Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 55(4) (2023) 159-162
DOI: 10.22060/ceej.2023.21610.7777

Investigating the effect of using modified recycled concrete aggregate on the volumetric and mechanical properties of hot asphalt mixes

A. Azarhoosh

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Bojnord

ABSTRACT: Coarse recycled concrete aggregates have weaker mechanical and physical properties than natural aggregate because of the porous and flimsy cement mortar. Hence, using coarse recycled concrete aggregate in the asphalt mixtures decreases their resistance to different failures. Therefore, in this research, to reduce the permeability and increase the resistance of adhered cement mortar, the coarse recycled concrete aggregate was modified by two chemical (coating their surfaces using styrene butadiene rubber polymer) and physical (separation of cement mortar using heating) methods. The results of the dynamic creep test also show that employing coarse recycled concrete aggregate increases permanent deformation in the specimens under test because the asphalt mixture stiffness is decreased. But asphalt mixtures containing treated coarse recycled concrete aggregate have less permanent deformation because the styrene-butadiene rubber polymer with the penetration into the void of coarse recycled concrete aggregate and reinforcing cement mortar, as well as removing the cement mortar by heat, increases their stability. Also, asphalt mixtures containing coarse recycled concrete aggregate have a lower fatigue life compared to the control mixture, and chemical modification of aggregates has been more effective in increasing the fatigue life of the mixtures containing them compared to the physical method. In addition, the results show that the presence of moisture reduces the resistance of controlled and modified asphalt mixtures against moisture damage, and this reduction is greater in mixtures containing coarse recycled concrete aggregate due to their high absorption.

Review History:

Received: Jul. 18, 2022
Revised: Jan. 22, 2023
Accepted: Jan. 23, 2023
Available Online: Jan. 23, 2023

Keywords:

Recycled concrete aggregate
styrene-butadiene rubber polymer
fatigue life
rutting potential
moisture susceptibility

1- Introduction

According to the literature, ~3750 tons of hot-mix asphalt and 3500 tons of natural aggregate are required for paving a road with a width of 10 m, a thickness of 15 cm, and a length of 1 km [1]. Thus, annually, a large amount of natural aggregate is incorporated into the pavement industry worldwide, and this value is on the rise due to the development of the said industry. The increasing demand for natural aggregates has led to natural resources' depletion and, consequently, environmental concerns [2].

Pasandin and Perez [3] investigated RCA incorporation in asphalt concrete along with different additives. Contents of 5%, 10%, 20%, and 30% of RCA coated with 5% bitumen emulsion were used as part of the aggregate. The results showed that specimens containing RCA coated with emulsion bitumen possessed a higher effective bitumen content and superior performance than those containing RCA. The resistance of asphalt mixtures containing RCA and crumb rubber (as a bitumen modifier) to moisture damage was evaluated in another study. The results revealed that asphalt mixtures containing RCA had higher moisture susceptibility compared to control mixtures, and the use of bitumen modified by crumb rubber improved the performance of the mixtures [4].

2- Methodology

The optimum amount of coarse recycled concrete aggregates (CRCA) in asphalt mixtures has been determined to be 30-40% [5]. As a result, the amounts of 15, 30, and, 50% of RCA were utilized as portions of coarse aggregates in hot-mix asphalts. Furthermore, it has been shown that the film of porous adhered cement mortar is the main cause of the deficiency of performance of RCAs as aggregates in asphalt mixtures. Accordingly, to reduce the porosity and, therefore, water and bitumen absorption of CRCA (the reason for its restricted use), their surface was coated with styrene butadiene rubber (SBR). For this purpose, CRCA was first mixed with SBR at 5% by weight of CRCA and was then placed in the oven at 270-280 °C for 2 hours. Subsequently, the mixture was removed from the oven and stirred for 10 minutes to prevent aggregate lumping.

The typical procedure designated as Marshall mix design was followed to specify the optimum percentage of bitumen of the control and modified asphalt mixtures [6]. The optimum bitumen content in all types of mixtures is the bitumen content corresponding to the air void of 4%. Also, the other Marshall parameters for all types of asphalt mixtures were controlled at the optimum bitumen content with permissible values.

*Corresponding author's email: azarhoosh@ub.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

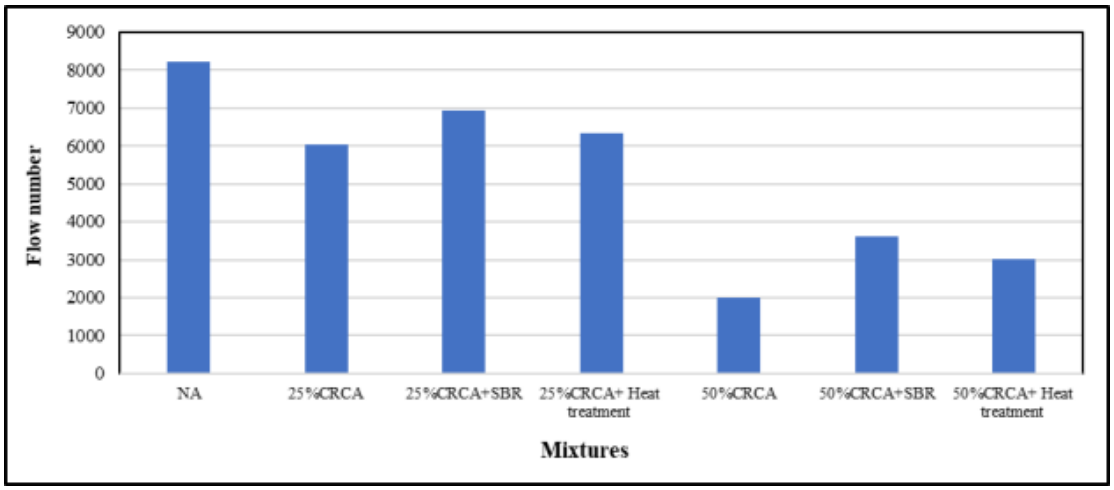


Fig. 1. Flow number for the base and modified asphalt mixtures

To evaluate the properties of asphalt mixtures containing CRCA, dynamic creep, fatigue, and indirect tensile strength (ITS) tests were used in this research. In the dynamic creep test, the sample is under the loading and unloading mode, and the changes of accumulated strain are computed in each cycle. Three separate regions can be detected in the curve obtained from the dynamic creep test (accumulated strain against cycles of loading chart). In this method, the flow number (loading cycle number at which the third region of the curve begins) correlated with the rutting potential of HMAs. This parameter further demonstrates a specific cycle in which the asphalt sample shear strength is lost, and specimen failure is initiated. To determine the flow number, the creep curve was fitted by the Francken model [7].

$$\varepsilon_p(N)=aN^b+c\left(e^{dN}-1\right) \quad (1)$$

The indirect tensile fatigue test involves the application of consistent tensile stress to the sample along the entire length of the cylindrical specimen, perpendicular to the direction of loading. The above-mentioned testing procedure was followed under stress-controlled conditions in which haversine loading with a frequency of 2 Hz (0.1 s of loading time, and 0.4 s of rest time) was implemented. Moreover, different maximum stress levels (200 to 500 kPa), and temperatures of 15°C were established to assess the effects of traffic loading and environmental conditions on the fatigue life of the control and modified mixtures.

According to the European Committee for Standardization (CEN), fatigue life is characterized by the number of loading cycles leading to the fracture of the tested specimen or the induced vertical deformation of 12.7 mm (0.5 in) in the asphalt mixture. Plotting the logarithmic chart of the variation of fatigue life vs. stress level results in the application of a regression line based on Eq. (2) to determine the coefficients of K_1 and K_2:

$$N_f = K_1\left(\frac{1}{\sigma_t}\right)^{K_2} \quad (2)$$

Loading of the ITS test is carried out at a loading rate of 5.08 cm (2 inches) per minute until the sample is ruptured. The amount of load is recorded at the rupture moment. Then the ITS value of the samples is obtained using Equation 3.

$$ITS=\frac{2F}{t\pi d} \quad (3)$$

The average ITS value of dry (three samples) and wet (three samples) samples is calculated separately. The moisture susceptibility or the stripping potential for asphalt mixture samples is obtained by the ratio of the average ITS value of the wet to dry samples (in percent).

$$TSR=\left(\frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}}\right)\times 100 \quad (4)$$

3- Discussion and Results

Flow number, which is a suitable index for determining HMA rutting potential, was computed using the Francken method. For this purpose, the Francken models were fitted to the rutting data, and the results are presented in Figure 1. The addition of base and modified CRCA until 50% decreased the asphalt concrete's flow number and rutting resistance.

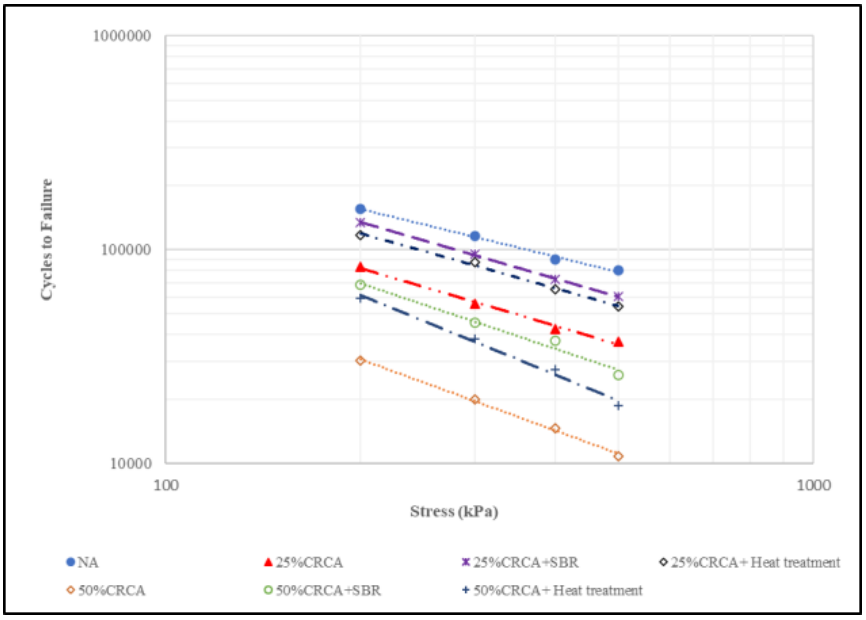


Fig. 2. Fatigue life versus stress levels for the base and modified asphalt mixtures

The fatigue life of specimens was determined by the indirect tensile method (Figure 2). The use of CRCA at all values reduced the resistance of hot-mix asphalts to fatigue cracking, and the rate of reduction was greater as this value increased. Although CRCA has better adhesion to bitumen, which can help improve fatigue life, it greatly decreases the loading capacity of asphalt specimens due to its highly porous and weak cement mortars. The use of SBR coatings on CRCA surfaces improves not only their adhesion to bitumen, but also their physical and mechanical properties by penetrating the CRCA voids and reinforcing them. Therefore, asphalt specimens containing CRCA treated with SBR had a longer fatigue life than the specimens containing CRCA and were closer to the control mixtures.

Moisture creates cohesive cracks in the bitumen and adhesive cracks in the bitumen-aggregate contact surface, which expand by applying a load and cover the entire thickness of the asphalt. Therefore, all asphalt specimens (controlled and modified) had less fatigue life under wet conditions.

4- Conclusions

The following conclusions could be drawn based on the experiments performed on different materials and asphalt mixtures:

- The flow number 50 ºC indicated that using untreated and treated CRCA reduces this index and increases the rutting potential in the asphalt concrete.
- Mixtures containing untreated and treated CRCAs have lower fatigue life compared to control mixtures due to the relatively poor mechanical and physical properties of CRCA.
- The use of untreated and treated CRCA decreases the TSR in asphalt mixtures, and hence, their resistance to moisture damage.
-

References

[1] S. Ektas, M. Karacasu, Use of Recycled Concrete in Hot Mix Asphalt and an ANN model for Prediction of Resilient Modulus, Ekoloji Dergisi, 21(83) (2012).

[2] M.M. Rafi, A. Qadir, S. Ali, S.H. Siddiqui, Performance of hot mix asphalt mixtures made of recycled aggregates, Journal of Testing and Evaluation, 42(2) (2014) 357-367.

[3] A. Pasandín, I. Pérez, Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion, Construction, and Building Materials, 55 (2014) 350-358.

[4] I. Pérez, A. Pasandín, Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates and crumb rubber, Journal of Cleaner Production, 165 (2017) 405-414.

[5] H.K.A. Al-Bayati, S.L. Tighe, J. Achebe, Influence of recycled concrete aggregate on volumetric properties of hot mix asphalt, Resources, Conservation and Recycling, 130 (2018) 200-214.

[6] ASTM. D6927–15, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow Ofasphalt Mixtures, West Conshohocken, PA., in, 2015.

[7] L. Francken, Permanent deformation law of bituminous road mixes in repeated triaxial compression, in: 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Michigan, August 22-26, 1977.

HOW TO CITE THIS ARTICLE
A. Azarhoosh, Investigating the effect of using modified recycled concrete aggregate on the volumetric and mechanical properties of hot asphalt mixes , Amirkabir J. Civil Eng., 55(4) (2023) 159-162.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21610.7777

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۴، سال ۱۴۰۲، صفحات ۷۵۷ تا ۷۷۰
DOI: 10.22060/ceej.2023.21610.7777

بررسی تاثیر استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌شده بر روی خصوصیات حجمی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی داغ

علیرضا آذرهوش*

دانشگاه بجنورد، دانشکده فنی و مهندسی، عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران

خلاصه: سنگدانه‌های بتن ضایعاتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی بدلیل ملات سیمان چسبیده ضعیف و بسیار متخلخل از خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ضعیف‌تری برخوردار است. ازاین‌رو استفاده از آن در مخلوط‌های آسفالتی، مقاومت آنها را در برابر انواع خرابی‌ها کاهش می‌دهد. بنابراین در این پژوهش به منظور کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت ملات سیمان چسبیده، سنگدانه‌های بتن ضایعاتی به دو روش شیمیایی (پوشش سطوح آنها با استفاده از پلیمر استایرن بوتادین لاستیک) و فیزیکی (جداسازی ملات سیمان با استفاده از حرارت‌دادن) اصلاح شد و در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بدلیل کاهش سختی مخلوط‌های آسفالتی موجب افزایش تغییرشکل ماندگار در آنها می‌شود. اما مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌شده دارای تغییرشکل ماندگار کمتری است زیرا پلیمر استایرن بوتادین لاستیک با نفوذ در فضای خالی و مسلح کردن ملات سیمان و همچنین حذف ملات سیمان توسط حرارت موجب افزایش مقاومت آنها می‌شود. همچنین مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی در مقایسه با مخلوط کنترل دارای عمر خستگی کمتری است و اصلاح سنگدانه‌ها به روش شیمیایی در مقایسه با روش فیزیکی در افزایش عمرخستگی مخلوط‌های حاوی آنها موثرتر بوده است. علاوه‌براین، نتایج نشان می‌دهد که وجود رطوبت مقاومت مخلوط‌های آسفالتی کنترل و اصلاح‌شده را در برابر خرابی رطوبتی کاهش می‌دهد و این میزان کاهش در مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی به دلیل جذب بالای آنها بیشتر است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۷
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۰۸

کلمات کلیدی:
سنگدانه‌های بتن ضایعاتی
لیمر استایرن بوتادین لاستیک
عمر خستگی
پتانسیل شیارشدگی و حساسیت رطوبتی

۱- مقدمه

مصالح مورد استفاده برای ساخت مخلوط آسفالتی، سنگدانه و قیر می‌باشد که سنگدانه تقریبا ۹۰ تا ۹۵ درصد وزنی آن را تشکیل می‌دهد. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که برای روسازی یک راه به عرض ۱۰ متر، ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و طول ۱ کیلومتر تقریباً به ۳۷۵۰ تن مخلوط آسفالت داغ و به طبع آن ۳۵۰۰ تن سنگدانه طبیعی نیاز است [۱]. ازاین‌رو توسعه و گسترش شبکه راه‌ها و نیاز به روسازی آنها در آینده موجب افزایش تقاضا برای سنگدانه‌های طبیعی و در نتیجه نابودی منابع طبیعی و نگرانی‌های زیست محیطی شده است. بنابراین استفاده از مواد زاید بعنوان بخشی از سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند علاوه بر کاهش تقاضا جهت تولید سنگدانه‌های طبیعی و اثرات منفی زیست محیطی به افزایش ظرفیت محل‌های دفن زباله منجر شود.

افزایش ساخت و ساز در کشورهای درحال توسعه و توسعه یافته و همچنین وقوع بلایای طبیعی (مانند زلزله، سیل و ...) موجب تولید و افزایش روزافزون ضایعات ساختمانی در دنیا شده است که سهم سنگدانه‌های بتن ضایعاتی در آنها بیشترین مقدار است [۲]. ازاین‌رو استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی در صنعت روسازی موجب از بین بردن آلودگی‌های زیست محیطی (با افزایش ظرفیت محل‌های دفن زباله) و حفظ منابع طبیعی (با کاهش استخراج سنگدانه‌های طبیعی) می‌شود [۳]. سنگدانه‌های بتن ضایعاتی از سنگدانه و ملات سیمان تشکیل شده است که بدلیل تخلخل بالای ملات سیمان دارای بافت سطحی زبر، وزن مخصوص حجمی و سختی پایین و جذب آب بالایی می‌باشند [۴]. ازاین‌رو استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بطور مستقیم در مخلوط‌های آسفالتی بعنوان لایه رویه با توجه به خصوصیات حجمی و مکانیکی که دارند مطلوب نمی‌باشد. بنابراین، قبل از استفاده سنگدانه‌های بتن ضایعاتی در مخلوط‌های آسفالتی بایستی به یکی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: azarhoosh@ub.ac.ir

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

از دو روش: ۱. روش تقویت شیمیایی و ۲. روش تقویت فیزیکی کیفیت آنها بهبود یابد. روش تقویت فیزیکی به از بین بردن ملات سیمان چسبیده به سنگدانه‌ها و روش تقویت شیمیایی به پوشش سنگدانه‌های بتن ضایعاتی با استفاده از مواد مختلف جهت بهبود کیفیت ملات سیمان چسبیده می‌پردازند [۵-۷].

تاکنون در زمینه استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی در مخلوط‌های آسفالتی مطالعاتی صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. عربانی و همکاران [۸, ۹] در مطالعات متعدد با استفاده از آزمایش‌های خزش دینامیکی، کشش غیر مستقیم، مدول سختی و خستگی نشان دادند که استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بعنوان درشت‌دانه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بعنوان درشت‌دانه موجب کاهش سختی و عمرخستگی و همچنین افزایش پتانسیل شیارشدگی و حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. علاوه‌براین نتایج بیانگر آن بود که استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بعنوان ریزدانه و فیلر در مقدار بهینه می‌تواند موجب بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی شود. ازاین‌رو پیشنهاد شد که از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بعنوان ریزدانه به همراه اسلگ بعنوان درشت‌دانه در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شود. همچنین در پژوهش دیگر علاوه بر مشخصات مکانیکی، خصوصیات حجمی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بعنوان درشت‌دانه تمامی خصوصیات حجمی (بجز درصد فضای خالی)، مدول برجهندگی و مقاومت در برابر شیارشدگی را در مقایسه با مخلوط کنترل کاهش می‌دهد [۱۰].

پرز[1] و پاساندین[2] [۱۱, ۱۲] استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی را در مخلوط‌های آسفالتی به همراه افزودنی‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. در یک مطالعه از مقادیر ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد سنگدانه‌های بتن ضایعاتی که با ۵ درصد قیر امولسیون پوشش داده شده بود بعنوان بخشی از سنگدانه استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی پوشش داده شده با قیر امولسیونی موجب افزایش مقدار قیر موثر و بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی آنها در مقایسه با مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده می‌شود. در مطالعه دیگر از خرده لاستیک بعنوان اصلاح کننده قیر در مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی استفاده شد و مقاومت آنها در برابر خرابی رطوبتی و ترک‌خوردگی خستگی ارزیابی گردید. نتایج پژوهش فوق نشان داد که استفاده از خرده لاستیک موجب افزایش عمرخستگی و کاهش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی می‌شود.

ما[3] و همکاران [۱۳] استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌شده با ضایعات روغن پخت و پز را در مخلوط‌های آسفالتی داغ مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که که مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح شده در مقایسه با مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح نشده بعنوان درشت‌دانه و ریزدانه بترتیب دارای ۰/۹و ۰/۵ درصد قیر بهینه کمتری است. همچنین استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌شده در مخلوط‌های آسفالتی موجب افزایش مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی می‌شود اما اثرات نامطوبی بر پتانسیل شیارشدگی، حساسیت رطوبتی و مدول دینامیکی دارد. همچنین در پژوهش دیگر با استفاده از دو روش حرارت دادن و خیساندن در محلول اسیدی، خصوصیات سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بهبود داده شد و از آن بعنوان سنگدانه جایگزین در مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردید. در این پژوهش خصوصیات حجمی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح شده مورد مطالعه قرا گرفت و نتایج نشان داد که مخلوط حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح شده در مقایسه با مخلوط حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح نشده دارای مقدار قیر بهینه کمتر، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پرشده با قیر بیشتری است [۱۴].

آذرهوش و همکاران رفتار خستگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه بتن ضایعاتی پوشش داده شده با ضایعات بطری پلاستیکی را در دو مطالعه جداگانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه بتن ضایعاتی در مقایسه با مخلوط کنترل دارای عمر خستگی کمتری در شرایط خشک و مرطوب است و استفاده از پوشش ضایعات بطری‌های پلاستیکی موجب بهبود عملکرد آن می‌شود. علاوه‌براین، نتایج نشان داد که رطوبت مقاومت مخلوط‌های آسفالتی کنترل و اصلاح‌شده را در برابر خستگی کاهش می‌دهد و این میزان کاهش در مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی به دلیل جذب آب بالای آنها بیشتر است. همچنین نتایج آزمایش مدول سختی و خزش دینامیکی نشان دادند که استفاده سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بدلیل کاهش سختی مخلوط‌های آسفالتی موجب افزایش تغییرشکل ماندگار در آنها

1 Perez
2 Pasandin
3 Ma

می‌شود. اما مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌شده دارای تغییرشکل ماندگار کمتری است زیرا پوشش ضایعات بطری‌های پلاستیکی با نفوذ در فضای خالی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی و مسلح کردن ملات سیمان موجب افزایش مقاومت آنها می‌شود. همچنین با افزایش دما مقاومت تمامی مخلوطهای آسفالتی در برابر شیارشدگی کاهش می‌یابد که در مخلوطهای اصلاح‌شده این نرخ کاهش بیشتر است [۱۵, ۱۶].

۲- اهداف پژوهش

در پژوهش حاضر به منظور بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بعنوان درشت دانه از دو روش تقویت شیمیایی (پوشش سطح آن با پلیمر استایرن بوتادین لاستیک[1]) و تقویت فیزیکی (حرارت دادن) استفاده شد. در ادامه خصوصیات مکانیکی و دینامیکی مخلوطهای آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی پایه و اصلاح‌شده با استفاده از آزمایش‌های مارشال، خزش دینامیکی، خستگی و مقاومت کششی غیرمستقیم مورد بررسی قرار گرفت. ازاین‌رو، مهمترین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از:

- تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌های طبیعی و بتن ضایعاتی با استفاده از آزمایش‌های مختلف،
- اصلاح سنگدانه‌های بتن ضایعاتی به دو روش فیزیکی و شیمیایی و تعیین خصوصیات آنها،
- تعیین تاثیر سنگدانه‌های بتن ضایعاتی درشت‌دانه پایه و اصلاح‌شده بر پارامترهای طرح اختلاط مخلوطهای آسفالتی حاوی آنها،
- ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌شده و نشده،
- انجام آزمایش خستگی بر روی نمونه‌های آسفالتی کنترل و اصلاح‌شده جهت اندازه‌گیری عمر خستگی، و
- بررسی اثر سنگدانه‌های بتن ضایعاتی پایه و اصلاح‌شده بر حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی حاوی آنها.
-

۳- مصالح و آزمایش‌ها

۳- ۱- مصالح

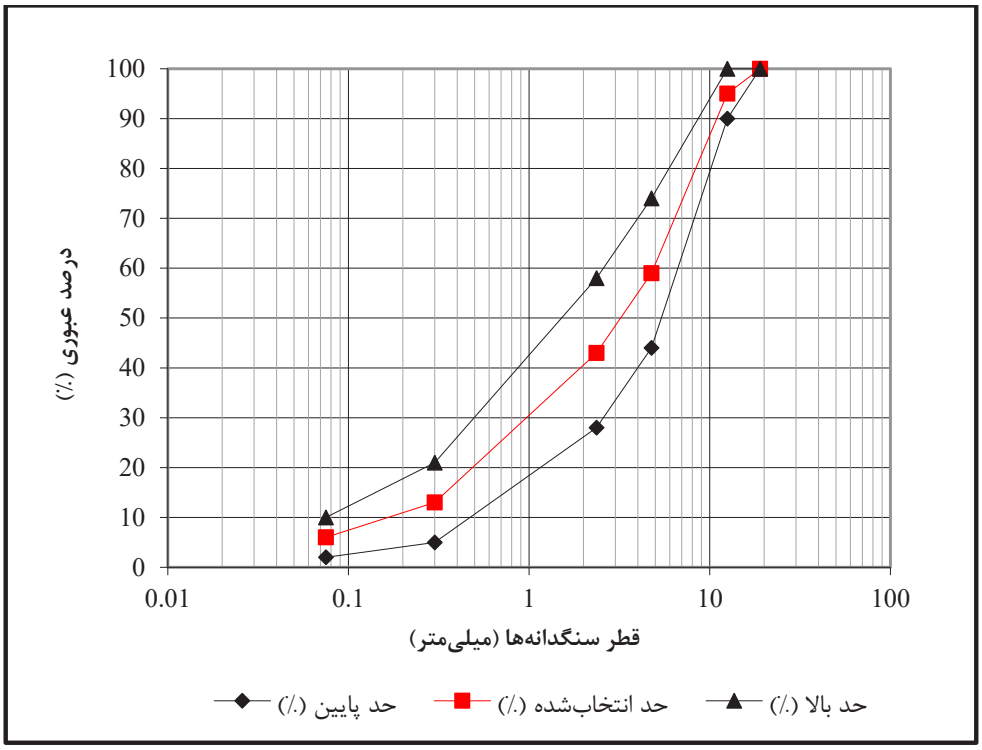
در این پژوهش از یک نوع سنگدانه طبیعی جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شد. همچنین سنگدانه‌های بتن ضایعاتی که بعنوان درشت‌دانه در مخلوطهای آسفالتی استفاده شد از ضایعات تخریب ساختمان‌ها تهیه گردید که بدلیل ابعاد بزرگ‌شان قابلیت استفاده مستقیم در مخلوطهای آسفالتی را نداشتند. ازاین رو، پس از انتقال به آزمایشگاه توسط سنگ‌شکن‌های مختلف خرد شدند به طوریکه حداکثر سایز سنگدانه‌ها ۱۹ میلی‌متر بود. در ادامه سنگدانه‌های بتن ضایعاتی خرد شده کاملاً شسته شدند تا تمامی ضایعات از سطوح آنها برطرف شود. سنگدانه‌های بتن ضایعاتی شسته شده در آون با دمای تقریبی ۵±۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا کاملاً خشک شوند. سپس آزمایش‌های مختلف جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بر روی آنها در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) انجام شد. همچنین، دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های آسفالتی در شکل ۱ نشان داده شده است.

پلیمر استایرن بوتادین لاستیک یک لاستیک مصنوعی است که از استایرن و بوتادین تشکیل شده و دارای مقاومت مناسبی در مقابل ساییدگی و پیرشدگی می‌باشد. پلیمر استایرن بوتادین لاستیک بعنوان یک پلیمر متداول با کارایی‌های زیاد و بالا تعریف می‌شود و در دنیا پرمصرف‌ترین لاستیک به حساب می‌آید که بعلت دارا بودن مواد اولیه ارزان و فراوان از قیمت مناسبی برخوردار و بالاترین حجم تولید را در صنعت لاستیک به خود اختصاص داده است. علاوه‌براین، قیر به کار گرفته شده در این پژوهش از نوع قیر خالص ۷۰-۶۰ است که محصول شرکت نفت پاسارگاد بوده و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

۳- ۲- طرح اختلاط

براساس نتایج پژوهش‌های پیشین مقدار بهینه استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بعنوان درشت‌دانه در مخلوطهای آسفالتی ۳۰ تا ۴۰ درصد تعیین شده است [۱۴]. ازاین‌رو، در این پژوهش مقادیر ۲۵ و ۵۰ درصد از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی برای ساخت نمونه‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. علاوه‌براین، با توجه به نتایج مطالعات پیشین دلیل اصلی عملکرد ضعیف سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بعنوان سنگدانه در مخلوطهای آسفالتی لایه ملات چسبیده بسیار متخلخل در آنها می‌باشد [۱۷, ۱۸]. بر این اساس در این پژوهش جهت کاهش تخلخل و در نتیجه کاهش جذب آب و قیر، سنگدانه‌های بتن ضایعاتی (که دلایل محدودیت استفاده از آن می‌باشد) به دو روش فیزیکی و شیمیایی اصلاح شد. در روش شیمیایی سطح سنگدانه‌های بتن ضایعاتی توسط پلیمر استایرن بوتادین لاستیک پوشش داده شد. بدین منظور ابتدا سنگدانه‌های بتن ضایعاتی با پلیمر استایرن بوتادین لاستیک

1 Styrene butadiene Rubber (SBR)



شکل ۱. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های آسفالتی

Fig. 1. Granulation of aggregates used in this research to make asphalt samples

جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Specifications of bitumen used in this research

آزمایش‌ها	استاندارد	قیر پایه
درجه نفوذ (۰/۱ mm)	ASTM D5-73	۶۸
شکل پذیری (cm)	ASTM D113-79	>۱۰۰
نقطه نرمی (^{o}c)	ASTM D36-76	۵۴
درجه اشتعال (^{o}c)	ASTM D92-78	۲۶۳
ویسکوزیته در ۱۳۵ ^{o}c (Pa s)	ASTM D2171-07	۰/۲۴۶

به مقدار ۵ درصد وزنی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی مخلوط و پس از آن در آون با دمای ۲۷۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت قرار داده شد. در ادامه مخلوط از آون خارج گردید و جهت جلوگیری از توده شدن، سنگدانه‌ها به آرامی و به مدت ۱۰ دقیقه هم زده شد. همچنین در روش فیزیکی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی به مدت ۱ ساعت در آون با دمای ۳۰۰ درجه‌سانتی‌گراد قرار داده شد.

اصلاح شیمیایی و فیزیکی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی نیازمند صرف هزینه‌های اضافی در مرحله تولید آسفالت می‌باشد. برای اصلاح شیمیایی از پلیمر استایرن بوتادین لاستیک استفاده شد که هزینه تهیه آن تقریباً برابر ۵۰۰۰۰۰ ریال در کیلوگرم می‌باشد. همچنین، همانطور که در قبل بدان اشاره شد برای پوشش سنگدانه‌های بتن ضایعاتی با پلیمر استایرن بوتادین لاستیک باید آنها را به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۷۰ تا ۲۸۰ درجه

سانتی‌گراد در داخل آون با مصرف متوسط انرژی ۱/۶ کیلووات در ساعت قرار داد. براساس نرخ انرژی در کشور ایران، هزینه انرژی تقریباً ۶۰۰ ریال در هر کیلووات ساعت می‌باشد. همچنین برای اصلاح فیزیکی، سنگدانه‌های بتن ضایعاتی در داخل آون با مصرف متوسط انرژی ۱/۶ کیلووات در ساعت قرار داده شدند که هزینه انرژی آن تقریباً ۶۰۰ ریال در هر کیلووات ساعت می‌باشد.

در این پژوهش جهت تعیین قیر بهینه مخلوط‌های کنترل و حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی از طرح اختلاط مارشال استفاده شد [۱۹]. مقدار قیر بهینه در انواع مخلوط‌ها، میانگین درصد قیر متناظر با حداکثر وزن واحد حجم و درصد فضای خالی۴ درصد می‌باشد. قابل ذکر است که مقادیر پایداری مارشال، روانی، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پرشده با قیر برای انواع مخلوط‌های آسفالتی در مقدار قیر بهینه با مقادیر مجاز کنترل گردید. پس از تعیین مقدار قیر بهینه نمونه‌های آسفالتی برای انجام آزمایش‌های مختلف با مقدار قیر فوق ساخته شدند. بدین‌منظور مصالح سنگی دانه‌بندی شده به نسبت درصدهای مشخص با هم مخلوط شده تا ۱۲۰۰ گرم از مصالح سنگی بدست آید. این نمونه‌های ۱۲۰۰ گرمی، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۶۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند تا آب موجود در میان دانه‌های مصالح سنگی تبخیر شود. سپس قیر، که تا دمای ۱۳۰ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده است در مقدار بهینه با مصالح سنگی مخلوط شده و در قالب‌های مارشال که دارای قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶/۲ میلی‌متر است، ریخته می‌شود. در نهایت، عمل تراکم بوسیله ۷۵ ضربه (به علت ترافیک سنگین) چکش مارشال، که ۴/۵ کیلوگرم وزن دارد و از ارتفاع ۴۵ سانتی متری سقوط می کند، به هر دو سمت نمونه انجام می‌گیرد. همچنین در این پژوهش برای کاهش میزان خطا و تکرارپذیری نتایج، حداقل ۳ نمونه برای هر ترکیب از مخلوط‌های آسفالتی ساخته شد.

۳- ۳- آزمایش خزش دینامیکی

تاکنون آزمایش‌های گوناگونی جهت تعیین مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی معرفی شده است که برخی از مشهورترین آنها عبارتند از آزمایش خزش استاتیکی، آزمایش خزش دینامیکی و آزمایش ویل‌تراک [۲۰]. در این پژوهش از آزمایش خزش دینامیکی مطابق با استاندارد EN 12697-25a که یکی از روش‌های مناسب برای تعیین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد، استفاده گردید. در این آزمایش نمونه تحت بارگذاری و باربرداری مکرر قرار داده شده و تغییرات کرنش تجمعی، در هر سیکل محاسبه می‌شود. در منحنی بدست آمده از آزمایش خزش دینامیکی (نمودار کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری)، سه ناحیه مجزا قابل شناسایی است. در ناحیه اول، نرخ کرنش تجمعی و حجم نمونه کاهش و چگالی نمونه آسفالتی افزایش می‌یابد. در ناحیه دوم نرخ کرنش ثابت است و در ناحیه سوم نرخ کرنش تا گسیختگی نمونه افزایش می‌یابد [۲۱]. ژو و همکاران [۲۲] نشان دادند که این سه مرحله آزمایشگاهی عملاً در محل نیز اتفاق می‌افتد و همچنین نوع خرابی اتفاق افتاده در هر مرحله را نیز مشخص کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که در مرحله دوم ترک‌های میکروسکوپی و در مرحله سوم ترک‌های ماکروسکوپی اتفاق می‌افتد.

در این روش، عدد جریان که عبارت است از شماره سیکل بارگذاری که ناحیه سوم منحنی شروع می‌شود، با پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی همبستگی دارد. این پارامتر سیکلی از بارگذاری را نشان می‌دهد که نمونه آسفالتی مقاومت برشی خود را از دست داده و شروع به تخریب شدن می‌کند. بنابراین، عدد روانی یک شاخص مناسب جهت شناسایی مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی است. جهت تعیین عدد روانی، منحنی خزش به وسیله مدل فرانکن [۲۳] برازش شد:

$$\varepsilon_p(N)=aN^b+c\left(e^{dN}-1\right) \qquad (۱)$$

که در آن $\varepsilon_P(N)$ کرنش تجمعی بعنوان تابعی از سیکل بارگذاری است و a، b، c، و d ثابت‌های معادله هستند. با دوبار مشتق‌گیری از رابطه (۱) و برابر صفر قرار دادن مشتق دوم، مقدار عدد روانی محاسبه می‌گردد.

در این پژوهش آزمایش خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های کنترل و اصلاح شده استوانه‌ای با ارتفاع ۱±۶۵ میلی‌متر و قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و انجام شد. نمونه‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری با شکل نیمه‌سینوسی، ۰/۱ ثانیه بارگذاری و ۰/۹ ثانیه باربرداری، در سطح تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفتند. علاوه‌براین، یک فرایند پیش‌بارگذاری به مدت ۱۰ دقیقه، که شامل یک تنش استاتیکی به بزرگی ۱۰ درصد تنش دینامیکی بود، قبل از شروع آزمایش اعمال شد. همچنین، شرط پایان آزمایش گسیختگی نمونه‌ها تعیین شد.

شکل ۲. نمونه تحت بارگذاری در آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم

Fig. 2. The sample under loading in fatigue test by indirect tension method

۳- ۴- آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم

در آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم و براساس دستورعمل CEN [۲۴] بارگذاری بصورت تکراری بر یک نمونه استوانه‌ای وارد می‌شود. بارگذاری فوق موجب ایجاد تنش کششی یکنواخت در نمونه شده که عمود بر جهت بارگذاری و در طول نمونه استوانه‌ای است [۲۴]. شکل (۲) نمایی از نمونه تحت بارگذاری در آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم را نشان می‌دهد. نمونه‌های آسفالتی مورد آزمایش دارای قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و ارتفاع ۱±۴۰ میلی‌متر می‌باشند.

آزمایش فوق در این پژوهش درحالت کنترل تنش و با استفاده از شکل بارگذاری شبه سینوسی و فرکانس ۲ هرتز (۰/۱ ثانیه بارگذاری و ۰/۴ ثانیه استراحت) انجام شد. همچنین سطوح تنش ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۱۵ درجه‌سانتیگراد در این پژوهش مور استفاده قرار گرفت.

براساس دستورعمل CEN عمرخستگی برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری است تا زمانیکه شکست یا جابجایی قائم ۱۲/۷ میلی‌متر (۰/۵ اینچ) در نمونه‌های آسفالتی اتفاق بیافتد. پس از تعیین عمرخستگی نمونه‌های آسفالتی با ترسیم نمودار تمام لگاریتمی عمرخستگی در برابر سطوح مختلف تنش و برازش رابطه بین آنها بر معادله ۲ ضرایب K_1 و K_2 محاسبه شدند.

که در آن N_f: عمرخستگی، σ_t : تنش اعمال شده (kPa)، و k_1 و k_2 ضرایب آزمایش مربوط به خصوصیات مخلوطهای آسفالتی.

$$N_f = K_1\left(\frac{1}{\sigma_t}\right)^{K_2} \qquad (۲)$$

۳- ۵- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر عملکرد مخلوطهای آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی از روش مکانیکی بر اساس استاندارد AASH-TO T283 به عنوان فراگیرترین روش موجود استفاده شده است. به منظور بررسی روشن‌تر تفاوت در عملکرد مخلوطهای آسفالتی مختلف، از آزمایش‌نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در ۱، ۳ و ۵ سیکل یخ–ذوب استفاده شده است. برای انجام آزمایش حساسیت رطوبتی به روش لاتمن اصلاح شده[1] برای هر مخلوط باید سه نمونه در شرایط مرطوب و سه نمونه در شرایط خشک ساخته شود. نمونه‌های با قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و ارتفاع ۱±۶۵ میلی‌متر آزمایش قرار می‌گیرند و باید به نحوی متراکم شوند که

1 Modified lottman

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی چهار نوع سنگدانه

Table 2. Physical characteristics of four types of aggregates

آزمایش‌ها	استاندارد	سنگدانه طبیعی	سنگدانه بتن ضایعاتی بعنوان درشت‌دانه			مقادیر مجاز
			اصلاح نشده	اصلاح شده توسط SBR	اصلاح‌شده توسط حرارت دادن	
وزن مخصوص حجمی (درشت دانه)	ASTM C127	۲/۶۵۳	۲/۲۳۹	۲/۴۱۱	۲/۴۴۹	–
حداکثر جذب آب (٪)	ASTM C127	۱/۲۳	۵/۷۱	۲/۸۷	۳/۱۴	< ۲
سایش لس‌آنجلس (٪)	ASTM C131	۱۹	۳۷	۲۸	۲۵	< ۳۰
ذرات سوزنی و پولکی (٪)	ASTM D4791	۶	۱۴	۱۳	۱۰	< ۱۵
حلالیت در $NaSO_4$ (٪)	ASTM C88	۳	۱۳	۷	۸	< ۱۲

درصد هوای آنها بین ۰/۵±۷ درصد باشد.

نمونه‌های مرطوب ابتدا به وسیله شرایط خلأ نسبی (فشار مطلق ۶۷-۱۳ کیلوپاسکال) به مدت پنج دقیقه اشباع می‌شوند. سپس به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه در حالت مستغرق و بدون شرایط خلأ نگهداری می‌شوند. در ادامه نمونه‌ها را بیرون آورده و جرم آنها اندازه‌گیری می‌شود و درصد اشباع نمونه‌ها به دست می‌آید. اگر درصد اشباع کمتر از ۷۰ درصد باشد باید نمونه‌ها را دوباره تحت شرایط خلأ قرار داد. اگر درصد اشباع نمونه‌ها بیش از ۸۰ درصد باشد، نمونه آسیب‌دیده محسوب می‌شود و باید یک نمونه جدید به جای آن ساخته شود و برای نمونه جدید زمان‌های شرایط خلأ کمتری در نظر گرفت تا درصد اشباع آن بین ۷۰ تا ۸۰ درصد باشد. نمونه‌های اشباع‌شده در داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شده و در آن ۱۰ میلی‌لیتر آب ریخته می‌شود. نمونه‌ها در داخل فریزر در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت نگهداری می‌شوند. سپس، نمونه‌ها را در حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد برده و پلاستیک‌ها را برداشته و اجازه داده می‌شود ۲۴ ساعت در این دما بماند. در انتها، نمونه‌ها به دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) آورده می‌شوند که آنها را نمونه‌های مرطوب می‌نامند [۲۵].

$$N_f = K_1\left(\frac{1}{\sigma_t}\right)^{K_2} \quad (۳)$$

بارگذاری آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم با نرخ بارگذاری ۵/۰۸ سانتی‌متر (۲ اینچ) بر دقیقه انجام می‌شود تا لحظه‌ای که نمونه گسیخته شود. مقدار بار در لحظه گسیختگی ثبت می‌شود. با استفاده از رابطه (۷) مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌ها بدست می‌آید [۲۵].

که در آن ITS : مقاومت کششی غیر مستقیم (kPa)، F: حداکثر مقدار بار قائم وارد شده (kN)، t: ضخامت میانگین نمونه‌های آسفالتی (m)، و d: قطر نمونه‌های آسفالتی (m).

میانگین مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های خشک (سه نمونه) و مرطوب (سه نمونه) جداگانه حساب می‌شود. حساسیت رطوبتی یا پتانسیل عریان‌شدگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی با نسبت میانگین مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب به خشک (برحسب درصد) به دست می‌آید [۲۵].

$$ITS = \frac{2F}{t\pi d} \quad (۴)$$

که در آن TSR: نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم، ITS_{wet}: مقدار میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی در شرایط مرطوب (kPa)، ITS_{dry}: مقدار میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی در شرایط خشک (kPa).

۴- نتایج و بحث

۴- ۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌ها

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی چهار نوع سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سنگدانه بتن ضایعاتی بعنوان درشت‌دانه در مقایسه با سنگدانه طبیعی دارای وزن مخصوص حجمی کمتر و جذب آب بیشتری است. زیرا وجود لایه ملات

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های طرح اختلاط مارشال

Table 3. Results of Marshall mixing design experiments

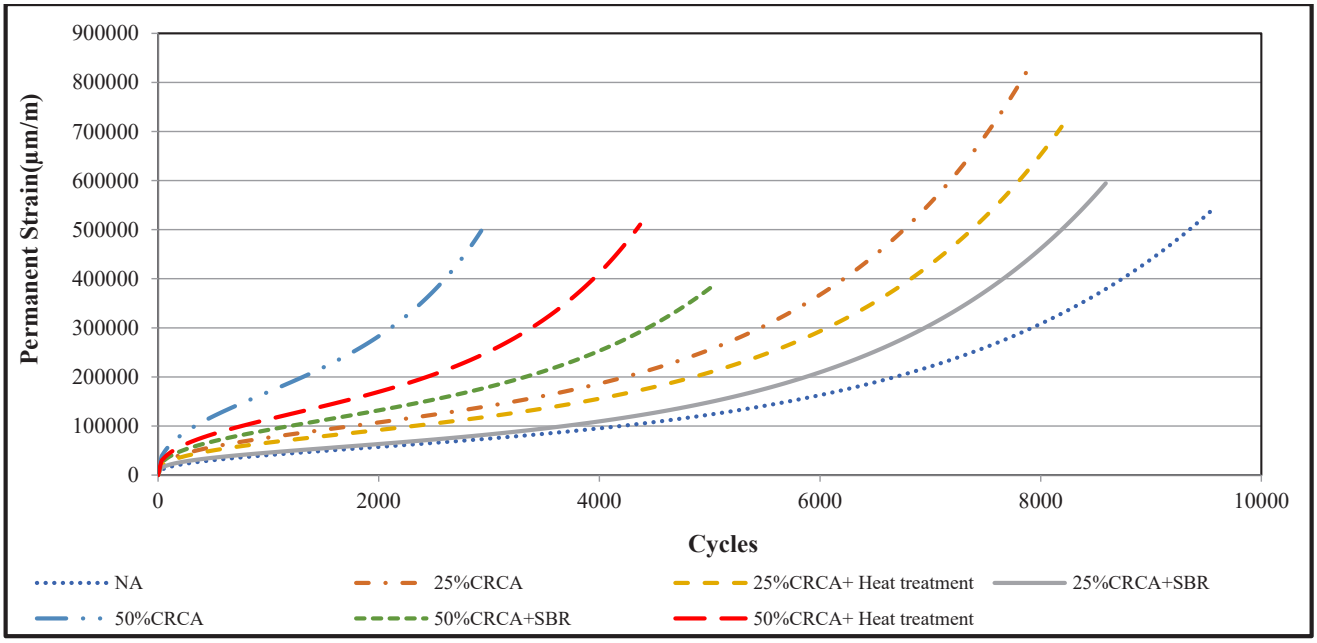
خصوصیات	مخلوط کنترل	حاوی ۲۵ درصد سنگدانه بتن ضایعاتی			حاوی ۵۰ درصد سنگدانه بتن ضایعاتی			مقادیر مجاز
		اصلاح نشده	اصلاح شده توسط SBR	اصلاح‌شده توسط حرارت دادن	اصلاح نشده	اصلاح شده توسط SBR	اصلاح‌شده توسط حرارت دادن	
مقدار قیر بهینه (٪)	۵	۵/۷	۵/۳	۵/۴	۶/۴	۵/۶	۵/۸	---
وزن واحد حجم (g/cm^3)	۲/۳۶۵	۲/۳۲۹	۲/۳۵۱	۲/۳۴۴	۲/۲۵۱	۲/۲۸۹	۲/۲۷۵	---
مقاومت مارشال (kg.f)	۱۴۳۰	۱۰۸۷	۱۳۹۵	۱۳۰۲	۷۱۵	۱۰۳۴	۹۷۶	۸۰۰ <
روانی مارشال (mm)	۲/۲۴	۳/۱۸	۲/۴۵	۲/۵۹	۳/۷۷	۳/۰۶	۳/۲۱	۳/۵-۲
فضای خالی (٪)	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۵-۳
فضای خالی مصالح سنگی (٪)	۱۵/۶۵	۱۴/۴۷	۱۵/۲۴	۱۵/۳۹	۱۳/۶۶	۱۴/۵۵	۱۴/۸۳	۱۴ <
فضای خالی پر شده با قیر (٪)	۷۴/۴۴	۷۲/۳۶	۷۳/۷۵	۷۴	۷۰/۷۲	۷۲/۵۱	۷۳/۰۳	۷۵-۶۵

سیمان چسبیده بسیار متخلخل در سنگدانه‌های بتن ضایعاتی موجب افزایش جذب آب و کاهش چگالی آن می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که پوشش سطح سنگدانه‌های بتن ضایعاتی با پلیمر استایرن بوتادین لاستیک وزن مخصوص حجمی را افزایش و جذب آب را کاهش می‌دهد. زیرا استایرن بوتادین لاستیک با نفوذ در فضای خالی سنگدانه بتن ضایعاتی وزن آن را به ازای حجم واحد افزایش می‌دهد و همچنین بعنوان عایق بر روی سطوح سنگدانه بتن ضایعاتی عمل کرده و نفوذپذیری آن را کاهش می‌دهد. علاوه براین اصلاح فیزیکی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی توسط حرارت دادن موجب جدا شدن ملات سیمان متخلخل از سطح سنگدانه‌های طبیعی شده و درنتیجه باعث افزایش چگالی و کاهش نفوذپذیری در سنگدانه‌های اصلاح‌شده می‌شود.

ازطرف‌دیگر، نتایج آزمایش سایش لس‌آنجلس نشان می‌دهد که سنگدانه بتن ضایعاتی بعنوان درشت‌دانه بدلیل وجود ملات سیمان ضعیف بر روی سطوح خود دارای سختی کمتری در مقایسه با سنگدانه طبیعی می‌باشد. همچنین اصلاح شیمیایی (تسلیح و تثبیت ملات سیمان توسط استایرن بوتادین لاستیک) و فیزیکی (جداسازی ملات سیمان) سنگدانه‌های بتن ضایعاتی موجب افزایش سختی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بعنوان درشت‌دانه می‌شود. علاوه‌براین، نتایج آزمایش دوام نشان می‌دهد که سنگدانه‌ی بتن ضایعاتی بعنوان درشت‌دانه در مقایسه با سنگدانه طبیعی در برابر عوامل جوی از مقاومت کمتری برخوردار است و اصلاح فیزیکی و شیمیایی آنها بطور محسوسی مقدار دوام را افزایش می‌دهد.

۴- ۲- طرح اختلاط

همانطور که نتایج ارائه شده در جدول (۳) نشان می‌دهد استفاده از سنگدانه‌های درشت‌دانه بتن ضایعاتی بعنوان سنگدانه جایگزین در مخلوط‌های آسفالتی موجب افزایش مقدار قیر بهینه می‌شود. زیرا سنگدانه‌ی بتن ضایعاتی بدلیل وجود ملات سیمان متخلخل بر روی سطح خود، میزان جذب قیر را افزایش می‌دهد. اما استفاده از پوشش پلیمر استایرن بوتادین لاستیک بدلیل اینکه فضای خالی ملات سیمات را پر و بعنوان عایق عمل می‌کند، بطور قابل‌توجهی مقدار قیر بهینه را در مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌شده کاهش می‌دهد. علاوه‌براین، اصلاح سنگدانه‌های بتن ضایعاتی به‌روش فیزیکی هم موجب کاهش مصرف قیر در مخلوط‌های آسفالتی حاوی آنها می‌شود زیرا در پروسه حرارت دادن ملات سیمان متخلخل و ناپایدار از سطوح سنگدانه‌های بتن ضایعاتی جدا می‌شود. ازطرف دیگر، نتایج نشان می‌دهد که مقادیر استقامت مارشال برای تمامی نمونه‌ها بجز نمونه حاوی ۵۰ درصد سنگدانه‌های درشت‌دانه بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده بیشتر از مقدار حداقل مجاز است. همچنین استفاده از سنگدانه‌های درشت‌دانه بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده تاثیر منفی بر مقدار روانی مارشال دارد بطوریکه مخلوط‌کنترل کمترین و مخلوط حاوی ۵۰ درصد سنگدانه‌های درشت‌دانه بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده بیشترین مقدار را دارند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که اصلاح سنگدانه‌های درشت‌دانه بتن ضایعاتی به دو روش فیزیکی و شیمیایی با افزایش استقامت مارشال و کاهش روانی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی آنها موجب افزایش کیفیت روسازی می‌شوند.



شکل ۳. کرنش دائمی در مقابل تعداد چرخه‌های بارگذاری برای نمونه‌های مختلف

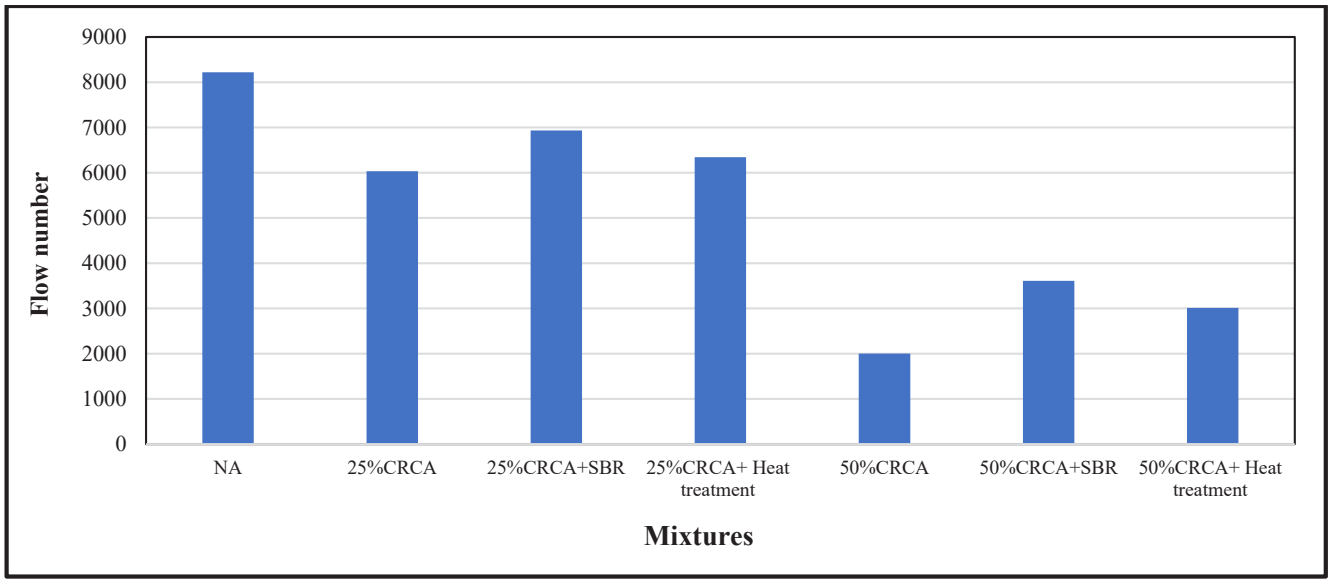
Fig. 3. Permanent strain versus the number of loading cycles for different samples

نتایج نشان می‌دهند که درصد فضای خالی مصالح سنگی با مقدار ۱۵٫۶۵ در مخلوط کنترل از مقدار حداقل مورد نیاز (۱۴ درصد) بیشتر است و استفاده سنگدانه‌های بتن‌ضایعاتی اصلاح‌نشده در مخلوط‌های آسفالتی موجب کاهش آن می‌شود به گونه‌ای که در مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد بتن ضایعاتی از مقدار مجاز تخطی می‌کند. اما استفاده از دو روش اصلاح شرایط را بهبود می‌بخشد و روش فیزیکی در مقایسه با روش شیمیایی موثرتر است. همچنین استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بدلیل تخلخل و جذب آب بالا موجب کاهش درصد فضای خالی پرشده با قیر مخلوط‌های آسفالتی حاوی آنها می‌شود. اما اصلاح سنگدانه‌های بتن به روش شیمیایی و فیزیکی که بترتیب موجب کاهش نفوذپذیری و جداسازی ملات سیمان می‌شوند موجب افزایش درصد فضای خالی پرشده با قیر می‌گردند.

۴- ۳- آزمایش خزش دینامیکی

منحنی خزش نمونه‌های کنترل و اصلاح‌شده در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۳ نشان داده شده است. از آنجا که گرادیان منحنی خزش در ناحیه دوم تقریباً ثابت است اگر خطی در این ناحیه بر منحنی برازش شود، مشاهده می‌شود که بیشترین و کمترین شیب بترتیب متعلق به نمونه حاوی ۵۰ درصد سنگدانه‌های درشت‌دانه بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده و نمونه کنترل می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های درشت‌دانه بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده با سرعت بیشتری تخریب می‌شوند. علاوه‌براین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه‌های درشت‌دانه بتن ضایعاتی اصلاح‌شده به دو روش فیزیکی و شیمیایی بدلیل اینکه در مقایسه با سنگدانه بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده از کیفیت بالاتری برخوردار است موجب کاهش شیب فوق و افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی حاوی آنها در برابر شیارشدگی می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که اصلاح شیمیایی سنگدانه‌های بتن‌ضایعاتی در مقایسه با اصلاح فیزیکی در کاهش پتانسیل شیارشگی نمونه‌های حاوی آنها مفیدتر واقع شده‌اند. البته قابل ذکر است که اصلاح سنگدانه‌های بتن ضایعاتی به دو روش فیزیکی و شیمیایی علی‌رغم اینکه پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی آنها را در مقایسه با مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده کاهش می‌دهد اما همچنان از مخلوط کنترل بیشتر می‌باشند.

عدد روانی که شاخصی مناسب جهت تعیین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد با استفاده از روش فرانکن محاسبه و نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اضافه‌کردن سنگدانه‌های درشت‌دانه بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده تا مقدار ۵۰ درصد موجب کاهش عدد روانی و مقاومت شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی شده است. همچنین استفاده از پوشش پلیمر استایرن بوتادین لاستیک و جداسازی ملات سیمان توسط حرارات توانسته است مقادیر عدد روانی را افزایش دهد.



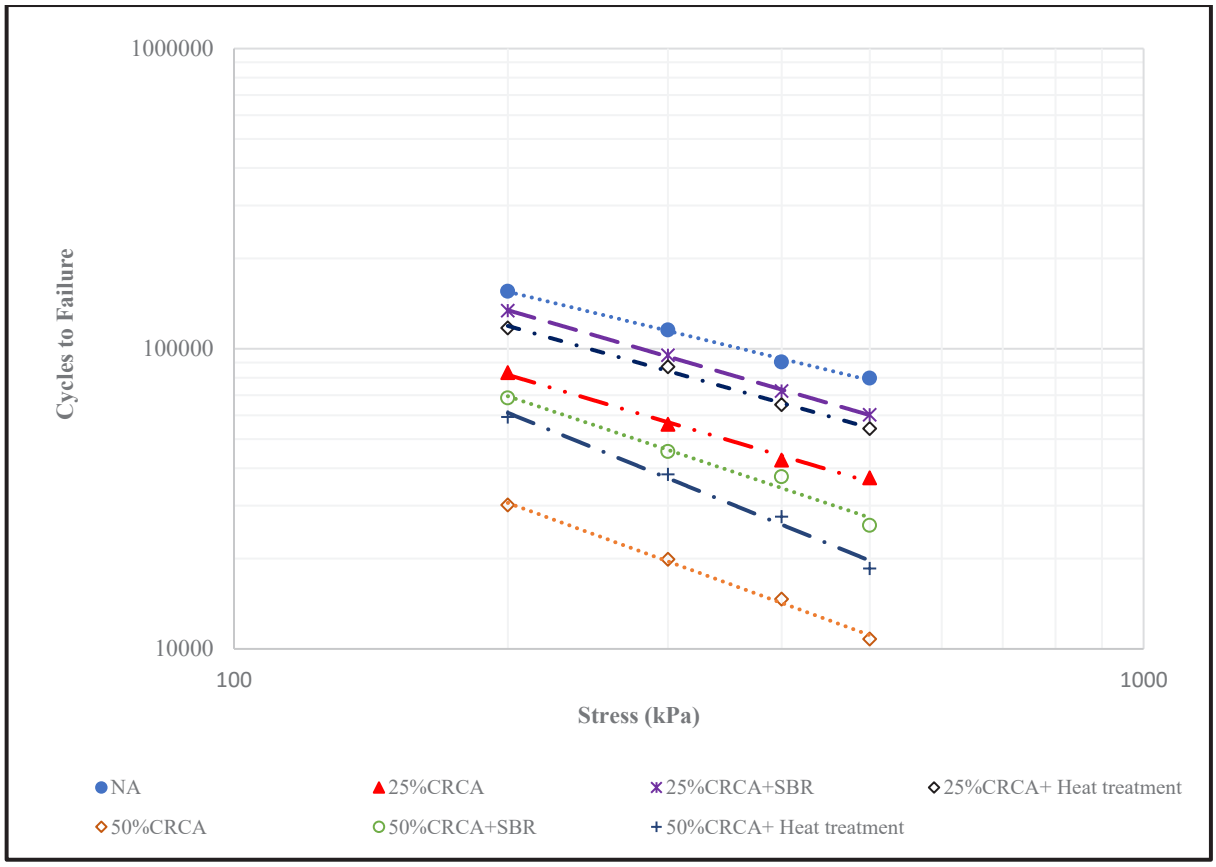
شکل ۳. کرنش دائمی در مقابل تعداد چرخه‌های بارگذاری برای نمونه‌های مختلف

Fig. 3. Permanent strain versus the number of loading cycles for different samples

آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم

در این پژوهش عمر خستگی نمونه‌های آسفاتی به روش کشش غیرمستقیم تعیین شد و نتایج آنها در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۵ خطوط رگرسیون از میان نمونه‌ها در هر سطح تنش رسم شد. نتایج حاصله یک رابطه خطی مناسب بین لگاریتم تنش قائم و لگاریتم عمر خستگی را نشان می‌دهد. همچنین معادله خستگی، مقادیر k_1 و k_2 و ضرایب همبستگی مربوط به هر یک از مخلوطها در جدول ۴ آورده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده بعنوان بخشی از درشت‌دانه در مقادیر ۲۵ و ۵۰ درصد موجب کاهش عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی می‌شود و با افزایش مقدار آن نرخ کاهش بیشتر است. زیرا سنگدانه‌های بتن ضایعاتی علی‌رغم اینکه دارای چسبندگی مناسب‌تری با قیر هستند که می‌تواند به بهبود عمر خستگی کمک نماید اما بدلیل ملات سیمان بسیار متخلخل و ضعیف در سطوح خود ظرفیت باربرای نمونه‌های آسفالتی را بشدت کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پوشش پلیمر استایرن بوتادین لاستیک بر روی سطوح سنگدانه‌های بتن ضایعاتی با نفوذ در فضای خالی و مسلح کردن آنها موجب بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آنها می‌شود. در نتیجه نمونه‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌شده به روش شیمیایی در مقایسه با نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده دارای عمر خستگی بیشتر و نزدیک به مخلوطهای کنترل است. همچنین اصلاح فیزیکی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی با جداسازی ملات سیمان سست از سطح سنگدانه‌های بتن توسط حرارت دادن مشابه اصلاح شیمیایی موجب بهبود عملکرد خستگی نمونه‌های آسفالتی حاوی آنها شده است اما در مقایسه با اصلاح شیمیایی تاثیرگذاری آن کمتر بوده است. زیرا در اصلاح به روش شیمیایی علاوه بر تثبیت ملات سیمان توسط پلیمر استایرن بوتادین لاستیک، کیفیت چسبندی در سطح تماس قیر و سندانه بهبود می‌یابد.



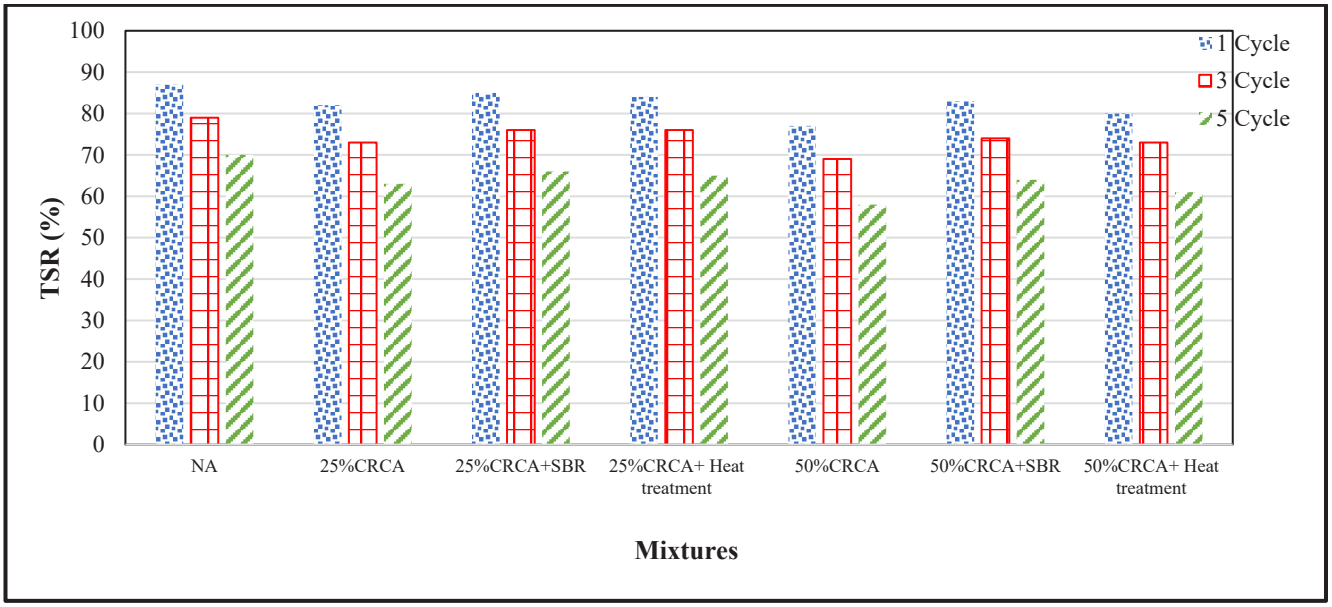
شکل ۵. عمرخستگی در برابر سطوح تنش برای مخلوطهای آسفالتی پایه و اصلاح شده

Fig. 5. Fatigue life versus stress levels for the base and modified asphalt mixtures

جدول ۴. رابطه خستگی ارائه شده برای انواع مخلوطهای آسفالتی

Table 4. Fatigue relationship for various types of asphalt mixtures

K_2	K_1	معادله خستگی	نوع مخلوط	
-0.742	8×10^6	$N_f=8\times10^6\sigma^{-0.742}$	کنترل	
-0.896	9×10^6	$N_f=9\times10^6\sigma^{-0.896}$	اصلاح نشده	حاوی ۲۵ درصد سنگدانه بتن ضایعاتی
-0.879	1×10^7	$N_f=1\times10^7\sigma^{-0.879}$	اصلاح شده توسط SBR	
-0.653	1×10^7	$N_f=1\times10^7\sigma^{-0.653}$	اصلاحشده توسط حرارت دادن	
-1.108	1×10^7	$N_f=1\times10^7\sigma^{-1.108}$	اصلاح نشده	حاوی ۵۰ درصد سنگدانه بتن ضایعاتی
-1.017	2×10^7	$N_f=2\times10^7\sigma^{-1.017}$	اصلاح شده توسط SBR	
-1.237	4×10^7	$N_f=4\times10^7\sigma^{-1.237}$	اصلاحشده توسط حرارت دادن	



شکل ۶. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم برای مخلوطهای آسفالتی پایه و اصلاح شده ۱.

Fig. 6. Indirect tensile strength ratio for the basic and modified asphalt mixtures

۴- ۴- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

شاخص نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوطهای آسفالتی یکسان در شرایط مرطوب به خشک متداول‌ترین شاخص در تعیین حساسیت رطوبتی یک مخلوط آسفالتی قبل از اجرای آن است که می‌تواند به پیش‌بینی عملکرد مخلوط آسفالتی در مرحله طراحی کمک نماید. شکل ۶ نتایج آزمایش شاخص حساسیت رطوبتی برای نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. شاخص نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب به خشک (به صورت درصد) همواره از ۱۰۰ کمتر است زیرا این انتظار وجود دارد که مقاومت مخلوط آسفالتی در نتیجه فرآیند اشباع‌شدن و قرارگرفتن در سیکل یخ–ذوب کاهش یابد. کاهش در مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در شرایط مرطوب را می‌توان به از دست دادن چسبندگی مخلوط یا پیوستگی قیر ناشی از حضور نمونه‌ها در رطوبت نسبت داد. در واقع حضور آب باعث می‌شود که سیستم دچار بی نظمی‌بیشتر شود و مقدار انرژی آزاد گیبس کاهش یابد که باعث می‌شود جداشدگی قیر از سطح سنگدانه یا عریان‌شدگی به صورت یک واکنش خودبه‌خودی رخ دهد.

بنابراین تمامی نمونه‌های آسفالتی (کنترل و اصلاح‌شده) در شریط مرطوب دارای مقاومت کششی کمتری می‌باشند. تاثیر رطوبت بر کاهش مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی بدلیل نفوذپذیری بسیار بالای آنها چشمگیر است. اما در نمونه‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌شده تاثیر منفی رطوبت در کاهش مقاومت کششی کمتر است زیرا پوشش سنگدانه‌های بتن ضایعاتی توسط پلیمر استایرن بوتادین لاستیک و جداسازی ملات سیمان متخلل از سطوح آنها موجب کاهش نفوذپذیری و افزایش چسبندگی سنگدانه‌های بتن با قیر می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش امکان استفاده از سنگدانه‌های درشت‌دانه بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده به دو روش فیزیکی و شیمیایی بعنوان بخشی از سنگدانه در مخلوطهای آسفالتی ارزیابی شد. ازاین‌رو، از آزمایش‌های خستگی به روش کشش غیر مستقیم، خزش دینامیکی و مقاومت کششی غیرمستقیم بترتیب جهت تعیین عمرخستگی، پتانسیل شیارشدگی و حساسیت رطوبتی استفاده گردید. براساس آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح و مخلوطهای آسفالتی مختلف نتایج زیر قابل ارائه می‌باشد:

- نتایج آزمایش‌های مختلف بر روی سنگدانه‌ها نشان داد که سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح نشده در مقایسه سنگدانه‌های طبیعی بدلیل وجود ملات سیمان بسیار متخلخل و ضعیف بر روی سطوح خود

دارای خصوصیات مکانیکی و فیزیکی نامطلوبی می‌باشد. اما اصلاح آنها به دو روش فیزیکی و شیمیایی علاوه‌براینکه قابلیت جذب آن را کاهش می‌دهد خصوصیات مکانیکی آنها را بهبود می‌بخشد.

- نمونه حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح نشده در مقایسه با مخلوط کنترل دارای مقاومت مارشال کمتر و روانی مارشال بیشتری است و استفاده از سنگانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح شده موجب بهبود خصوصیات فوق می‌شود.
- استفاده از سنگانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح نشده در مخلوط‌های آسفالتی بدلیل تخلخل بالای ملات سیمان چسبیده موجب افزایش مقدار قیر بهینه و کاهش مقدار قیر موثر می‌شود. همچنین در مخلوط‌های حاوی سنگانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح شده به روش شیمیایی بدلیل اینکه پلیمر استایرن بوتادین لاستیک بعنوان عایق عمل می‌کند و نفوذپذیری را کاهش می‌دهد، مقدار قیر بهینه کاهش می‌یابد.
- استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی در تمامی مقادیر موجب کاهش ظرفیت باربری و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و اصلاح آنها به دو روش فیزیکی و شیمیایی عملکردشان را بهبود می‌بخشد. همچنین نتایج نشان داد که مخلوط آسفالتی حاوی ۵۰ درصد سنگدانه‌های بتن ضایعاتی دارای کمترین عمر خستگی می‌باشد.
- مقادیر عدد روانی نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده و شده در تمامی مقادیر موجب کاهش این شاخص و افزایش پتانسیل شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. زیرا مشخصات سنگدانه‌ها یکی پارامترهای بسیار تاثیرگذار بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در دماهای بالا و کنترل خرابی شیارشدگی می‌باشد.
- مقاومت کششی تمام نمونه‌های آسفالتی در شرایط مرطوب بدلیل تاثیر منفی آن بر مقدار چسبندگی قیر–سنگدانه کاهش می‌یابد اما در مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های بتن ضایعاتی اصلاح‌نشده بدلیل نفوذپذیری زیاد آنها این مقدار کاهش چشمگیر است.
- نتایج آزمایش‌های مختلف نشان داد که مقدار بهینه سنگدانه بتن‌ضایعاتی بعنوان درشت‌دانه در مخلوط‌های آسفالتی ۲۵ درصد می‌باشد.

قدردانی:

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی به شماره قرداد ۱۴۰۰/۳۶۷/۱۲۰۶۰ تاریخ ۱۴۰۰/۰۸/۰۳ با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه بجنورد انجام شده است.

منابع

[1] S. Ektas, M. Karacasu, Use of Recycled Concrete in Hot Mix Asphalt and an ANN model for Prediction of Resilient Modulus, Ekoloji Dergisi, 21(83) (2012).

[2] M.M. Rafi, A. Qadir, S. Ali, S.H. Siddiqui, Performance of hot mix asphalt mixtures made of recycled aggregates, Journal of Testing and Evaluation, 42(2) (2014) 357-367.

[3] Y. Huang, R.N. Bird, O. Heidrich, A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements, Resources, conservation and recycling, 52(1) (2007) 58-73.

[4] J. Zhang, C. Shi, Y. Li, X. Pan, C.-S. Poon, Z. Xie, Performance enhancement of recycled concrete aggregates through carbonation, Journal of Materials in Civil Engineering, 27(11) (2015) 04015029.

[5] S. Ismail, M. Ramli, Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications, Construction and Building Materials, 44 (2013) 464-476.

[6] H.K.A. Al-Bayati, P.K. Das, S.L. Tighe, H. Baaj, Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate, Construction and Building Materials, 112 (2016) 284-298.

[7] A.M. Grabiec, J. Klama, D. Zawal, D. Krupa, Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition, Construction and Building Materials, 34 (2012) 145-150.

[8] M. Arabani, F. Moghadas Nejad, A. Azarhoosh, Laboratory evaluation of recycled waste concrete into asphalt mixtures, International Journal of Pavement Engineering, 14(6) (2013) 531-539.

[9] M. Arabani, A. Azarhoosh, The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 35 (2012) 1-7.

[10] S. Paranavithana, A. Mohajerani, Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete, Resources, Conservation and Recycling, 48(1) (2006) 1-12.

[11] A. Pasandín, I. Pérez, Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion, Construction and Building Materials, 55 (2014) 350-358.

[12] I. Pérez, A. Pasandín, Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates and crumb rubber, Journal of Cleaner Production, 165 (2017) 405-414.

[13] J. Ma, D. Sun, Q. Pang, G. Sun, M. Hu, T. Lu, Potential of recycled concrete aggregate pretreated with waste cooking oil residue for hot mix asphalt, Journal of Cleaner Production, 221 (2019) 469-479.

[14] H.K.A. Al-Bayati, S.L. Tighe, J. Achebe, Influence of recycled concrete aggregate on volumetric properties of hot mix asphalt, Resources, Conservation and Recycling, 130 (2018) 200-214.

[15] A. Azarhoosh, M. Koohmishi, G.H. Hamedi, Rutting resistance of hot mix asphalt containing coarse recycled concrete aggregates coated with waste plastic bottles, Advances in Civil Engineering, (2021).

[16] A. Azarhoosh, M. Koohmishi, F. Moghadas Nejad, Evaluation of fatigue cracking of hot-mix asphalts containing recycled concrete aggregates coated with waste plastic bottles using thermodynamic parameters, The Journal of Adhesion, (2021) 1-21.

[17] V.W. Tam, C.M. Tam, K.N. Le, Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, Resources, Conservation and Recycling, 50(1) (2007) 82-101.

[18] M. Pepe, R.D. Toledo Filho, E.A. Koenders, E. Martinelli, Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete, Construction and Building Materials, 69 (2014) 124-132.

[19] ASTM. D6927–15, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow Ofasphalt Mixtures, West Conshohocken, PA., in, 2015.

[20] T.B. Moghaddam, M. Soltani, M.R. Karim, Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test, Materials & Design, 53 (2014) 317-324.

[21] S.W. Goh, Z. You, A simple stepwise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test, Construction and Building Materials, 23(11) (2009) 3398-3405.

[22] F. Zhou, T. Scullion, L. Sun, Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes, Journal of Transportation Engineering, 130(4) (2004) 486-494.

[23] L. Francken, Permanent deformation law of bituminous road mixes in repeated triaxial compression, in: Volume I of proceedings of 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, August 22-26, 1977.

[24] CEN, Test methods for hot mix asphalt—Part 24: Resistance to fatigue. EN12697-24, in, British Standards Institution: London., 2012.

[25] M. Solaimanian, R.F. Bonaquist, V. Tandon, Improved conditioning and testing procedures for HMA moisture susceptibility, Transportation Research Board, 2007.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Azarhoosh, Investigating the effect of using modified recycled concrete aggregate on the volumetric and mechanical properties of hot asphalt mixes , Amirkabir J. Civil Eng., 55(4) (2023) 757-770.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21610.7777