری مخلوط آسفالتی است. دستگاه اندازه‌گیری استقامت مارشال، مقدار روانی را نیز ارائه می‌کند. فضای خالی آسفالت، در یک نمونه متراکم شده به حباب‌های هوای درون نمونه گفته می‌شود که به صورت درصد حجمی نسبت به حجم نمونه کوبیده شده بیان می‌گردد.

۲-۳- ارزیابی اقتصادی

یکی از مهم‌ترین عوامل انتخاب یک گزینه به عنوان گزینه تعمیر و نگهداری راه، تحلیل اقتصادی هزینه‌های است که بایستی مورد توجه طراحان راه قرار گیرد [۳]. هدف از ارزیابی اقتصادی در این تحقیق، برآورد هزینه تولید مخلوط سرد آسفالت بازیافتی با قیر امولسیون است. با توجه به اینکه تحقیق حاضر فقط آزمایشگاهی است و مطالعات موردی و بررسی‌های میدانی در ارتباط با اجرای بازیافت انجام شده صورت نگرفته است، بنابراین از ارزیابی هزینه‌های اجرایی بازیافت سرد آسفالت صرف نظر شده و هزینه تهیه مصالح ۱ تن مخلوط آسفالت سرد بازیافتی بررسی می‌شود. برآورد هزینه شامل هزینه تراش آسفالت، هزینه تهیه فیلر از سیمان، قیمت قیر امولسیون کاتیونیک دیر شکن و آب بهای صنعتی است. جدول ۴ هزینه تهیه این

می‌شود. در روش طرح ترکیب مرکزی فاکتورهایی به عنوان متغیرهای مستقل به نرم‌افزار وارد می‌شود که شامل مقادیر قیر امولسیون، سیمان و آب هست. مقادیر حداقل و حداکثر قیر امولسیون، سیمان و آب با توجه به توصیه مشخصات فنی اجرائی بازیافت سرد آسفالت (نشریه ۳۳۹) و بررسی پارامترهای مذکور در مقالات مختلف در زمینه بازیافت سرد آسفالت [۱۲-۷] مطابق جدول ۲ انتخاب شده است. طبق این دستورالعمل، حداقل و حداکثر مقدار قیر امولسیون در مخلوط آسفالت سرد بازیافتی ۱ و ۲ درصد است.

متغیرهای وابسته در این تحقیق شامل وزن مخصوص حقیقی، درصد فضای خالی، استقامت و روانی مارشال و هزینه تهیه مخلوط آسفالت سرد بازیافتی هستند. متغیرهای حجمی و مقاومتی بر اساس پارامترهای مطرح شده در نشریه شماره ۳۳۹ به کار گرفته شد. برای تحلیل‌های اقتصادی نیز متغیر هزینه به عنوان یک متغیر وابسته دیگر به این مجموعه اضافه گردید. مقدار هزینه‌ها بر اساس سال انجام تحقیق محاسبه شد. این متغیرها نتایج آزمایش‌های بازیافت سرد آسفالت می‌باشد که به عنوان متغیرهای وابسته به نرم‌افزار وارد می‌شود. با توجه به تعداد متغیرهای مستقل و وابسته و تعداد نقاط مرکزی وارده، ۱۷ مرحله آزمایش طراحی می‌گردد که ۲ مرحله تکرار در مراحل آزمایش به خاطر انتخاب ۳ نقطه مرکزی است. بنابراین ۱۵ مرحله آزمایش با مقادیر مختلف درصد قیر امولسیون، درصد سیمان و درصد آب انجام می‌گردد. جدول ۳ طرح اختلاط بازیافت سرد آسفالت به روش سطح پاسخ را نشان می‌دهد.

آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶/۲۵ سانتی‌متر انجام می‌شود. عمل تراکم نمونه آسفالت ساخته شده با چکش ۴/۵ کیلوگرمی و با ارتفاع سقوط ۴۵ سانتی‌متر صورت می‌پذیرد. تعداد ضربات نیز بسته به میزان ترافیک طرح مسیر مورد نظر متفاوت است.

جدول ۳. طرح اختلاط بازیافت سرد آسفالت به روش سطح پاسخ

Table 3. The mixing design for recycling cold asphalt by response surface method

آب (درصد)	سیمان (درصد)	قیر امولسیون (درصد)	آزمایش
۴	۲	۴	۱
۳	۱	۲/۵	۲
۴	۲	۱	۳
۲	۲	۴	۴
۳	۲	۲/۵	۵
۲	۰	۴	۶
۴	۰	۱	۷
۲	۱	۲/۵	۸
۴	۰	۴	۹
۳	۱	۴	۱۰
۳	۰	۲/۵	۱۱
۲	۲	۱	۱۲
۳	۱	۲/۵	۱۳
۴	۱	۲/۵	۱۴
۳	۱	۱	۱۵
۲	۰	۱	۱۶
۳	۱	۲/۵	۱۷

جدول ۴. هزینه تهیه مصالح مورد نیاز برای مخلوط آسفالت بازیافتی با قیر امولسیونی به ازای ۱ کیلوگرم

Table 4. The cost of required materials for the recycled asphalt mixture with emulsified binder per 1 kg

تراش آسفالت	قیر امولسیونی کاتیونیک دیر شکن	آب صنعتی	تهیه فیلر از سیمان
۱۳/۵۶ تومان	۱۵۸۵ تومان	۰/۵۷۶ تومان	۱۱۶ تومان



شکل ۲. نحوه تهیه نمونه های مارشال

Fig. 2. Preparing the Marshall samples

تعیین پیش‌بینی شده) برای مدل‌های Linear (خطی)، دو فاکتوری (2FI)، درجه دو (Quadratic) و درجه سه (Qubic) است. با توجه به این مقادیر معادله‌ای برای استقامت مارشال پیشنهاد شده است که یک معادله خطی است.

جدول ۷ تحلیل واریانس مدل خطی سطح پاسخ برای استقامت مارشال را نشان می‌دهد. آنچه در تحلیل واریانس مهم است معنی‌دار بودن مدل پیشنهادی است، در صورتی که مدل معنی‌دار نباشد عملاً قابل استفاده نخواهد بود. همانطور که مشاهده می‌گردد مدل پیشنهادی معنی‌دار است. از سوی دیگر پارامترهای Lack of fit (داده‌های پرت) و همچنین مدل انتخابی معنی‌دار هستند به طوری که احتمال معنی‌دار نبودن مدل انتخابی ۲/۲۴ درصد است که احتمال خیلی پایینی است. پارامتر مؤثر بعدی P-value است. در صورتی که P-value برای مدل انتخابی و متغیرهای مستقل کوچک‌تر از ۰/۰۵ باشد نشان دهنده معنی‌دار بودن مدل انتخابی در سطح اطمینان ۹۵ درصد است، همچنین در صورتی که P-value بزرگ‌تر

مصالح به ازای یک کیلوگرم را نشان می‌دهد.

### ۳- نتایج و بحث

در جدول ۵ نتایج آزمایش‌های انجام شده، نشان داده شده است. برای این داده‌ها، آزمون همبستگی با استفاده از نرم‌افزار SPSS صورت گرفت. نتایج آزمون همبستگی بیان می‌کند که میزان همبستگی بین متغیرهای مستقل برابر صفر است. این بدان معناست که انتخاب این پارامترها به عنوان متغیر مستقل انتخاب درستی بوده است. همچنین همبستگی بین پارامترهای وابسته نیز عدد نزدیک به صفر را گزارش می‌کند.

#### ۳-۱ نتایج پارامترهای مقاومتی

جدول ۶ نتایج آماری مدل تحلیلی برای استقامت مارشال را نشان می‌دهد که شامل مقادیر R-Squared (ضریب تعیین)، Adjusted R-Squared (ضریب تعیین مطلق) و Predicted R-Squared (ضریب

جدول ۵. طرح اختلاط بازیافت سرد آسفالت به روش سطح پاسخ

Table 5. The mixing design for recycling cold asphalt by response surface method

نمونه	قیر (درصد)	سیمان (درصد)	آب (درصد)	استقامت (پاسکال)	روانی (میلی متر)	وزن مخصوص حقیقی	فضای خالی نمونه (درصد)	هزینه (تومان)
۱	۴	۱	۳	۴۶۱	۲/۳	۲/۱۳	۹	۷۷۱۳۱/۵
۲	۲/۵	۱	۳	۴۸۹	۲/۵	۲/۰۵۶	۱۴	۵۴۴۰۱/۵
۳	۱	۲	۴	۸۴۰	۲/۶	۲/۱۰۵	۱۳/۹۳	۳۰۹۶۷/۵
۴	۴	۰	۲	۳۹۶	۲/۹	۲/۰۳۲	۱۳/۲	۷۶۴۱۷/۶
۵	۲/۵	۱	۴	۵۶۰	۲/۶	۲/۱۲۸	۱۱	۵۳۹۲۹/۸
۶	۴	۲	۲	۴۵۷	۲/۵	۲/۰۵۳	۱۲/۳	۷۸۴۶۶/۴
۷	۲/۵	۱	۲	۶۹۴	۲/۸	۲/۰۸۳	۱۲/۹	۵۴۱۸۹/۴
۸	۱	۰	۲	۵۱۸	۳	۱/۹۹۵	۱۸/۴	۲۹۱۷۸/۴
۹	۲/۵	۲	۳	۵۳۳	۲/۷	۲/۰۲۹	۱۵/۲	۵۵۰۸۴
۱۰	۱	۱	۳	۶۱۵	۲/۶	۲/۰۶۸	۱۵/۵	۳۰۰۷۳
۱۱	۱	۲	۲	۵۱۴	۲/۴	۱/۹۸۱	۱۹	۳۱۲۲۷/۳
۱۲	۴	۲	۴	۷۵۸	۲/۳	۲/۰۸۷	۱۰/۸۶	۷۸۲۶۳/۲
۱۳	۱	۰	۴	۵۴۴	۲/۳	۲/۱۷۸	۱۰/۹۵	۲۸۹۱۸/۷
۱۴	۴	۰	۴	۳۸۱	۲/۴	۲/۱۷۶	۷	۷۶۲۰۳/۱
۱۵	۲/۵	۰	۳	۴۶۱	۲/۴	۲/۱۰۲	۱۲/۲	۵۵۹۶۰/۴

جدول ۶. نتایج آماری مدل تحلیلی برای استقامت مارشال

Table 6. Statistical results of analytical model for the Marshall strength

منبع	انحراف معیار	R-Squared	Adj. R-Squared	Predicted R-squared
خطی	۹۵/۴۹	۰/۵۰۹۵	۰/۳۹۶۳	۰/۰۶۵۴
2FI	۸۲/۳۹	۰/۷۱۹۱	۰/۵۵۰۵	۰/۱۴۶۶
درجه دوم	۸۱/۳۱	۰/۸۰۸۵	۰/۵۶۲۳	-۰/۴۵۶۶
درجه سوم	۴۴/۶۴	۰/۹۷۵۳	۰/۸۶۸۰	-۳۸/۲۵۰۸

جدول ۷. تحلیل واریانس مدل خطی سطح پاسخ برای استقامت مارشال

Table 7. Analysis of variance of linear response level model for the Marshall strength

P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	متغیرها	پاسخ	
۰/۰۲۲۵	۴/۵۰	۴۱۰۴۳/۴۷	۳	۱/۲۳۱×۱۰ <sup>۵</sup>	مدل	استقامت مارشال (عادی)	
۰/۰۷۷۹	۳/۶۶	۳۳۴۰۸/۴۰	۱	۳۳۴۰۸/۴۰	قیر (A)		
۰/۰۱۹۸	۷/۰۵	۶۴۳۲۰/۴۰	۱	۶۴۳۲۰/۴۰	سیمان (B)		
۰/۱۱۹۰	۲/۷۹	۲۵۴۰۱/۶۰	۱	۲۵۴۰۱/۶۰	آب (C)		
		۹۱۱۷/۶۵	۱۳	۱/۱۸۵×۱۰ <sup>۵</sup>	باقی مانده		
		۱۰۷۷۵/۴۰	۱۱	۱/۱۸۵×۱۰ <sup>۵</sup>	عدم انطباق		
			۱۶	۲/۴۱۷×۱۰ <sup>۵</sup>	مجموع		
۰/۰۲۶۶	۴/۷۵	۴۸۸۶۴/۴۰	۲	۹۷۷۲۸/۸۰	مدل		استقامت مارشال (اصلاح شده)
۰/۰۹۳۰	۳/۲۵	۳۳۴۰۸/۴۰	۱	۳۳۴۰۸/۴۰	قیر (A)		
۰/۰۲۵۴	۶/۲۶	۶۴۳۲۰/۴۰	۱	۶۴۳۲۰/۴۰	سیمان (B)		
		۱۰۲۸۰/۷۸	۱۴	۱/۴۳۹×۱۰ <sup>۵</sup>	باقی مانده		
		۱۱۹۹۴/۲۵	۱۲	۱/۴۳۹×۱۰ <sup>۵</sup>	عدم انطباق		
			۱۶	۲/۴۱۷×۱۰ <sup>۵</sup>	مجموع		

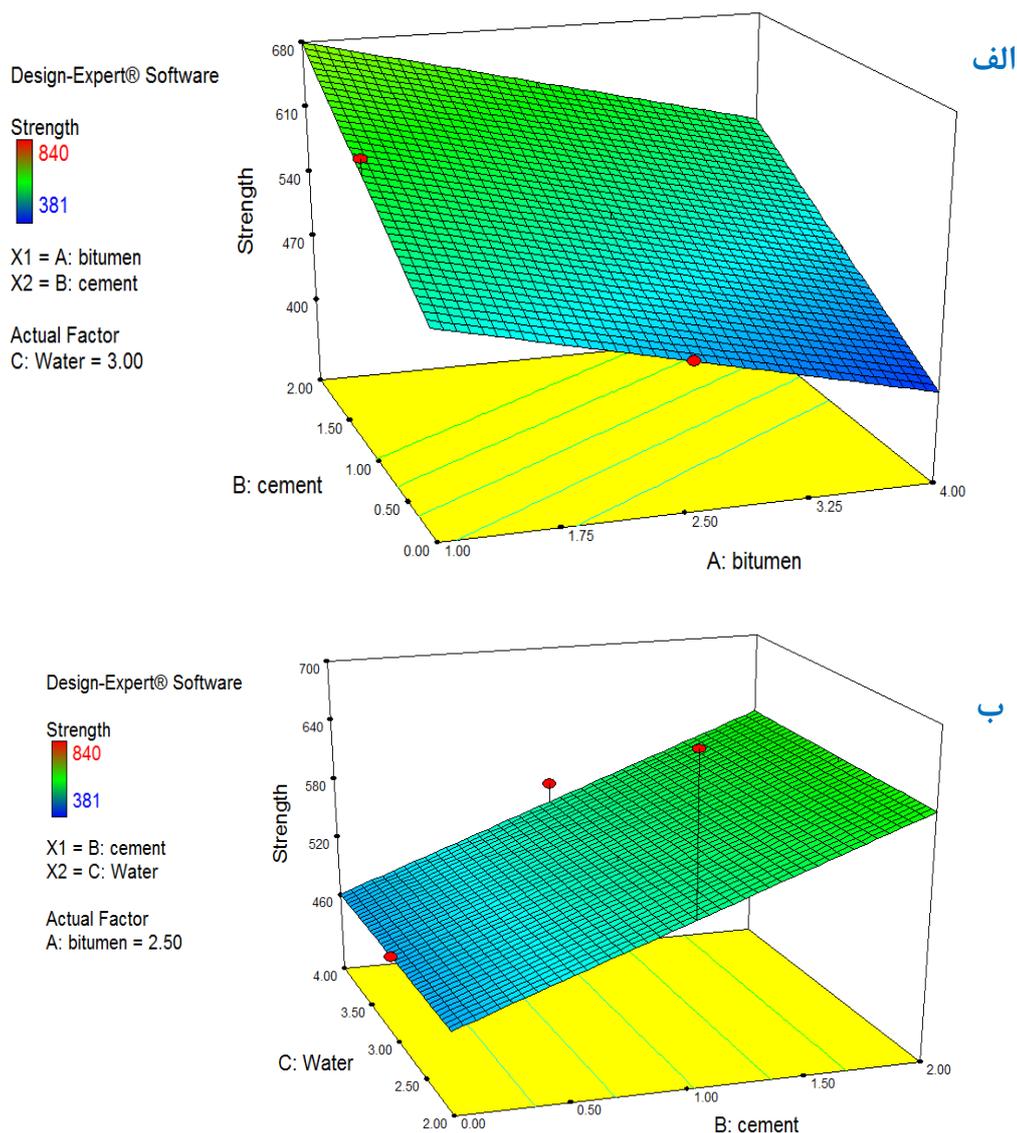
مشخص است با افزایش مقدار سیمان از ۰ به ۲ درصد استقامت مارشال با شیب بیشتری افزایش می‌یابد. سیمان یک ماده چسباننده بین مصالح سنگی است بنابراین توانسته است استقامت مارشال را در نمونه‌های آسفالت سرد افزایش دهد. شکل ۳-الف نشان می‌دهد، با افزایش مقدار قیر امولسیون‌ی از ۱ به ۴ درصد استقامت مارشال با شیب کمی کاهش می‌یابد. این بدان معناست که مقدار بیش از یک درصد قیر امولسیون‌ی برای خرده آسفالت به کار رفته در این تحقیق نمی‌تواند استقامت مارشال را بیشتر افزایش دهد. این پدیده در تحقیق دیباج و کاووسی برای افزودنی سیمان نیز مشاهده می‌شود [۱۲]. چرا که خود خرده آسفالت نیز دارای ۴/۲۲ درصد قیر است و مجموع این دو قیر با هم بر روی استقامت مارشال اثر می‌گذارند. شکل ۳-الف همچنین نشان می‌دهد که استقامت مارشال مخلوط آسفالتی با قیر امولسیون‌ی ۴ درصد و سیمان ۲ درصد بیشتر از استقامت مارشال مخلوط با قیر امولسیون‌ی ۴ درصد و سیمان صفر درصد است.

تحقیقات لویس و کاینکر نشان داد که استفاده از سیمان و قیر امولسیون‌ی، استقامت مارشال را بیش از دو برابر افزایش می‌دهد [۲۵]. نیازی و جلیلی در تحقیقات خود اثبات کردند که استقامت مارشال نمونه‌ها با افزودن سیمان

از ۰/۱ باشد نشان دهنده معنی‌دار نبودن مدل پیشنهادی در سطح ۹۰ درصد است، همانطور که در جدول مشخص است P-value برای پارامتر آب بزرگ‌تر از ۰/۱ است و این پارامتر احتمال معنی‌دار نبودن در مدل پیشنهادی را افزایش می‌دهد که برای افزایش دقت مدل این پارامتر از مدل پیشنهادی حذف می‌گردد. با حذف نمودن پارامتر آب و انجام دوباره آنالیز واریانس مطابق جدول ۷ P-value برای تمام پارامترها کوچک‌تر از ۰/۱ است. پارامترهای مؤثر در مدل پیشنهادی سیمان و قیر امولسیون‌ی است. رابطه (۱) معادله ریاضی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (استقامت مارشال) را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ضرایب روابط پیشنهادی توسط نرم‌افزار محاسبه شده است و از طریق جدول تحلیل واریانس استخراج نشده است.

$$Strength = +557.25098 - 38.53333 \times bitumen + 80.20000 \times cement \quad (1)$$

شکل ۳ مدل گرافیکی سه بعدی رابطه بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته را برای استقامت مارشال نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳-الف



شکل ۳. مدل سه بعدی استقامت مارشال بین الف-سیمان و قیر امولسیون و ب-آب و سیمان

Fig. 3. Three-dimensional model of Marshall strength between (a) cement and emulsified binder and (b) water and cement

نمونه‌ها با افزودن سیمان افزایش می‌یابد اما این افزایش در مورد نمونه‌های دارای الیاف محسوس‌تر است، برای مثال با افزودن ۲ و ۳ درصد سیمان به مخلوط به ترتیب ۳۴ و ۴۹/۹ درصد استقامت مارشال نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی افزایش می‌یابد، در حالی که این افزایش برای نمونه‌های حاوی ۲ و ۳ درصد سیمان و ۰/۳ درصد الیاف پلی پروپیلین به ۳۸/۹ و ۵۲/۹ درصد می‌رسد [۲۷].

با بررسی شکل ۳-ب مشخص می‌شود افزایش مقدار آب در سیمان،

و آهک افزایش می‌یابد، اما این افزایش در مورد نمونه‌های با آهک شکفته چندان محسوس نیست. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزودن ۲ درصد آهک شکفته به مخلوط آسفالتی، استقامت مارشال نمونه‌ها ۱۱ درصد نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی افزایش می‌یابد، در حالی که این افزایش برای نمونه‌های حاوی دوغاب آهک و سیمان به ترتیب ۲۸ و ۳۵ درصد است که تأثیر سیمان در استقامت مارشال نمونه بیشتر از سایر افزودنی‌هاست [۲۶].

نتایج تحقیقات فیروزئی و همکاران نشان داد که استقامت مارشال

جدول ۸. نتایج آماری مدل تحلیلی برای روانی مارشال

Table 8. Statistical results of analytical model for the Marshall flow

منبع	انحراف معیار	R-Squared	Adj. R-Squared	Predicted R-squared
خطی	۰/۱۸	۰/۳۶۰۵	۰/۲۱۲۹	-۰/۲۹۰۶
2FI	۰/۱۶	۰/۶۳۹۰	۰/۴۲۲۳	-۰/۸۲۶۶
درجه دوم	۰/۱۶	۰/۷۳۳۹	۰/۳۹۱۷	-۲/۱۴۹۳
درجه سوم	۰/۰۵۰	۰/۹۸۸۹	۰/۹۴۰۶	-۱۶/۶۸۱۷

$$Flow = +3.46706 - 0.5 \times cement - 0.29 \times water + 0.15 \times cement \times water \quad (2)$$

شکل ۴ مدل گرافیکی سه بعدی رابطه بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته را برای روانی مارشال نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش مقدار سیمان از ۰ به ۲ درصد روانی مارشال با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. شاید دلیل این امر، کاهش شکل‌پذیری در نمونه‌های مخلوط آسفالتی به دلیل پیوندهای سیمانی بین مصالح باشد. افزایش مقدار آب در مقدار سیمان ۲ درصد تأثیری در روانی مارشال ندارد. این در حالی است که با افزایش مقدار آب در مقدار سیمان کمتر از ۲ درصد نظیر سیمان ۰ درصد و بیشتر روانی مارشال با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. همچنین در مقدار آب ۲ درصد نیز افزایش مقدار سیمان تأثیری در کاهش روانی مارشال ندارد. نتایج تحقیقات نیازی و جلیلی نشان داد که با افزودن سیمان و آهک به مخلوط، روانی مارشال کاهش می‌یابد. در واقع بالا بودن استقامت و کمتر بودن روانی در شرایط استفاده از مصالح یکسان نشان دهنده استقامت بیشتر در برابر تنش و مقاومت بیشتر در برابر تغییر شکل است [۲۶]. نتایج تحقیقات فیروزی و همکاران نشان داد که با افزودن سیمان و الیاف به مخلوط، روانی مارشال نمونه‌ها کاهش می‌یابد [۲۷].

۳-۲- نتایج پارامترهای حجمی

نتایج آماری مدل تحلیلی سطح پاسخ برای وزن مخصوص حقیقی در جدول ۱۰ نشان داده شده است که مدل خطی را برای متغیر وزن مخصوص حقیقی پیشنهاد می‌کند.

تأثیر چندانی در استقامت مارشال ندارد. نقش اصلی آب در آسفالت سرد، افزایش کارایی مخلوط از طریق خیس نمودن مصالح است [۲۸]، بنابراین دور از انتظار نیست که آب نتواند استقامت مارشال را افزایش دهد. در شکل ۳-ب با افزایش مقدار سیمان از ۰ به ۲ درصد استقامت مارشال افزایش می‌یابد. دلیل آن نقش چسبانندگی سیمان در بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی است. همچنین استقامت مارشال مخلوط با سیمان ۲ درصد و آب ۴ درصد بیشتر از استقامت مارشال مخلوط با سیمان صفر درصد و آب ۴ درصد است. مطابق نتایج آماری مدل تحلیلی سطح پاسخ برای روانی مارشال نشان داده شده در جدول ۸ معادله دو فاکتوری (2FI) برای روانی مارشال پیشنهاد شده است.

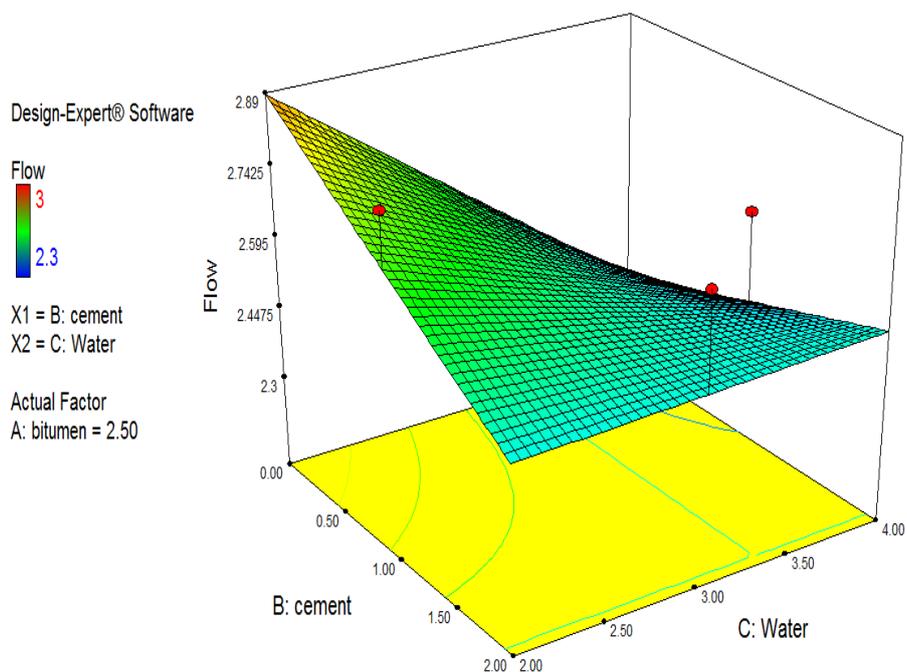
از سوی دیگر تحلیل واریانس مدل دو فاکتوری برای روانی مارشال نشان می‌دهد که بعضی پارامترهایی که P-value آن‌ها بزرگ‌تر از ۰/۱ است مدل را معنی‌دار نمی‌کنند و لازم است پارامترهای AC، AB و قیر امولسیون حذف شوند تا مدل پیشنهادی در سطح اطمینان قابل قبول معنی‌دار شود (جدول ۹).

با حذف نمودن پارامترهای ذکر شده و انجام دوباره آنالیز واریانس مطابق جدول ۹ مدل پیشنهادی معنی‌دار شد. پارامترهای مؤثر در مدل پیشنهادی شامل سیمان، آب و BC است. همچنین P-value برای مدل و پارامترهای آب و BC کوچک‌تر از ۰/۰۵ است و فقط برای پارامتر سیمان بزرگ‌تر از ۰/۱ است. با توجه به اینکه سیمان جزو پارامترهای تأثیرگذار در روانی مارشال است، در مدل پیشنهادی قابل حذف کردن نیست. رابطه (۲) معادله ریاضی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (روانی مارشال) را نشان می‌دهد.

جدول ۹. تحلیل واریانس مدل خطی سطح پاسخ برای روانی مارشال

Table 9. Analysis of variance of linear response level model for the Marshall flow

P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	متغیرها	پاسخ
۰/۰۶۳۳	۲/۹۵	۰/۰۷۳	۶	۰/۴۴	مدل	روانی مارشال (عادی)
۰/۳۳۷۵	۱/۰۱	۰/۰۲۵	۱	۰/۰۲۵	فیر (A)	
۰/۳۳۷۵	۱/۰۱	۰/۰۲۵	۱	۰/۰۲۵	سیمان (B)	
۰/۰۱۸۱	۷/۹۶	۰/۲۰	۱	۰/۲۰	آب (C)	
۰/۶۶۲۰	۰/۲۰	۰/۰۰۵	۱	۰/۰۰۵	AB	
۰/۶۶۲۰	۰/۲۰	۰/۰۰۵	۱	۰/۰۰۵	AC	
۰/۰۲۲۲	۷/۳۱	۰/۱۸	۱	۰/۱۸	BC	
		۰/۰۲۵	۱۰	۰/۲۵	باقی مانده	
		۰/۰۳۱	۸	۰/۲۵	عدم انطباق	
			۱۶	۰/۶۸	مجموع	
۰/۰۰۷۷	۶/۱۸	۰/۱۳	۳	۰/۴۰	مدل	روانی مارشال (اصلاح شده)
۰/۱۰۲۰	۱/۱۶	۰/۰۲۵	۱	۰/۰۲۵	سیمان (B)	
۰/۰۱۰۱	۹/۰۶	۰/۲۰	۱	۰/۲۰	آب (C)	
۰/۰۱۲۸	۸/۳۲	۰/۱۸	۱	۰/۱۸	BC	
		۰/۰۲۲	۱۳	۰/۲۸	باقی مانده	
		۰/۰۲۶	۱۱	۰/۲۸	عدم انطباق	
			۱۶	۰/۶۸	مجموع	



شکل ۴. مدل سه بعدی روانی مارشال بین آب و سیمان

Fig. 4. Three-dimensional model of Marshall flow between water and cement

جدول ۱۰. نتایج آماری مدل تحلیلی برای وزن مخصوص حقیقی

Table 10. Statistical results of analytical model for the specific weight

منبع	انحراف معیار	R-Squared	Adj. R-Squared	Predicted R-squared
خطی	۰/۰۳۲	۰/۷۲۲۹	۰/۶۵۸۹	۰/۴۷۷۰
2FI	۰/۰۲۸	۰/۵۱۴۵	۰/۷۴۱۸	۰/۵۱۴۵
درجه دوم	۰/۰۲۹	۰/۰۹۷۵	۰/۷۱۹۸	۰/۰۹۷۵
درجه سوم	۰/۰۲۸	-۷۲/۵۰۲۳	۰/۷۵۲۹	-۷۲/۵۰۲۳

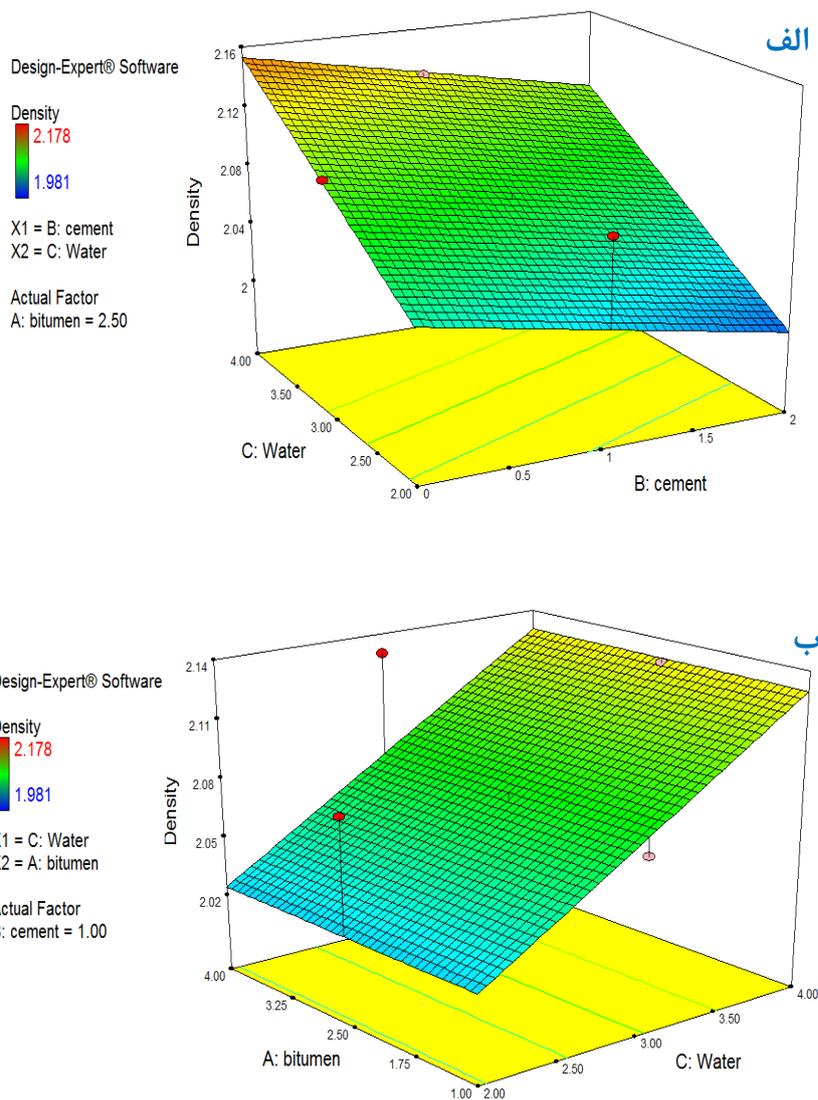
جدول ۱۱. تحلیل واریانس مدل خطی سطح پاسخ برای روانی وزن مخصوص حقیقی

Table 11. Analysis of variance of linear response level model for the specific weight

پاسخ	متغیرها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value
استقامت مارشال (عادی)	مدل	۰/۰۳۶	۳	۰/۰۱۲	۱۱/۳۰	۰/۰۰۰۶
	قیر (A)	۰/۰۰۲۲۸۰	۱	۰/۰۰۲۲۸۰	۲/۱۷	۰/۱۶۴۲
	سیمان (B)	۰/۰۰۵۱۹۸	۱	۰/۰۰۵۱۹۸	۴/۹۶	۰/۰۴۴۳
	آب (C)	۰/۰۲۸	۱	۰/۰۲۸	۲۶/۷۸	۰/۰۰۰۲
	باقی مانده	۰/۰۱۴	۱۳	۰/۰۰۱۰۴۹		
	عدم انطباق	۰/۰۱۴	۱۱	۰/۰۰۱۲۴۰		
	مجموع	۰/۰۴۹	۱۶			
استقامت مارشال (اصلاح شده)	مدل	۰/۰۳۳	۲	۰/۰۱۷	۱۴/۶۴	۰/۰۰۰۴
	سیمان (B)	۰/۰۰۵۱۹۸	۱	۰/۰۰۵۱۹۸	۴/۵۷	۰/۰۵۰۶
	آب (C)	۰/۰۲۸	۱	۰/۰۲۸	۲۴/۷۱	۰/۰۰۰۲
	باقی مانده	۰/۰۱۶	۱۴	۰/۰۰۱۱۳۷		
	عدم انطباق	۰/۰۱۶	۱۲	۰/۰۰۱۳۲۶		
مجموع	۰/۰۴۹	۱۶				

بنابراین باید این پارامتر از مدل پیشنهادی حذف گردد. مطابق جدول ۱۱ با حذف نمودن پارامتر قیر امولسیون از مدل پیشنهادی، P-value برای همه مقادیر کوچکتر از ۰/۰۵ است و مدل پیشنهادی معنی دار است. همچنین با حذف نمودن این پارامتر احتمال معنی دار نبودن مدل پیشنهادی کاهش می یابد. رابطه (۳) معادله ریاضی بین مقادیر متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (وزن مخصوص حقیقی) را

تحلیل واریانس مدل خطی سطح پاسخ برای وزن مخصوص حقیقی در جدول ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۱۱ مشخص است، مدل پیشنهادی معنی دار است و داده های پرت معنی دار نیستند و احتمال معنی دار نبودن مدل پیشنهادی ۰/۰۶ درصد است که احتمال خیلی پایینی است. مقادیر P-value برای مدل و پارامترهای سیمان و آب کوچکتر از ۰/۰۵ است. همچنین برای پارامتر قیر امولسیون بزرگتر از ۰/۱ است،



شکل ۵. مدل سه بعدی وزن مخصوص حقیقی بین الف-سیمان و آب، ب-قیر امولسیون و آب

Fig. 5. Three-dimensional model of specific weight between (a) cement and water and (b) emulsi-fied binder and water

شکل ۵-الف مشخص است با افزایش مقدار سیمان از ۰ به ۲ درصد وزن مخصوص حقیقی با شیب خیلی کم کاهش می‌یابد و افزایش مقدار سیمان تأثیر چندانی در وزن مخصوص حقیقی ندارد، اما با افزایش مقدار آب، وزن مخصوص حقیقی با شیب زیاد افزایش می‌یابد. شکل ۵-ب بیانگر این مطلب است که با افزایش مقدار آب از ۲ به ۴ درصد وزن مخصوص حقیقی با شیب بیشتری افزایش می‌یابد و افزایش قیر امولسیونی تأثیری در وزن مخصوص حقیقی ندارد.

نشان می‌دهد.

$$Flow = +3.46706 - 0.5 \times cement - 0.29 \times water + 0.15 \times cement \times water \quad (3)$$

شکل ۵ مدل گرافیکی سه بعدی رابطه بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (وزن مخصوص حقیقی) را نشان می‌دهد. همانطور که در

جدول ۱۲. نتایج آماری مدل تحلیلی برای درصد فضای خالی

Table 12. Statistical results of analytical model for the air void

	Predicted R-squared	Adj. R-Squared	R-Squared	انحراف معیار	منبع
Suggested	۰/۶۹۸۷	۰/۸۰۲۸	۰/۸۳۹۸	۱/۳۴	خطی
	۰/۷۰۱۱	۰/۸۴۶۹	۰/۹۰۴۳	۱/۱۸	2FI
	۰/۴۵۵۰	۰/۸۳۷۸	۰/۹۲۹۰	۱/۲۲	درجه دوم
Aliased	-۳۹/۱۹۳۳	۰/۸۶۴۹	۰/۹۷۴۷	۱/۱۱	درجه سوم

جدول ۱۳. تحلیل واریانس مدل خطی سطح پاسخ برای درصد فضای خالی

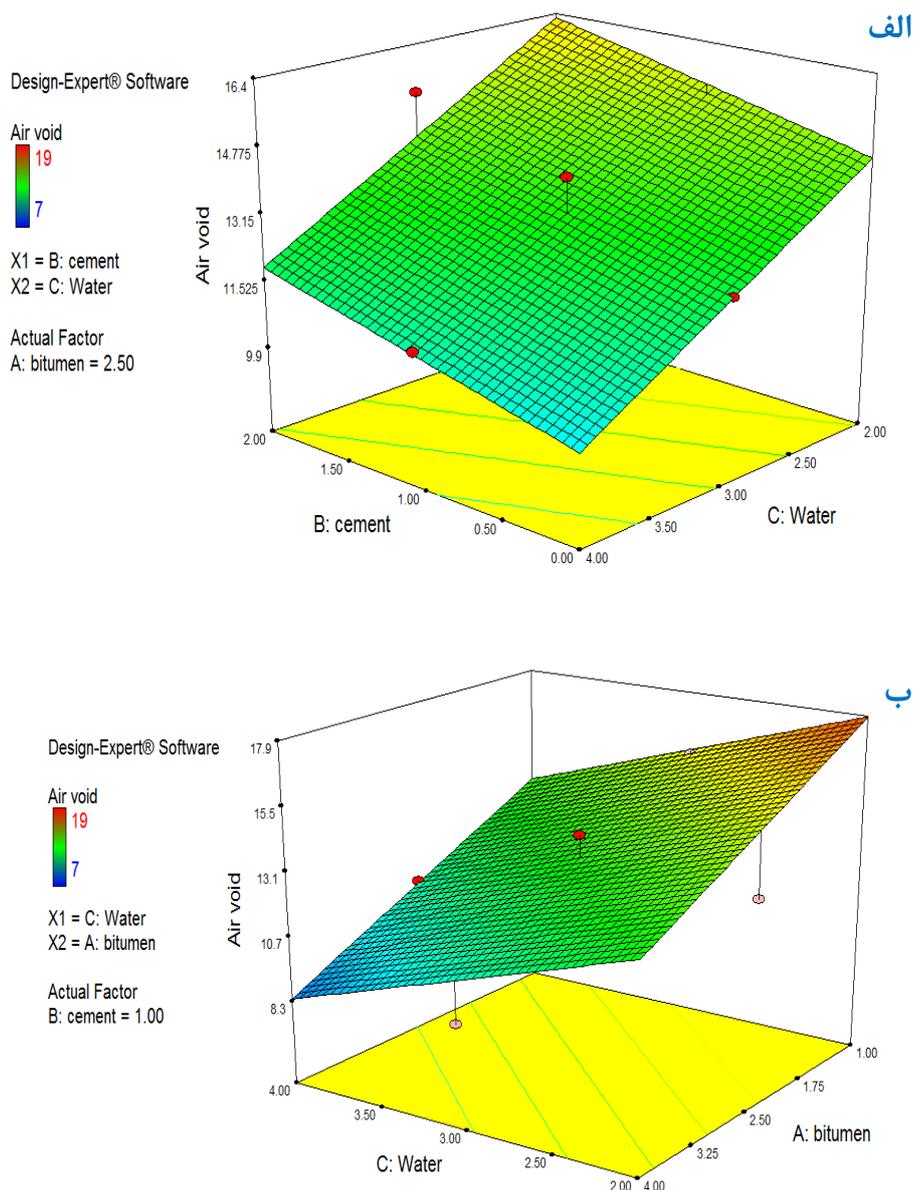
Table 13. Analysis of variance of linear response level model for the air void

P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	متغیرها	پاسخ
<۰/۰۰۰۱	۲۲/۷۲	۴۰/۷۹	۳	۱۲۲/۳۸	مدل	درصد فضای خالی
<۰/۰۰۰۱	۳۵/۹۹	۶۴/۶۲	۱	۶۴/۶۲	قیر (A)	
۰/۰۴۲۳	۵/۰۷	۹/۱۰	۱	۹/۱۰	سیمان (B)	
۰/۰۰۰۲	۲۷/۱۰	۴۸/۶۶	۱	۴۸/۶۶	آب (C)	
		۱/۸۰	۱۳	۲۳/۳۴	باقی مانده	
		۲/۱۲	۱۱	۲۳/۳۴	عدم انطباق	
			۱۶	۱۴۵/۷۳	مجموع	

شکل ۶ مدل گرافیکی سه بعدی رابطه بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (درصد فضای خالی) را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶-الف مشخص است با افزایش مقدار آب از ۲ به ۴ درصد فضای خالی مخلوط با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار سیمان از ۰ به ۲ درصد، درصد فضای خالی مخلوط افزایش می‌یابد. این در حالی است که درصد فضای خالی مخلوط با قیر امولسیون ۴ درصد و سیمان ۰ درصد کمتر از درصد فضای خالی مخلوط با قیر امولسیون ۲ درصد و آب ۲ درصد است. شکل ۶-ب بیانگر این مطلب است که با افزایش مقدار آب از ۲ به ۴ درصد، درصد فضای خالی مخلوط کاهش می‌یابد و با افزایش مقدار قیر امولسیون از ۱ به ۴ درصد نیز درصد فضای خالی مخلوط کاهش می‌یابد. این در حالی است که درصد فضای خالی مخلوط با قیر امولسیون ۴ درصد و آب ۴ درصد کمتر از درصد فضای خالی مخلوط با قیر امولسیون ۱ درصد و آب ۴ درصد است

جدول ۱۲ نتایج آماری مدل تحلیلی برای درصد فضای خالی را نشان می‌دهد که مدل خطی را پیشنهاد می‌کند. تحلیل واریانس مدل خطی سطح پاسخ برای درصد فضای خالی در جدول ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به این مقادیر مدل پیشنهادی معنی‌دار است و داده‌های پرت معنی‌دار نیستند و احتمال معنی‌دار نبودن مدل انتخابی ۰/۰۱ درصد است که احتمال خیلی پایینی است. همچنین همه مقادیر P-value کوچک‌تر از ۰/۱ است. رابطه (۴) معادله ریاضی بین مقادیر متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (درصد فضای خالی) را نشان می‌دهد.

$$Air\ void = +23.04420 - 1.69467 \times bitumen + 0.95400 \times cement - 2.20600 \times water \quad (4)$$



شکل ۶. مدل سه بعدی درصد فضای خالی بین الف- سیمان و آب، ب- بین آب و قیر امولسیون

Fig. 6. Three-dimensional model of air void between (a) cement and water and (b) emulsified binder and water

و داده‌های پرت معنی‌دار نیستند و احتمال معنی‌دار نبودن مدل انتخابی ۰/۰۱ درصد است که احتمال خیلی پایینی است. همچنین P-value برای مدل پیشنهادی و پارامترهای مؤثر به غیر از پارامتر آب کوچکتر از ۰/۰۵ است که نشان دهنده معنی‌دار بودن مدل انتخابی در سطح ۹۵ درصد است. همانطور که در مقادیر جدول ۱۵ مشخص است با حذف نمودن پارامتر آب، P-value برای همه پارامترها کوچکتر از ۰/۰۵ است. رابطه (۵) معادله ریاضی بین مقادیر متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (هزینه) را نشان می‌دهد.

که این مطلب را می‌توان با پر شدن فضاهای خالی مخلوط توسط قیر امولسیون توجیه نمود و این نشان دهنده کاهش درصد فضای خالی نمونه‌ها است.

### ۳-۳- هزینه تهیه مخلوط آسفالتی

نتایج آماری مدل تحلیلی برای هزینه در جدول ۱۴ نشان داده شده است که مدل خطی را برای متغیر هزینه پیشنهاد می‌کند. تحلیل واریانس مدل خطی سطح پاسخ برای هزینه در جدول ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر جدول ۱۵ مدل پیشنهادی معنی‌دار است

جدول ۱۴. نتایج آماری مدل تحلیلی برای هزینه

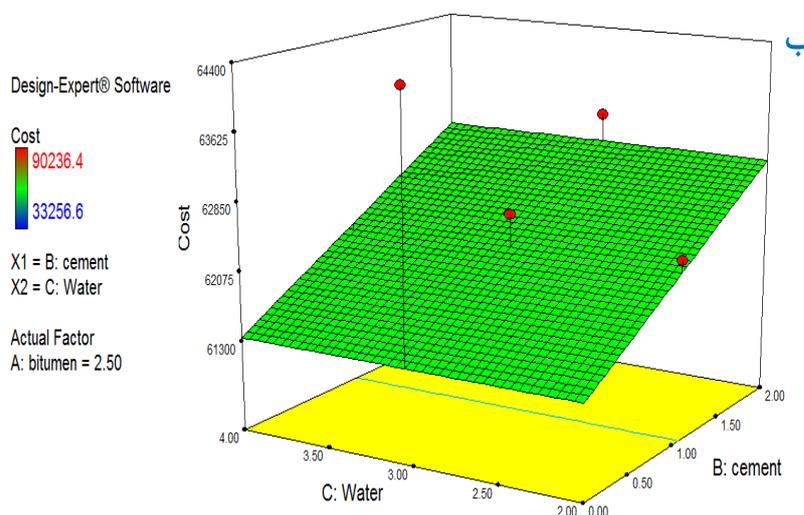
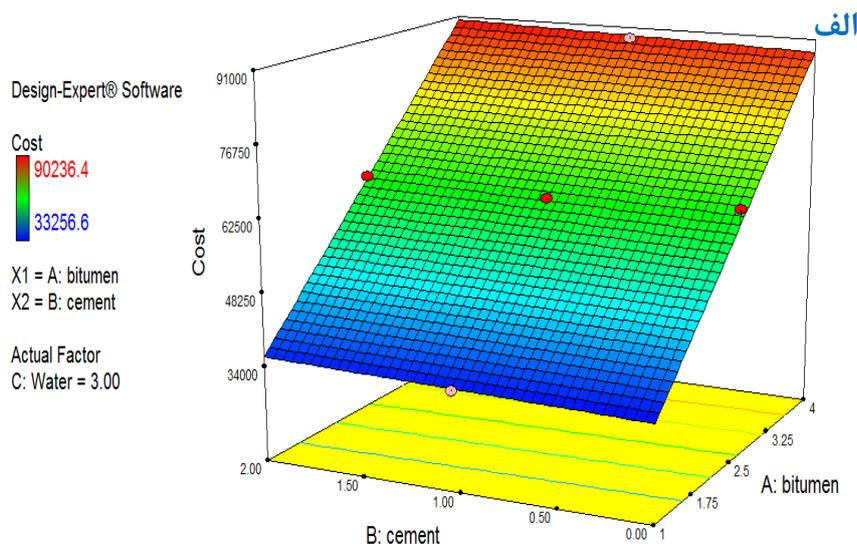
Table 14. Statistical results of analytical model for the cost

	Predicted R-squared	Adj. R-Squared	R-Squared	انحراف معیار	منبع
Suggested	۰/۹۹۷۳	۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۸۳	۹۸۲/۹۴	خطی
	۰/۹۹۳۶	۰/۹۹۷۳	۰/۹۹۸۳	۱۱۲۰/۶۴	2FI
	۰/۹۹۴۹	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۹۴	۸۲۴/۸۳	درجه دوم
Aliased	۰/۹۵۶۲	۰/۹۹۹۹	۱/۰۰۰۰	۲۶۰/۸۵	درجه سوم

جدول ۱۵. تحلیل واریانس مدل سطح پاسخ برای هزینه

Table 15. Analysis of variance of linear response level model for the cost

P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	متغیرها	پاسخ
<۰/۰۰۰۱	۲۵۴۶/۲۸	۲/۴۶۰×۱۰ <sup>۹</sup>	۳	۷/۳۸۰×۱۰ <sup>۹</sup>	مدل	هزینه (عادی)
<۰/۰۰۰۱	۷۶۳۱/۲۸	۷/۳۷۳×۱۰ <sup>۹</sup>	۱	۷/۳۷۳×۱۰ <sup>۹</sup>	قیر (A)	
۰/۰۱۷۸	۷/۳۵	۷/۱۰۶×۱۰ <sup>۶</sup>	۱	۷/۱۰۶×۱۰ <sup>۶</sup>	سیمان (B)	
۰/۶۶۵۲	۰/۲۰	۱/۸۹۴×۱۰ <sup>۵</sup>	۱	۱/۸۹۴×۱۰ <sup>۵</sup>	آب (C)	
		۹/۶۶۲×۱۰ <sup>۵</sup>	۱۳	۱/۲۵۶×۱۰ <sup>۷</sup>	باقیمانده	
		۱/۱۴۲×۱۰ <sup>۹</sup>	۱۱	۱/۲۵۶×۱۰ <sup>۷</sup>	عدم انطباق	
		۷/۳۸۰×۱۰ <sup>۹</sup>	۱۶	۷/۳۹۳×۱۰ <sup>۹</sup>	مجموع	
<۰/۰۰۰۱	۴۰۵۲/۰۰	۳/۶۹۰×۱۰ <sup>۹</sup>	۲	۷/۳۸۰×۱۰ <sup>۹</sup>	مدل	هزینه (اصلاح شده)
<۰/۰۰۰۱	۸۰۹۶/۲۰	۷/۳۷۳×۱۰ <sup>۹</sup>	۱	۷/۳۷۳×۱۰ <sup>۹</sup>	قیر (A)	
۰/۰۱۴۴	۷/۸۰	۷/۱۰۶×۱۰ <sup>۶</sup>	۱	۷/۱۰۶×۱۰ <sup>۶</sup>	سیمان (B)	
		۹/۱۰۷×۱۰ <sup>۵</sup>	۱۴	۱/۲۷۵×۱۰ <sup>۷</sup>	باقی مانده	
		۱/۰۶۲×۱۰ <sup>۶</sup>	۱۲	۱/۲۷۵×۱۰ <sup>۷</sup>	عدم انطباق	
			۱۶	۷/۳۹۳×۱۰ <sup>۹</sup>	مجموع	



شکل ۷. مدل سه بعدی هزینه بین الف- قیر امولسیون و سیمان، ب- آب و سیمان

Fig. 7. Three-dimensional model of cost between (a) cement and emulsified binder and (b) and water and cement

به سایر مصالح تشکیل دهنده مخلوط آسفالت سرد بازیافتی است. این در حالی است که با افزایش مقدار سیمان از ۰ به ۲ درصد افزایش چندانی در هزینه نسبت به افزایش هزینه قیر امولسیونی ندارد. قیمت ۱ کیلوگرم قیر امولسیونی در زمان مطالعه برابر ۱۵۸۵ تومان بود در حالی که هزینه تهیه ۱ کیلوگرم فیلر از سیمان طبق فهرست بهای سال ۱۳۹۶ برابر ۱۱۶ تومان است. شکل ۷-ب بیانگر این مطلب است که با افزایش مقدار سیمان از ۰ به ۲ درصد افزایش بیشتری در هزینه نسبت به افزایش مقدار آب از ۱ به ۴ درصد دارد. علت افزایش بیشتر هزینه در افزایش مقدار سیمان نسبت به آب،

$$Cost = +16083.53608 + 18102.29333 \times bitumen + 842.96000 \times cement \quad (5)$$

شکل ۷ مدل گرافیکی سه بعدی رابطه بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (هزینه) را نشان می‌دهد. با بررسی شکل ۷-الف مشخص می‌گردد که با افزایش مقدار قیر امولسیونی هزینه با شیب زیادی افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش مقدار قیر امولسیونی از ۱ به ۴ درصد هزینه تقریباً ۲/۷ برابر می‌شود، که این عامل ناشی از قیمت بالای قیر امولسیونی نسبت

جدول ۱۶. طرح اختلاط پیشنهادی برای بهینه‌سازی

Table 16. Proposed mixing design for optimization

شماره	قیر (درصد)	سیمان (درصد)	آب (درصد)	استقامت (پاسکال)	روانی (میلی‌متر)	دانسیته	فضای خالی (درصد)	هزینه (تومان)	مطلوبیت
۱	۲	۱/۱۶	۴	۵۷۳/۲۰۷	۲/۴۲۲۸۸	۲/۱۲۶۷۵	۱۱/۹۴۱۶	۵۳۲۰۲/۵	۰/۶۰۹
۲	۱/۹۸	۱/۰۸	۴	۵۶۷/۴۵۳	۲/۴۱۵۱۳	۲/۱۲۸۵۱	۱۱/۸۸۸۶	۵۲۹۱۳/۸	۰/۶۰۹
۳	۱/۹۱	۱/۰۹	۴	۵۷۱/۱۵۴	۲/۴۱۶۳۸	۲/۱۲۸۲۳	۱۲/۰۱۸۷	۵۱۶۶۱/۹	۰/۶۰۹
۴	۲/۰۷	۱/۳۱	۴	۵۸۲/۵۹۱	۲/۴۳۸۱۳	۲/۱۲۳۲۷	۱۱/۹۶۱۹	۵۴۶۶۸/۴	۰/۶۰۹
۵	۲/۲۳	۱/۶۲	۴	۶۰۱/۰۶۵	۲/۴۶۹	۲/۱۱۶۲۳	۱۱/۹۸۰۲	۵۷۸۷۸/۹	۰/۶۰۶
۶	۲/۴۳	۱/۴۸	۴	۵۸۲/۰۱۵	۲/۴۵۴۶۱	۲/۱۱۹۵۱	۱۱/۵۱۲۷	۶۱۲۸۵/۲	۰/۶۰۳
۷	۲/۳۸	۱/۷۸	۴	۶۰۸/۱۸۷	۲/۴۸۵۰۹	۲/۱۱۲۵۶	۱۱/۸۷۹۴	۶۰۷۳۰/۹	۰/۶۰۳
۸	۲/۵۰	۱/۷۵	۴	۶۰۱/۲۴۴	۲/۴۸۱۹۱	۲/۱۱۳۲۹	۱۱/۶۵۵۷	۶۲۷۶۹/۷	۰/۶۰۱

جدول ۱۷. مقادیر بهینه قیر امولسیون، سیمان و آب و نتایج به دست آمده از این مقادیر

Table 17. Optimal values of emulsified binder, cement and water and the obtained results

هزینه (تومان)	وزن مخصوص حقیقی	فضای خالی (درصد)	روانی (میلی‌متر)	استقامت (پاسکال)	آب (درصد)	سیمان (درصد)	قیر امولسیون (درصد)
۵۳۲۰۲/۵	۲/۱۲	۱۱/۹۴	۲/۴۲	۵۷۳/۲	۴	۱/۱۶	۲

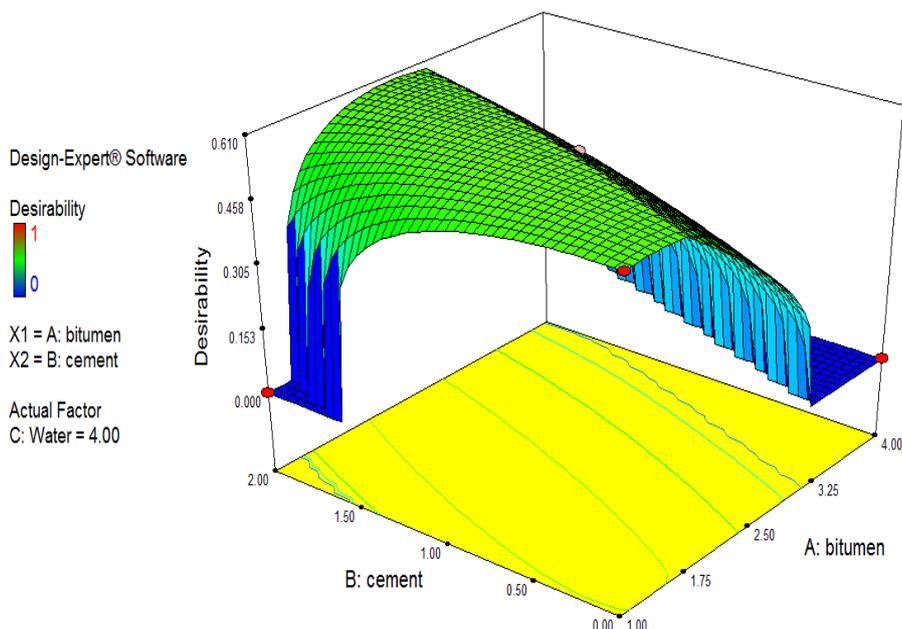
نشریه ۳۳۹ حدود مجاز درصد فضای خالی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی را ۹ الی ۱۴ (نظیر ۱۱/۵) توصیه کرده است. بهینه‌سازی برای حداکثر وزن مخصوص حقیقی، حداکثر میزان استقامت مارشال و حداقل هزینه انجام گردید. روانی مارشال با بررسی مقالات و تحقیقات مختلف در زمینه بازیافت سرد آسفالت برابر ۲ الی ۳ میلی‌متر است. در حالت بهینه‌سازی، نرم‌افزار ۸ طرح اختلاط مطابق جدول ۱۶ پیشنهاد می‌کند که بهترین حالت، طرح اختلاط اولی است. مقدار مطلوبیت (Desirability) برای طرح اختلاط پیشنهادی ۶۰ درصد است.

مقادیر پارامترهای ورودی و خروجی بر اساس طرح اختلاط بهینه پیشنهادی مطابق جدول ۱۷ است که تمام مقادیر به دست آمده در محدوده

قیمت بالای هزینه تهیه سیمان نسبت به بهای آب است. بهای ۱ کیلوگرم آب صنعتی ۰/۵۷۶ تومان است که نسبت به هزینه تهیه ۱ کیلوگرم فیلر از سیمان (۱۱۶ تومان) هزینه بسیار پایینی است.

۳-۴- بهینه‌سازی

هدف از انجام طرح اختلاط و آزمایش‌های لازم در سطوح مختلف این است که تعیین گردد که پاسخ‌های به دست آمده (متغیرهای وابسته) در چه مقداری از متغیرهای مستقل حالت بهینه دارند و با صرف کمترین هزینه بهترین پاسخ به دست آید. برای به دست آوردن مقادیر بهینه قیر امولسیون، سیمان و آب، بهینه‌سازی مطابق با معیارهای نشریه شماره ۳۳۹ انجام گردید.



شکل ۸. نمودار مطلوبیت برای مقادیر سیمان و قیر امولسیون برای طرح اختلاط پیشنهادی

Fig. 8. Desirability diagram for cement and emulsion bitumen for the proposed mixing design

جدول ۱۸. طرح اختلاط پیشنهادی برای بهینه‌سازی جدید

Table 18. Proposed mixing design for the new optimization

مطلوبیت	هزینه (تومان)	فضای خالی (درصد)	دانسیته	روانی (میلی متر)	استقامت (پاسکال)	آب (درصد)	سیمان (درصد)	قیر (درصد)	شماره
۰/۵۹۸	۶۱۰۲۳/۴	۱۲/۰۷۸۹	۲/۱۰۷۵۵	۲/۵۰۷۰۶	۶۲۵/۵۷۹	۴	۲	۲/۳۹	۱
۰/۵۹۸	۶۰۸۲۴/۵	۱۲/۰۹۷۵	۲/۱۰۷۵۵	۲/۵۰۷۰۶	۶۲۶/۰۰۲	۴	۲	۲/۳۸	۲
۰/۵۹۸	۶۱۳۱۵/۴	۱۲/۰۵۱۶	۲/۱۰۷۵۵	۲/۵۰۷۰۶	۶۲۴/۹۵۷	۴	۲	۲/۴۱	۳
۰/۵۷۸	۶۸۲۵۳/۸	۱۱/۴۰۲۱	۲/۱۰۷۵۵	۲/۵۰۷۰۶	۶۱۰/۱۸۸	۴	۲	۲/۷۹	۴

بهینه‌سازی یک بار دیگر برای مقدار سیمان ۲ درصد انجام گردید تا تأثیر تغییر در میزان سیمان بر استقامت مارشال بررسی گردد. مقادیر و محدوده استقامت و روانی مارشال، وزن مخصوص حقیقی و درصد فضای خالی همانند حالت قبلی در نظر گرفته شد. در حالت بهینه‌سازی جدید مطابق جدول ۱۸ نرم‌افزار ۴ حالت طرح اختلاط پیشنهاد می‌کند که بهترین حالت، طرح اختلاط اول است. مقدار مطلوبیت برای طرح اختلاط پیشنهادی ۵۹

مجاز نشریه ۳۳۹ قرار دارند. همچنین استقامت مارشال افزایش یافته است که نشان دهنده تأثیر سیمان در افزایش استقامت مارشال است. شکل ۸ نمودار مطلوبیت برای مقادیر سیمان و قیر امولسیون را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است برای مقدار قیر امولسیون ۲، سیمان ۱/۱۶ و آب ۴ درصد، مطلوبیت بیشترین مقدار را دارد. با توجه به اینکه سیمان تأثیر زیادی در افزایش استقامت مارشال دارد

جدول ۱۹. مقادیر بهینه قیر امولسیون، سیمان و آب و نتایج به دست آمده از این مقادیر

Table 19. Optimal values of emulsified binder, cement and water and the obtained results

هزینه (تومان)	وزن مخصوص حقیقی	فضای خالی (درصد)	روانی (میلی متر)	استقامت (پاسکال)	آب (درصد)	سیمان (درصد)	قیر امولسیونی (درصد)
۶۱۰۲۳/۴	۲/۱	۱۲	۲/۵	۶۲۵/۶	۴	۲	۲/۳۹

درصد است.

در طرح اختلاط جدید مقدار بهینه قیر امولسیونی، سیمان، آب و مقادیر استقامت و روانی مارشال، وزن مخصوص حقیقی، درصد فضای خالی و هزینه در جدول ۱۹ نشان داده شده است که تمام این مقادیر حدود مجاز نشریه ۳۳۹ را رعایت کرده است. همچنین استقامت مارشال نسبت به حالت قبلی افزایش یافته است که نشان دهنده تأثیر سیمان در افزایش استقامت مارشال است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق با ارائه طرح اختلاط به روش سطح پاسخ در نرم افزار Design Expert و ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالت سرد بازیافتی با استفاده از مصالح خرده آسفالتی، قیر امولسیونی کاتیونیک دیر شکن و سیمان پرتلند نوع II به بررسی مشخصات آزمایشگاهی و اقتصادی این مخلوط‌ها پرداخته شد. پس از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های مارشال، این نمونه‌ها تحت آزمایش‌های مختلفی چون استقامت و روانی مارشال، وزن مخصوص حقیقی، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی قرار گرفتند و نتایج زیر حاصل شد:

با روش تحلیل واریانس، مدل خطی برای پیش‌بینی مقدار استقامت مارشال بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته ارائه گردید. استقامت مارشال با افزایش مقدار قیر امولسیونی توأم با افزایش مقدار سیمان، افزایش می‌یابد که این عامل ناشی از نقش سیمان در افزایش استقامت مارشال است.

مدل دو فاکتوری در پیش‌بینی مقدار روانی مارشال ارائه شد. با افزایش مقدار سیمان روانی مارشال با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. افزایش مقدار آب در مقدار سیمان ۲ درصد تأثیری در روانی مارشال ندارد. با افزایش مقدار آب در

مقدار سیمان کمتر از ۲ درصد، روانی مارشال با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. با روش تحلیل واریانس مدل خطی، برای معادله ریاضی وزن مخصوص حقیقی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته ارائه گردید. با افزایش مقدار سیمان وزن مخصوص حقیقی با شیب خیلی کم کاهش می‌یابد و افزایش مقدار سیمان تأثیر چندانی در وزن مخصوص حقیقی ندارد، اما با افزایش مقدار آب وزن مخصوص حقیقی با شیب زیاد افزایش می‌یابد.

با روش تحلیل واریانس، مدل خطی، برای معادله ریاضی درصد فضای خالی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته ارائه گردید. با افزایش مقدار آب درصد فضای خالی مخلوط با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار سیمان درصد فضای خالی مخلوط افزایش می‌یابد.

مدل خطی پیشنهادی برای تخمین هزینه تولید این مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که با افزایش مقدار قیر امولسیونی هزینه با شیب زیادی افزایش می‌یابد که این عامل ناشی از قیمت بالای قیر امولسیونی نسبت به سایر مصالح تشکیل دهنده مخلوط آسفالت سرد بازیافتی است. با افزایش مقدار سیمان افزایش چندانی در هزینه نسبت به افزایش هزینه قیر امولسیونی وجود ندارد. همچنین تأثیر افزایش میزان سیمان در هزینه بیشتر از تأثیر افزایش میزان آب در مخلوط است.

برای به دست آوردن مقادیر بهینه از نشریه ۳۳۹ استفاده گردید. در بهینه‌سازی صورت گرفته، مقدار مطلوبیت برای طرح اختلاط پیشنهادی ۶۰ درصد است. به منظور بررسی تأثیر میزان سیمان در استقامت مارشال بهینه‌سازی با مقدار سیمان برابر ۲ درصد انجام گرفت. نتایج نشان داد که استقامت مارشال نسبت به حالت قبلی افزایش یافت که نشان دهنده تأثیر سیمان در افزایش استقامت مارشال است.

- Research Group, Tehran, 2016. (in Persian).
- [9] M. Mirshekarian Babaki, M.R. Keymanesh, A. Soltani Manesh, G.R. Tavakoli, Evaluation of resistance properties and moisture sensitivity of modified foamed asphalt mix with micro lime and cement, Quarterly Journal of Transportation Engineering, 10(3) (2019) 657-676. (in Persian)
- [10] M. Vamegh, H. Rooholamini, S.A. Mousavi Rqabadi, Experimental Study on Effects of Using Copper Slag in Cold-in-place Recycled Asphalt Mixtures, Journal of Transportation Research, 15(4) (2018) 390-403. (in Persian)
- [11] S. Yousefdoost, O. Farzaneh, A.M. Esmaeili, A. Ahmadi, Laboratory Investigation on the Resilient Modulus, Indirect Tensile Strength and Unconfined Compressive Strength of Cold In-Place Recycled Asphalt Mixes Using Foamed Bitumen, Journal of Civil and Surveying Engineering, 45(7) (2012) 803-825. (in Persian)
- [12] M. Dibaj, A. Kavooosi, An Optimized Mix Design Method for Emulsified Bituminous Mixtures, Journal of Transportation Engineering, 4(1) (2012) 23-34. (in Persian)
- [13] B. Moradi Bejestani, Investigation of mechanical properties of emulsified asphalt made from recycled asphalt materials and new materials, Msc Thesis, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, (in Persian), 2009. (in Persian)
- [14] P. No.339, Cold Mix Recycling General Technical Specifications, in, Ministry of Roads and Transportation, Deputy of Education, Research and Technology, 2007.
- [15] A. Jabarouti, A.A. Ghofrani, Introduction of Response Surface Methodology in: The 4th National Conference of Chemistry & Chemical Engineering, Islamic Azad University, Goochan, 2016. (in Persian).
- [16] M. Murali, B.S. Mohammed, I. Abdulkadir, M. Liew, W.S. Alaloul, Utilization of Crumb Rubber and High-Volume Fly Ash in Concrete for Environmental Sustainability: RSM-Based Modeling and Optimization, Materials, 14(12) (2021) 3322.
- [1] B. Golchin, M. Rabbi, Evaluation of the Technical Properties of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Sasobit, Journal of Transportation Research, 17(2) (2020) 187-198. (in Persian)
- [2] M. Alikhani, R. Moayyedfar, Review and evaluation of practical methods related to hot asphalt recycling, in: National Conference on Civil Engineering, Urban Planning and Sustainable Development, Shahid Beheshti University, 2015. (in Persian)
- [3] A. Kavooosi, O. Sheikhi Karizaki, N. Solatifar, M. Jalili Ghazizadeh, Technical, economic and environmental evaluation of cold asphalt pavement recycling with bitumen foam, in: 15th Civil Students Conference Nationwide, Urmia University, 2015. (in Persian)
- [4] S.F. Sajedi, M. Azhdarizadeh, Evaluation of natural zeolite effect on the mechanical properties of concrete containing coarse masonry recycled aggregates, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(4) (2021) 25-25. (in Persian)
- [5] S.F. Sajedi, F. Darash, Experimental Study of Workability and Mechanical Properties of Concrete Containing Powder Glass and Mineral Waste Glass with Separate and Simultaneous Applications, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(6) (2019) 1155-1176. (in Persian)
- [6] N. Taslimian, E. Parichehreh, F. Naghizadeh Investigation on the characteristics of RAP recycled asphalt, in: The 3rd International Congress of Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Shahid Beheshti University, 2016. (in Persian).
- [7] A. Modarres, Investigation of the effect of cement type on the behavioral properties of recycled asphalt mixture with bitumen, PhD dissertation, Civil Engineering Department, Tarbiat Modarres University, (in Persian), 2011. (in Persian)
- [8] A. Goudarzimehr, M. Ghanbari, Technical, economical and environmental evaluation of hot and cold recycled asphalt in situ with bitumen foam, in: The first national conference on sustainable urban development, Kimia

- coagulation in drinking water treatment: RSM models and sensitivity analysis, *Science of The Total Environment*, 799 (2021) 149398.
- [23] M.O. Hamzah, B. Golchin, D. Woodward, A quick approach for rheological evaluation of warm asphalt binders using response surface method, *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(4) (2017) 475-486.
- [24] N.H. Abdullah, M.O. Hamzah, B. Golchin, M.R.M. Hasan, An alternative protocol to artificially simulate short-term ageing of binders for selected regional condition, *Construction and Building Materials*, 161 (2018) 654-664.
- [25] A. Lewis, D. Collings, Cold in place recycling: a relevant process for road rehabilitation and upgrading, in: *The 7th Conference on Asphalt Pavement Process for Southern Africa, CAPSA '99, 1999*. (in Persian).
- [26] Y. Niazi, M. Jalili Ghazizadeh, Effect of Portland Cement and Lime Additives on Permanent Deformation of Cold in-place Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion, *Journal of Transportation Research*, 5(4) (2009) 373-383. (in Persian)
- [27] F. Firoozei, J. Boloori Bazzaz, A. Mohammadzadeh Mogaddam, The application of cement and polypropylene fibers in cold recycled asphalt mixture by emulsified bitumen in: *The 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 2013*. (in Persian).
- [28] S. Jain, B. Singh, Cold mix asphalt: An overview, *Journal of Cleaner Production*, 280 (2021) 124378.
- [17] S. Ray, M. Haque, T. Ahmed, T.T. Nahin, Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, (2021).
- [18] A. Habibi, A.M. Ramezani-pour, M. Mahdikhani, O. Bamshad, RSM-based evaluation of mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete containing GGBFS and silica fume, *Construction and Building Materials*, 270 (2021) 121431.
- [19] L. Yuan, L. Li, T. Zhang, L. Chen, J. Zhao, W. Liu, L. Cheng, S. Hu, L. Yang, M. Wen, Improving soil moisture estimation by identification of NDVI thresholds optimization: An application to the Chinese Loess Plateau, *Remote Sensing*, 13(4) (2021) 589.
- [20] H.H. Tsang, D.P. Tran, W.Y. Hung, K. Pitilakis, E.F. Gad, Performance of geotechnical seismic isolation system using rubber-soil mixtures in centrifuge testing, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(5) (2021) 1271-1289.
- [21] S. Deng, Y. Chen, A study by response surface methodology (RSM) on optimization of phosphorus adsorption with nano spherical calcium carbonate derived from waste, *Water Science and Technology*, 79(1) (2019) 188-197.
- [22] J. Suquet, L. Godo-Pla, M. Valentí, L. Ferràndez, M. Verdager, M. Poch, M. Martín, H. Monclús, Assessing the effect of catchment characteristics to enhanced

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Golchin, B. Nouri, R. Meshkabi, *Technical and Economical Evaluation of Cold Recycled Asphalt Using Emulsified Asphalt Binder through Response Surface Method and Developing an Optimized Mix Design, Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 2151-2172.*

DOI: 10.22060/ceej.2021.20403.7413

