



## Application of Pull-off Test for Evaluating Bond Strength Properties of Modified Bitumen Emulsions

M. Negarchi\*, A. Kavussi

Highway and Transportation Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University.

**ABSTRACT:** Reduced adhesion properties between aggregate particles and bitumen binders, and reduced cohesion within the bitumen binders in asphalt mixes result in stripping and segregation distresses in road pavements. These will ultimately result in pothole formation and other severe distress in pavements. In this research, with the aim of determination of adhesion and cohesion properties between aggregate particles and bitumen binders, the pull-off testing method, which is commonly used in characterizing road marking materials, was used to determine tensile strength values that are created between aggregate particles and bitumen emulsions. Two conventional cationic bitumen emulsions of rapid and medium breaking types were used as control binders. These were then modified using a latex liquid additive at various percentages. Two aggregate types were used, namely granite and a dolomite type. Their mineralogy was determined using the XRF testing method. In addition, the role of other parameters, such as curing time and curing temperature, were determined too. Pull-off testing results showed that modification of bitumen emulsions with %3 latex provided increased adhesion properties and increased durability between bitumen emulsion and the two aggregate types that were selected in this research. It has also resulted that interaction between aggregate particles and the bitumen emulsions was great where latex modified bitumen emulsions were used. By comparing the role of the two aggregate types, it resulted that the dolomite aggregates provided superior adhesion properties. It was concluded that the role of curing time and temperature were dominant in providing adequate adhesion properties between bitumen emulsions and aggregate particles. The increase was more dominant in samples containing latex-modified bitumen emulsions.

### Review History:

Received: Sep. 25, 2020

Revised: Apr. 25, 2021

Accepted: Jun. 25, 2021

Available Online: Jul. 08, 2021

### Keywords:

Bitumen Bond Strength

Bitumen Emulsions

SBR Latex

Aggregate Type

### 1- Introduction

One of the most important parameters in selecting bitumen emulsions for asphalt cold mixes is making sure that adequate adhesion is formed between aggregate particles and the bitumen binder. Reduced adhesion could result in several failure mechanisms, such as adsorption of bitumen emulsion into aggregates surface pores, change in pH values of bitumen emulsion once it is in contact with aggregates, and reduced water of the bitumen emulsion as it is adsorbed by aggregate particles [1]. Parameters such as bitumen emulsion type, aggregate mineral source, weather conditions and traffic loads are also among the factors that affect the adhesion resistance of bitumen emulsion [2]. Various standard testing methods have been proposed to test asphalt mixes, but little provides data with regard to the performance characteristics of mixes [3]. Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument (PATTI) has been used to evaluate adhesion resistance and tensile strength characteristics of aggregate-bitumen combinations and adhesion properties of bitumen. The testing process in that

Bitumen Bond Strength (BBS) is determined is described in AASHTO 91-11 Standard Method [4].

### 2- Methodology

Two aggregate types (granite and dolomite) from two different sources were used for preparing asphalt cold mixes. Granite is an acidic aggregate and in contrast, dolomite contains high percentages of calcium oxide. In cold mixes, the adhesiveness of aggregate particles to bitumen is highly dependent on the aggregate type and the selected bitumen emulsion properties. In this regard, there is a clear difference between the behavior of acidic and alkaline aggregates in mixes. Composition analysis of the aggregates was obtained by applying X-Ray Fluorescence (XRF) testing. Two bitumen emulsions, namely slow and rapid breaking cationic bitumen emulsions, were used to prepare two control cold mixes. These were then modified using Styrene Butadiene Rubber (SBR) latex and a Veloce Rubber. According to ASTM D6372, the minimum percentage of polymer in emulsion mixtures is 3%. This provides enhanced properties to the mix while will not affect much the construction processing phases. Based on this

\*Corresponding author's email: farazneg@yahoo.com





**Fig. 1. Pull of Posi Test AT-A apparatus**

concept, the above two additives were applied at the rate of %3 by weight of the retained binder from the emulsion. This amount provided appropriate homogeneity and consistency to the two modified bitumen emulsions. The SBR latex was consisted of %65 solid granules and had an acidity level of pH=5. With this composition and the above procedure, the modified bitumen emulsion was consistent and had similar consistencies to the control bitumen emulsions.

The amount of emulsion bitumen required inside the silicon is calculated from Equation (1) below:

$$EA(g) = \frac{0.45}{AC(\%)} \quad (1)$$

In this Equation, AC is the percentage of bitumen in the emulsion bitumen and EA is the weight of the emulsion bitumen that is poured into each of the silicone molds. In the next step, the aggregate plates, silicon and emulsion bitumen should be stored in the oven to perform the curing process. The temperature conditions selected in this study were 20 and 40 degrees Celsius, which was selected in accordance with the usual environmental conditions. The curing time of the samples was 1, 3 and 24 hours, respectively, because according to ISSA TB 109, the fast-setting time for reopening traffic in 60 minutes and achieving a minimum torsion of 20 kg.cm is done. Figure 1 shows how to perform the tensile strength test with the Posi Test AT-A automatic device. The piston chassis is pulled back and placed on the steering surface. By applying a slight force to the handle, the device is locked and ready to start the test. The test temperature is 25 degrees Celsius.

Interpretation and analysis of the surface failure of bitumen samples were performed by observation with the naked eye and digital photography analysis. Failure between bitumen and aggregate can occur in different ways. One is the failure inside the bitumen and the other is occurred between the bitumen and the surface of the aggregate. To analyze the failure of the surface of emulsion bitumen samples, if the bitumen remains completely on the surface of the aggregate, failure has occurred inside the bitumen. If the bitumen is completely separated from the surface of the aggregate, a

failure has occurred between the bitumen and the surface of the aggregate. A third case may occur in which the bitumen is incompletely separated from the Aggregate surface. Using Image J software, it is possible to detect the type of surface rupture.

### 3- Results and Discussion

In this study, to evaluate the adhesion resistance of emulsion bitumen and aggregates, 288 samples were stretched and removed. According to the AASHTO standard, tensile strength test and removal of emulsion bitumen from the aggregate surface in dry conditions were performed. The bond strength of granite was more rapid than that of dolomite. Despite the rapid setting of emulsion bitumen on granite at processing times of 1 and 3 hours, the highest strength was obtained in dolomitic ore. The results of tensile and tensile strength tests in emulsion and aggregate bitumen system showed that at two temperatures of 20 and 40°C, the adhesion resistance of quick-breaking emulsion bitumen and modified quick-breaking emulsion bitumen on dolomite aggregate compared to granite 9% and 10%, respectively Increased. Also, at 20 and 40°C, the adhesion resistance of bitumen emulsion and modified bitumen in modified dolomitic aggregate increased by 30% and 10%, respectively, compared to granite.

Due to the XRF test results of dolomite aggregate and its high calcium oxide content, this aggregate has a playful property and is hydrophobic and aspheric. This is one of the reasons for its superior adhesion resistance to dolomitic aggregates after the final setting of emulsion bitumen. This finding is in good agreement with the results of previous research in this field. It has also been observed in previous studies that the adhesion strength of bitumen to aggregate, as far as it is related to aggregate, in addition to being acidic or alkaline, also depends on the aggregate material and its surface texture [5].

Modification of emulsion bitumen by adding SBR rubber latex increased the adhesion resistance compared to unmodified emulsion bitumen. This increase in bitumen emulsion was more rapid than that of slurry emulsion. The results showed that with the addition of 3% SBR rubber, the adhesion resistance between dolomite and bitumen emulsion at 20 and 40°C increased by 13% and 16%, respectively, and in bitumen emulsion increased by 3% and 5%, respectively. Also, the adhesion resistance between granite aggregate and bitumen emulsion at 20 and 40 ° C increased by 13% and 14%, respectively, and in bitumen emulsion increased by 2% and 3%, respectively. The results obtained from the tensile and tensile strength tests with two types of bitumen and quick-breaking emulsion bitumen show that in the bitumen and aggregate system, the adhesion resistance in bitumen-breaking emulsion bitumen was higher than that of bituminous emulsion. This increase in adhesion resistance in pure emulsion bitumen and dolomite-modified emulsion bitumen systems showed a final 3% and 14.5% increase in final emulsion bitumen involvement. Also, the bond strength of pure emulsion bitumen and latex-modified emulsion bitumen

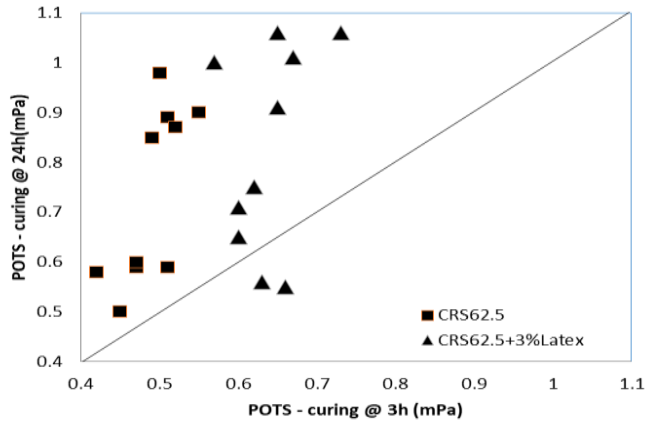


Fig.2. Effect of curing time on POTS values for CRS emulsion

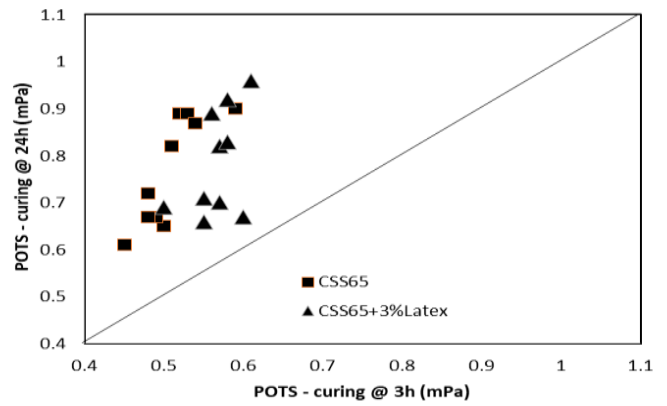


Fig. 3. Effect of curing time on POTS values for CSS emulsion

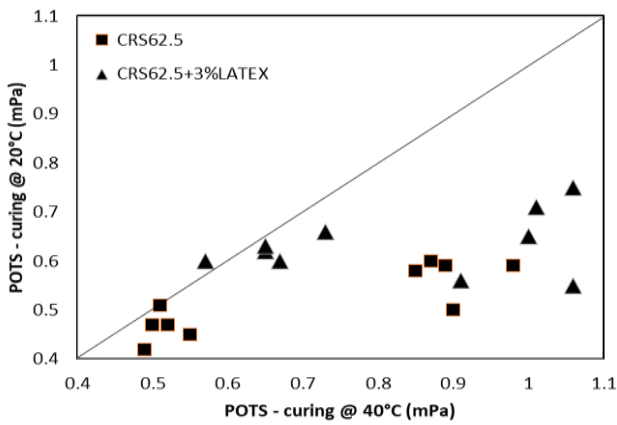


Fig. 4. Effect of temperature on POTS values for CRS emulsion

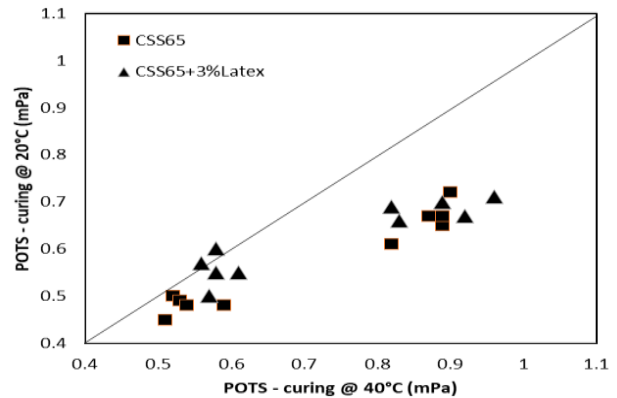


Fig. 5. Effect of temperature on POTS values for CSS emulsion

on granite in the final setting of emulsion bitumen increased by 3% and 15%, respectively. The obtained results show the superiority of adhesion resistance of bituminous emulsion over bituminous emulsion. The degree of this superiority was slight in pure emulsion bitumen but significant in modified emulsion bitumen. Figures 2 and 3 show the diagrams of the effect of curing time of 3 and 24 hours on the adhesion resistance of bitumen, brittle and modified emulsion of these families. Figure 2 shows that 18 of the 20 available data are located above the equilibrium line. Therefore, increasing the curing time in quick-breaking emulsion bitumen and modified emulsion bitumen has increased the adhesion resistance. Figure 3 also shows that all 20 available data are above the equilibrium line. Therefore, increasing the curing time in bitumen emulsion and its modified emulsion bitumen has increased the adhesion resistance. According to the obtained results, it can be concluded that there is a direct relationship between increasing the adhesion resistance of emulsion bitumen and increasing the curing time.

Figures 4 and 5 show the effect of curing temperatures of 20 and 40°C on the adhesion strength of bitumen, brittle and modified emulsion bitumen's. Figure 4 shows that 18 of the 20 data were below the equilibrium line. The results show that with increasing the curing temperature up to 40°C, the bond strength between bitumen emulsion with dolomite and granite has increased by 53% and 57%, respectively. Also, the bond strength between the bitumen of the quick-breaking emulsion modified with two dolomite and granite aggregates has increased by 54% and 57%, respectively. Therefore, increasing the curing temperature in bitumen emulsion and its modified emulsion bitumen has increased the adhesion resistance. Figure 5 shows that 18 of the 20 data are below the equilibrium line. With increasing the curing temperature up to 40 ° C, the adhesion resistance between bitumen emulsion bitumen with dolomite and granite aggregates has increased by 7% and 33%, respectively. Also, the adhesion resistance of bitumen-modified emulsion bitumen with dolomite and granite aggregates has increased by 9% and 29%,

respectively. Therefore, increasing the curing temperature in slow emulsion bitumen and modified emulsion bitumen has increased the adhesion resistance. According to the obtained results, it can be concluded that increasing the adhesion resistance of emulsion bitumen's is directly related to increasing the processing temperature.

#### 4- Conclusions

The performing tensile and tensile strength tests on samples of emulsion bitumen modified with rubber latex and selecting two types of dolomitic and granite aggregate materials were concluded:

- Increasing the curing time of emulsion bitumen increased the bond strength of bitumen. Considering the appropriate time for setting and processing of emulsion bitumen's was one of the important factors in obtaining quality asphalt pavement.

- Due to the acidity of granite obtained from the results of the XRF test, the bond strength between bitumen and granite aggregate in the first hours of the test was higher than the adhesion resistance of dolomite aggregate. Therefore, in routes that require immediate opening of the road after maintenance, it is important to pay attention to the type and origin of the stone and identify its components.

- As the emulsion bitumen curing temperature increased, the setting between the bitumen and the aggregate occurred faster and yielded positive results for all samples. Therefore, in cold regions, emulsion bitumen will break later and the reopening of the road will be delayed, so when using emulsion bitumen, the ambient temperature conditions should be considered.

- Modification of emulsion bitumen with 3% SBR rubber increased the adhesion resistance between emulsion bitumen and aggregate. The rate of increase in adhesion resistance of modified emulsion bitumen depended on the type of emulsion bitumen and the highest increase in adhesion resistance was obtained in modified early emulsion bitumen.

Comparison of adhesion performance of cationic and slippery cation emulsion bitumen's by Pull-off test showed that the adhesive strength of bitumen emulsion was higher. Slow-breaking cationic emulsion bitumen required more time to fully set between the curing times studied.

#### References

- [1] A. James, Overview of asphalt emulsion, Transportation Research Circular E-C102: Asphalt Emulsion Technology, (2006) 1-15.
- [2] F. Canestrari, F. Cardone, A. Graziani, F.A. Santagata, H.U. Bahia, Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage, Road Materials and Pavement Design, 11(sup1) (2010) 11-32.
- [3] B. Shell, Shell Bitumen Handbook, England, UK, 2003.
- [4] K. Kanitpong, H.U. Bahia, Role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA (with discussion), Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 72 (2003).
- [5] K. Louw, K. Spence, P. Kuun, The use of bitumen emulsions as a cost effective solution for constructing seals during winter, in: Proc., 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA), Sun City, South Africa, 2004.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Negarchi, A. Kavussi, Application of Pull-off Test for Evaluating Bond Strength Properties of Modified Bitumen Emulsions, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 129-132.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19010.7028](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19010.7028)





## استفاده از آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن (Pull off) در تعیین مقاومت چسبندگی قیر های امولسیون اصلاح شده با شیر لاسستیک SBR

محمد نگارچی\*، امیر کاووسی

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران .

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۵  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۴  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

### کلمات کلیدی:

مقاومت چسبندگی قیر  
قیر امولسیون  
شیره لاسستیک SBR  
سنگدانه

**خلاصه:** امروزه وزن و حجم ترافیک به شدت افزایش یافته که باعث ایجاد خرابی های زیاد و نیاز های جدی جهت تعمیر و نگهداری و بهسازی روسازی های آسفالتی شده است. کاهش میزان چسبندگی بین قیر و سنگدانه ها و همچنین کاهش قدرت پیوستگی قیر موجود در مخلوط های آسفالتی که سنگدانه ها را به یکدیگر متصل می کند، باعث عریان شدگی مصالح سنگی و شن زدگی آسفالت می شود. ادامه این خرابی منجر به ایجاد چاله و خرابی های دیگر در روسازی می شود که برای رفع آن ها به انجام عملیات تعمیر و نگهداری اساسی نیاز خواهد بود. به منظور تعیین مقاومت چسبندگی میان قیر و سنگدانه ها در این تحقیق از آزمایش تعیین مقاومت کشش کنده شدن (Pull off) استفاده شد. نمونه ها شامل دو نوع قیر امولسیون کاتیونی زود شکن و کند شکن بودند که همچنین با مقادیر مختلف شیره لاسستیک (SBR) مورد اصلاح قرار گرفتند. سنگدانه های مورد استفاده نیز متشکل از دو نوع سنگدانه گرانی و دولومیتی بودند که خصوصیات اجزاء تشکیل دهنده آن ها با انجام آزمایش XRF تعیین شد. در انجام پژوهش، تاثیر پارامترهای دما و زمان عمل آوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اصلاح قیر امولسیون با ۳ درصد شیره لاسستیک موجب افزایش قابل توجه مقاومت چسبندگی و دوام نمونه ها گردید. همچنین مشاهده شد که تاثیر اندرکنش قیر امولسیون و نوع سنگدانه زیاد است. مقایسه تاثیر دو نوع سنگدانه فوق الذکر حاکی از آن بود که بین قیر و سنگدانه دولومیتی مقاومت چسبندگی بیشتری ایجاد شد. همچنین نتایج نشان داد که اثر دما و زمان عمل آوری در مقاومت چسبندگی قیر های امولسیونی زیاد و این افزایش در نمونه های اصلاح شده با شیره لاسستیک به مراتب بیشتر بود.

### ۱- مقدمه

در طول زمان سکونت بالا و تغییرات شدید دمای محل نگهداری از معایب قیرهای امولسیون است. در مخلوط های آسفالتی گرم، مقاومت چسبندگی داخلی قیر وابسته به ویژگی های قیر و ماستیک های قیر است [۲]. به شکل مشابه، در مخلوط های امولسیونی، مقاومت چسبندگی داخلی لایه نازک قیر وابسته به گیرش امولسیون بوده و مقاومت چسبندگی بین قیر و سنگدانه مولفه مهمی در خصوصیات عملکردی و دوام مخلوط ها می باشد. در صورتی که بین سنگدانه و قیر مقاومت چسبندگی بالایی برقرار باشد، شکست در داخل لایه نازک قیر رخ می دهد. همچنین این امکان وجود دارد که سنگدانه های شکسته شده موجب خرابی مخلوط آسفالتی گردند. بنابراین به طور خلاصه از نظر چسبندگی، خرابی مخلوط های آسفالتی به سه دلیل حادث می شود: ضعف در مقاومت چسبندگی داخلی قیر، ضعف در مقاومت چسبندگی بین قیر و سنگدانه و شکسته شدن سنگدانه های مورد استفاده در مخلوط. علاوه بر این، در مخلوط های امولسیونی و هنگامی که قیر امولسیون

قیر امولسیون از سال ۱۹۲۲ توسط دو دانشمند بریتانیایی تولید و به صورت گسترده در روسازی های طراحی شده با رویه از نوع آسفالت های حفاظتی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، آسفالت های حفاظتی به منظور اصلاح آسیب دیدگی های سطحی، بهسازی موقت و افزایش عمر بهره برداری روسازی آسفالتی استفاده شده است. از نظر زیست محیطی و اقتصادی، امولسیون های قیری مناسب ترین جایگزین برای قیرهای محلول محسوب می شوند. انرژی مصرفی برای گرم کردن آن ها به مراتب کمتر از آسفالت های گرم است. همچنین آلودگی زیست محیطی و خطر اشتعال حلال های نفتی را نیز به دنبال ندارند. در نتیجه با توجه به هزینه حلال های نفتی و شرایط بحران انرژی، قیر امولسیون را می توان بهترین جایگزین برای قیرهای محلول دانست [۱]. قابلیت شکنندگی و دو فاز شدن قیر امولسیون

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: farazneg@yahoo.com



بررسی و بهره‌مندی از نتایج آن ضروری به نظر می‌رسد.

## ۲- مطالعات پیشین

در صنعت قیر و راهسازی برای اولین بار در دهه ۱۹۹۰ از دستگاه مقاومت کشش و کنده شدن پنوماتیک جهت ارزیابی مقاومت چسبندگی میان قیر و سنگ استفاده شده است [۱۱]. مطالعات گذشته نشان از ارتباط مناسب نتایج تست مقاومت کشش و کنده شدن با نتایج آزمایش رد چرخ هامبورگ<sup>۳</sup> [۱۲-۱۴]، آزمایش<sup>۴</sup> DSR [۱۵ و ۱۲] و آزمایش مقاومت کششی مستقیم و غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی دارد که با اطمینان بالا، نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن قابل تعمیم به مخلوط‌های آسفالتی نیز می‌باشد [۱۶ و ۲].

مطالعات گذشته نشان داد که مقاومت کشش و کنده شدن در سیستم‌های قیر و سنگدانه به عواملی چون نرخ بارگذاری [۱۸ و ۱۷]، شرایط زمانی [۲۰ و ۱۹ و ۱۷]، شرایط دمایی [۲۱ و ۲۰ و ۱۷]، سطوح مختلف مورد استفاده [۲۶-۲۲]، شرایط رطوبتی [۲۷-۲۳] بستگی دارد. از آنجا که قیر مواد ویسکوالاستیک بوده و خواص رئولوژیکی دارد، نرخ کشش اعمال شده به نمونه‌ها حائز اهمیت است. ضخامت فیلم نازک قیر نیز روی نتایج اثر گذاشته که در واقع ضخامت انتهایی استاب بیانگر اثر ضخامت فیلم قیر در آزمایش کشش و کنده شدن است [۲۸ و ۱۸]. همچنین مواردی نظیر اصلاح قیر [۳۱-۲۹ و ۲۳]؛ به علاوه پارامترهای نظیر بهبود ترکیبات شیمیایی قیر [۳۲ و ۵]، ویسکوزیته و انرژی سطحی آن [۳۵-۳۳] پارامترهایی هستند که موجب تاثیر بر چسبندگی قیر با سنگدانه‌ها می‌شوند.

نتایج پژوهش‌های مختلف حاکی از تاثیر زیاد نرخ بارگذاری در آزمایش کشش و کنده شدن است [۳۶]. محققین دیگر در طی پژوهشی که بر روی قیرها و سنگ‌های مختلف انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که افزایش طول مدت آزمایش مقاومت چسبندگی خشک سبب بالا رفتن مقاومت چسبندگی می‌گردد [۱۹]. غالباً اصلاح قیر با پلیمر سبب کاهش درصد افت مقاومت چسبندگی در اثر رطوبت و در نتیجه کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها می‌شود. محققین نشان دادند که سنگدانه‌های شکسته رودخانه‌ای در مقایسه با سنگدانه‌های دیگر آسیب رطوبتی کمتری در مخلوط آسفالت داشته‌اند [۲۳]. پژوهش دانشگاه ویسکانسین نشان داد که افزودن پلیمر منجر به بهبود مقاومت چسبندگی میان قیر و سنگدانه و مقاومت چسبندگی داخل لایه نازک قیر شده است [۲۹]. در یک پژوهش از آزمایش مقاومت چسبندگی

به سطح سنگدانه می‌رسد، سازوکار شکست در داخل لایه نازک قیر وابسته به مقاومت چسبندگی بین قیر و سنگدانه خواهد بود [۳]. اندرکنش چسبندگی بین قیر و سطح سنگدانه از لحاظ شیمیایی وابسته به ترکیبات قیر و ذرات سنگدانه‌ها، و از لحاظ فیزیکی وابسته به زبری و میزان تخلخل آن‌ها و همچنین ویسکوزیته قیر است. شرایط عملیاتی و اجرایی همچون دمای محیط، رفتار سنگدانه و مواد افزودنی نیز از جمله عوامل تاثیرگذار در مقاومت چسبندگی بین قیر و سنگدانه است [۴]. یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در استفاده از قیر امولسیون اهمیت دارد، ویژگی چسبندگی آن به سنگدانه است در صورتی که چسبندگی بین قیر امولسیون و سنگدانه‌ها در حد مطلوب نباشد، عملکرد مخلوط به صورت چشمگیری دچار افت خواهد شد. شکست قیر امولسیون به دلیل ایجاد یک یا چند مکانیزم، نظیر جذب ذرات قیر امولسیون توسط سنگدانه‌ها، بالا رفتن میزان PH قیر امولسیون در تماس آن با سنگدانه‌ها، کاهش آب موجود در قیر امولسیون و جذب شدن ذرات قیر در تماس با سنگدانه صورت می‌گیرد [۵]. پارامترهایی همچون نوع قیر امولسیون، جنس سنگدانه‌ها، شرایط آب و هوایی و بارهای ترافیکی نیز از جمله موارد تاثیرگذار در مقاومت چسبندگی قیرهای امولسیونی می‌باشند [۶]. برای بررسی و انتخاب مواد و مصالح مخلوط‌های آسفالت امولسیونی، آزمایش‌های استاندارد مختلفی ارائه شده است [۷]، اما اغلب آن‌ها سطح اطلاعات مناسبی برای مشخصه‌های عملکردی مخلوط ارائه نمی‌دهند.

دستگاه پول-آف به عنوان نسخه اصلاح شده دستگاه ارزیابی مقاومت چسبندگی پنوماتیک (PATTI)<sup>۱</sup> جهت ارزیابی مقاومت چسبندگی بین قیر و سنگدانه و مقاومت چسبندگی در داخل قیر بهره گرفته شده است. فرآیند انجام آزمایش به کمک دستگاه مقاومت کشش و کنده شدن و به اسم آزمایش مقاومت چسبندگی قیر<sup>۲</sup> (BBS) در آیین نامه استاندارد AAS-HTO آورده شده است [۹ و ۸ و ۶]. آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن قیر روشی است که با هدف رفع کاستی‌ها و محدودیت‌هایی که در ارزیابی مقاومت چسبندگی بین قیر و سنگدانه وجود دارد توسعه پیدا کرده است. این آزمایش مطابق استاندارد (AASHTO TP-۹۱, ۲۰۱۱) انجام می‌شود و در دانشگاه‌های ویسکانسین-مدیسون امریکا، آنکونا ایتالیا و استلنبوش آفریقای جنوبی در حال پیشرفت و توسعه است [۱۰]. از آن جایی که ارزیابی این آزمایش با قیر امولسیون تاکنون در ایران مورد بررسی قرار نگرفته است،

3 Hamburg Wheel Tracking Device

4 Dynamic Shear Rheometer

1 Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument

2 Bitumen Bond Strength

جدول ۱. اجزاء مواد تشکیل دهنده سنگ دولومیت و گرانیت مورد استفاده با انجام آزمایش XRF

Table 1. XRF Analysis of the tested Dolomite and Granite aggregates

| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | CaO    | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO   | Na <sub>2</sub> O | کانی‌های تشکیل دهنده  |
|--------------------------------|------------------|--------|------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------|-------|-------------------|-----------------------|
| ۲/۲۷۴                          | ۰                | ۸۲/۰۴۹ | ۰/۶۵۸            | ۰/۱۵۲           | ۰/۱۲۴                         | ۹/۱۴۷            | ۱/۸۷۲                          | ۲/۲۱۰ | ۱/۳۲۵             | درصد وزنی سنگ دولومیت |
| ۲/۳۰۸                          | ۰                | ۲/۱۸۹  | ۶/۱۱۰            | ۰/۱۲۲           | ۰/۱۸۴                         | ۶۹/۹۵۶           | ۱۶/۳۶۰                         | ۰/۸۸۱ | ۱/۸۹۰             | درصد وزنی سنگ گرانیت  |

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مواد و مصالح

در این پژوهش دو سنگ گرانیتی و دیگری دولومیتی مورد آزمایش قرار گرفتند. سنگ گرانیتی از معدن طالقان و سنگ دولومیتی از معدن اسب چران شهرستان دماوند تهیه شده است. سنگ گرانیت یک سنگ اسیدی است و بر خلاف آن، سنگ دولومیت با درصد بالای اکسید کلسیم جزو سنگ‌های بازی است. همه انواع سنگ‌ها به طور یکسانی به قیر نمی‌چسبند و تفاوت مشخصی بین رابطه سنگ‌های اسیدی و سنگ‌های بازی با قیر امولسیون وجود دارد. در این تحقیق، نوع و درصد کانی‌های تشکیل دهنده هر کدام از سنگ‌ها از طریق تحلیل عنصری به روش XRF<sup>۳</sup> به دست آمد. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM-EI621 [۳۸] انجام و نتایج حاصله آن در جدول ۱ ارائه شده است.

قیرهای امولسیونی کندشکن و تندشکن به صورت اصلاح نشده و اصلاح شده با افزودن شیره لاستیک SBR ولوچه به میزان ۳ درصد وزنی به روش پس اختلاط مورد استفاده قرار گرفتند. دلیل انتخاب شیره لاستیک SBR، مشکلات پایداری و جداسازی فاز در ارتباط با استفاده از اصلاح کننده‌های پلیمری جامد، به طور کلی پیش اختلاط پلیمرهای جامد در دمای بالا با قیر قبل از امولسیون سازی را ضروری می‌کند پس افزودن اصلاح کننده به قیر امولسیون نهایی به دلیل نیاز به اختلاط کامل، پیوسته و قوی برای اطمینان از پخش مناسب و همگن پلیمر، کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق آیین نامه ASTM D6372 حداقل درصد پلیمر در مخلوط‌های امولسیون، ۳ درصد است. شیره لاستیک SBR مورد استفاده با پایه جامد ۶۵ درصد وزنی و اسیدیته ۵ می‌باشد که با مشخصات قیرهای امولسیون

جهت ارزیابی مقاومت بین سنگدانه‌ها و قیر امولسیون استفاده شده است. قیر مورد استفاده، قیر امولسیون کاتیونی و ماستیک سرد بوده و از فیلر آهکی برای ساختن ماستیک استفاده شده است. سنگدانه‌ها از انواع آهکی و بازالتی و آزمایش‌ها در دو دمای ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام شدند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش دمای عمل‌آوری، مقاومت چسبندگی میان قیر و سنگدانه افزایش می‌یابد [۲۱]. در پژوهش دیگری با به کارگیری آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن جهت ارزیابی تاثیر قیر امولسیون، نتیجه گردید که زبری سطح سنگدانه‌های مورد استفاده و فواصل عمل‌آوری از عوامل مهم در افزایش مقاومت چسبندگی می‌باشند [۳۷].

استفاده از آزمایش مقاومت چسبندگی با استفاده از دستگاه کشش و کنده شدن در این پژوهش، با اهداف مختلفی صورت گرفت؛ همانند: استفاده از یک روش ارزیابی که ویژگی‌های مقاومت چسبندگی، خاصیت چسبندگی و سازگاری قیر امولسیون و سنگدانه را مشخص می‌کند. به علاوه، با توجه به پژوهش‌های انجام گرفته در داخل و خارج از کشور بر روی قیرهای خالص و قیرهای اصلاح شده، ارزیابی این آزمایش با قیرهای امولسیونی که استفاده وسیع در مخلوط‌های آسفالتی دارند، مورد نیاز است. در این پژوهش، تاثیر عوامل خارجی (دمای میانی محیط و زمان عمل‌آوری و ...) و تاثیر نوع مصالح و مواد مورد استفاده (نوع قیر امولسیون و شیره لاستیک SBR و ...) در چسبندگی سیستم قیر و سنگدانه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن که با هزینه کمتر و سرعت بیشتر نسبت به آزمایش‌های متداول دیگر همانند افت سایش<sup>۱</sup> و چسبندگی در شرایط مرطوب<sup>۲</sup> قابل انجام است مورد استفاده قرار گرفت.

1 Wet-Track Abrasion Test (WTAT)

2 Wet Cohesion Test

3 X-Ray Fluorescent

امولسیون و قیرهای امولسیونی اصلاح شده با ۳ درصد شیر لاستیک نیز در این جدولها آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در آزمایشگاه و حدود مجاز استاندارد، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های عمومی قیر امولسیون با مقادیر خواسته شده در استاندارد مطابقت داشته است.

این پژوهش همخوانی دارد. جهت اطمینان از کیفیت قیرها، آزمایش‌های استاندارد قیرهای امولسیونی انجام و نتایج در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شد. در این خصوص آزمایش‌های کندروانی سی بولت فیورول، الک، پایداری، قیر باقی‌مانده، نقطه نرمی و درجه نفوذ انجام شدند. نتایج آزمایش‌ها به همراه استانداردهای مربوطه و حدود مجاز استاندارد در خصوص قیرهای

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های استاندارد قیر امولسیون کاتیونی تند شکن مورد استفاده

Table 2. Standard testing results of the CRS emulsion used

| آزمایش‌های قیر امولسیون         | استاندارد   | حدود مجاز استاندارد | قیر امولسیون تندشکن اصلاح شده |
|---------------------------------|-------------|---------------------|-------------------------------|
| کندروانی سی بولت فیورول (ثانیه) | AASHTO T 59 | ۱۵ - ۹۰             | ۲۲ - ۲۳                       |
| الک (درصد)                      | AASHTO T 59 | < ۰/۳۰              | ۰                             |
| پایداری (درصد)                  | AASHTO T 59 | < ۱                 | ۰/۴۱                          |
| قیر باقی‌مانده (درصد)           | AASHTO T 59 | > ۶۲                | ۶۲/۷                          |
| نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)     | AASHTO T 53 | > ۵۷                | ۵۲/۱ - ۵۲/۷                   |
| درجه نفوذ (دسی میلی‌متر)        | AASHTO T 49 | ۴۰ - ۹۰             | ۴۵/۳۷                         |

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های استاندارد قیر امولسیونی کندشکن مورد استفاده

Table 3. Standard testing results of the CSS emulsion used

| آزمایش‌های قیر امولسیون         | استاندارد   | حدود مجاز استاندارد | قیر امولسیون کندشکن اصلاح شده |
|---------------------------------|-------------|---------------------|-------------------------------|
| کندروانی سی بولت فیورول (ثانیه) | AASHTO T 59 | ۱۵ - ۹۰             | ۲۶ - ۲۷                       |
| الک (درصد)                      | AASHTO T 59 | < ۰/۳۰              | ۰/۰۰۴                         |
| پایداری (درصد)                  | AASHTO T 59 | < ۱                 | ۰/۹۹                          |
| قیر باقی‌مانده (درصد)           | AASHTO T 59 | > ۶۲                | ۶۳/۸                          |
| نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)     | AASHTO T 53 | > ۵۷                | ۵۲/۸ - ۵۳/۸                   |
| درجه نفوذ (دسی میلی‌متر)        | AASHTO T 49 | ۴۰ - ۹۰             | ۴۶/۱۰                         |



### ۳-۲- انجام آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن

توجه به دمای حاکم در مناطق مرکزی و جنوبی کشور در این فصول حائز اهمیت است. زمان مناسب جهت بازگشایی ترافیک بستگی به تجربه دارد ولی به عنوان یک قاعده کلی اگر رنگ اسلاری به مشکلی تبدیل شود و یا از میکروسرفیسینگ آب تمیز خارج شود این گیرش صورت گرفته است. بنابراین فواصل زمانی عمل‌آوری نمونه‌ها نیز به ترتیب ۱، ۳ و ۲۴ ساعت انتخاب شده چرا که مطابق آیین نامه ISSA TB ۱۰۹ مدت زمان گیرش سریع جهت بازگشایی ترافیک در زمان ۶۰ دقیقه و به دست آمدن حداقل پیچش ۲۰ کیلوگرم سانتی‌متر انجام می‌گردد. با توجه به اینکه عبور و مرور وسایل نقلیه از روی آسفالت‌های حفاظتی تا قبل از گیرش، تثبیت و عمل آمدن نهایی مجاز نیست، دو زمان دیگر ۳ ساعت و ۲۴ ساعت نیز جهت ارزیابی مقاومت چسبندگی در زمان‌های اولیه گیرش و عمل آمدن نهایی بعد از ۲۴ ساعت که برای قیر امولسیون کندشکن لازم است، انتخاب شده است. شکل ۱ نحوه عمل‌آوری نمونه‌های قیر امولسیون بر روی سنگ‌های دولومیتی و گرانیتی را نشان می‌دهد.

در حین عمل‌آوری نمونه‌های قیر امولسیون، گرم‌خانه دیگری به دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد رسانیده شده و نمونه‌ها (به نام استاب) جهت انجام آزمایش در داخل گرم‌خانه قرار می‌گیرند. استاب‌ها حداقل به مدت ۱ ساعت درون گرم‌خانه باقی می‌مانند تا رطوبت باقی‌مانده بر روی آن‌ها کاملاً از بین برود [۳۹]. استاب‌هایی که به دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد رسیده‌اند را بر روی سطح نمونه‌ها قرار می‌دهند. جهت جلوگیری از افت دمای استاب‌ها، می‌بایست بعد از خارج نمودن استاب از گرم‌خانه، درب آن بسته شود تا دمای دیگر استاب‌ها افت نکند. فشار وارد بر استاب باید به شکل مستقیم باشد و تا جایی ادامه پیدا کند که لبه‌های استاب به سطح سنگ برسد. مقادیر اضافه قیر از مجرای جانبی استاب خارج می‌شود. بر روی هر کدام از استاب‌ها یک وزنه ۵۰ گرمی جهت ایجاد چسبندگی کامل و یکنواخت قرار داده می‌شود. نمونه‌های آماده شده را می‌بایست مجدداً در داخل گرم‌خانه قرار داده و دمای آن روی ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت تنظیم شود تا نمونه‌ها با شرایط آزمایش تطبیق پیدا کرده و آزاد باشند [۳۹]. شکل ۲ نحوه انجام آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن با دستگاه اتوماتیک Posi Test AT-A را نشان می‌دهد. شاسی پیستون دستگاه را به عقب کشیده و آن را بر روی سطح استاب قرار می‌دهند. با اعمال نیروی مختصر بر روی دستک، دستگاه قفل شده و آماده شروع آزمایش می‌شود. دمای انجام آزمایش ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. نرخ بارگذاری که یک پارامتر مهم در آزمایش‌های

جهت انجام آزمایش‌های مربوط به آزمون کشش و کنده شدن توصیه آن است که از دستورالعمل آیین نامه AASHTO TP-91 برای انجام گام به گام این آزمایش استفاده شود [۳۹]. مراحل انجام آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن مطابق آیین نامه به طور خلاصه به شرح زیر است. اولین نیاز جهت انجام آزمایش ارزیابی مقاومت چسبندگی قیر، آماده‌سازی سطوح سنگی زیرلایه با ابعاد مناسب است. به این منظور لازم است سطوح زیرلایه کاملاً یکنواخت باشند. لذا صفحات سنگی به کمک سیلیکون کاربید شماره ۲۸۰ سائیده شده و در انتها نیز دو سطح صفحات سنگی جهت زدوده شدن غبار، کاملاً با آب شسته می‌شوند [۳۹]. سپس قیر امولسیونی در محفظه گرم‌خانه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. مدت زمان نگهداری قیر امولسیون در این دما نباید از ۱ ساعت تجاوز کند. همزمان با گرم شدن قیر امولسیون در گرم‌خانه، سنگدانه‌ها نیز می‌توانند گرم شوند. دمای مطلوب برای گرم شدن سنگدانه‌ها ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بعد از گرم کردن سطح سنگدانه و قیر امولسیون، قالب‌های سیلیکونی پیش‌ساخته بر روی سطح سنگ قرار داده می‌شوند. با استفاده از سرنگ و یا قطره‌چکان میزان مورد نظر قیر امولسیون در داخل سیلیکون ریخته می‌شود. میزان قیر امولسیون مورد نیاز در داخل سیلیکون از رابطه (۱) زیر محاسبه می‌شود.

$$EA(g) = \frac{0.45}{AC(\%)} \quad (1)$$

در این رابطه  $AC^1$  درصد قیر موجود در قیر امولسیون و  $EA^2$  وزن قیر امولسیون که در هر کدام از قالب‌های سیلیکون ریخته می‌شود. در مرحله بعد صفحات سنگدانه، سیلیکون و قیر امولسیون را می‌بایست جهت انجام فرایند عمل‌آوری در گرم‌خانه نگهداری نمود. شرایط دمایی انتخاب شده در این پژوهش، دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد بوده که این انتخاب برحسب تطابق با شرایط متداول محیط صورت گرفته است. مطابق آیین نامه روسازی آسفالتی نشریه ۲۳۴ حداقل دمای مورد نیاز جهت اجرای آسفالت حفاظتی ۱۰ الی ۱۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که انتخاب دمای ۲۰ را توجیح می‌نماید. همچنین با توجه به فصل اجرایی آسفالت حفاظتی در ایران که بیشتر در فصل بهار و تابستان است، انتخاب دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد با

- 1 Asphalt Content of the Emulsion
- 2 Emulsion Amount



شکل ۱. نحوه عمل‌آوری نمونه‌های قیر امولسیون

Fig. 1. Curing condition of the bitumen emulsions



شکل ۲. دستگاه مقاومت کشش و کنده شدن Posi Test AT-A

Fig. 2. Pull of Posi Test AT-A apparatus

تفسیر و تحلیل گسیختگی سطح نمونه‌های قیر به کمک چشم مسلح و تحلیل عکاسی دیجیتال صورت می‌گیرد. گسیختگی مابین قیر و سنگدانه ممکن است به حالت‌های مختلف حادث شود. یکی گسیختگی در داخل قیر و دیگری گسیختگی بین قیر و سطح سنگدانه است. جهت تحلیل نحوه گسیختگی سطح نمونه‌های قیر امولسیون، در صورتی که قیر

ارزیابی مقاومت کششی می‌باشد، ثابت فرض شده است. نرخ بارگذاری ۰/۷ مگاپاسکال بر ثانیه است. با فشردن دکمه شروع، دستگاه شروع به بارگذاری می‌کند. بر روی دستگاه صفحه نمایشی قرار دارد که نمودار بارگذاری در طول زمان را رسم می‌کند. نقطه‌ی قله نمودار، حداکثر مقاومت کششی دستگاه است.

جدول ۴. شماره گذاری و دسته بندی نمونه‌های مختلف برای انجام آزمایش کشش و کنده شدن

Table 4. Samples nomination and classification for the pull of test

| شماره آزمایش | نرخ بارگذاری (mPa/s) | قیر امولسیون        | نوع سنگدانه | زمان عمل‌آوری (ساعت) | دما عمل‌آوری (سانتی‌گراد) | توضیحات                       |
|--------------|----------------------|---------------------|-------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| ۱            | ۰/۷                  | CRS62.5             | گرانیت      | ۱,۳,۲۴               | ۲۰                        | گیرش‌های CRS62.5              |
| ۲            | ۰/۷                  | CRS62.5             | گرانیت      | ۱,۳,۲۴               | ۴۰                        |                               |
| ۱            | ۰/۷                  | CRS62.5             | دولومیت     | ۱,۳,۲۴               | ۲۰                        |                               |
| ۲            | ۰/۷                  | CRS62.5             | دولومیت     | ۱,۳,۲۴               | ۴۰                        |                               |
| ۳            | ۰/۷                  | CRS62.5+3%Latex SBR | گرانیت      | ۱,۳,۲۴               | ۲۰                        | گیرش‌های CRS62.5+3%Late x SBR |
| ۴            | ۰/۷                  | CRS62.5+3%Latex SBR | گرانیت      | ۱,۳,۲۴               | ۴۰                        |                               |
| ۳            | ۰/۷                  | CRS62.5+3%Latex SBR | دولومیت     | ۱,۳,۲۴               | ۲۰                        |                               |
| ۴            | ۰/۷                  | CRS62.5+3%Latex SBR | دولومیت     | ۱,۳,۲۴               | ۴۰                        |                               |
| ۱            | ۰/۷                  | CSS65               | گرانیت      | ۱,۳,۲۴               | ۲۰                        | گیرش‌های CSS65                |
| ۲            | ۰/۷                  | CSS65               | گرانیت      | ۱,۳,۲۴               | ۴۰                        |                               |
| ۱            | ۰/۷                  | CSS65               | دولومیت     | ۱,۳,۲۴               | ۲۰                        |                               |
| ۲            | ۰/۷                  | CSS65               | دولومیت     | ۱,۳,۲۴               | ۴۰                        |                               |
| ۳            | ۰/۷                  | CSS65+3%Latex SBR   | گرانیت      | ۱,۳,۲۴               | ۲۰                        | گیرش‌های CSS65+3%Latex SBR    |
| ۴            | ۰/۷                  | CSS65+3%Latex SBR   | گرانیت      | ۱,۳,۲۴               | ۴۰                        |                               |
| ۳            | ۰/۷                  | CSS65+3%Latex SBR   | دولومیت     | ۱,۳,۲۴               | ۲۰                        |                               |
| ۴            | ۰/۷                  | CSS65+3%Latex SBR   | دولومیت     | ۱,۳,۲۴               | ۴۰                        |                               |

بندی نمونه‌ها در جدول ۴ آورده شده است. مطابق دستورالعمل آیین نامه آشتو، آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن قیر امولسیون از سطح سنگدانه در شرایط خشک انجام می‌شود. به منظور بررسی حساسیت رطوبتی نمونه‌ها، آیین نامه تغییر دما و اعمال درصدهای متفاوت رطوبت را نیز مجاز دانسته و برای آن روش کار ارائه داده است.

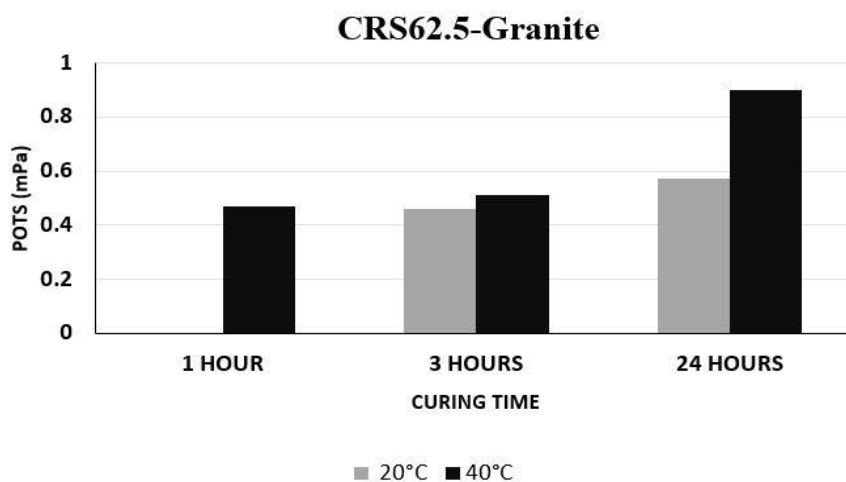
#### ۴-۱- تاثیر نوع سنگ و قیر امولسیون

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمودارهای مربوط به مقاومت چسبندگی قیر امولسیون زودشکن اصلاح نشده بر روی سنگ‌های گرانیت و دولومیت را نشان می‌دهند. با توجه به این دو شکل اطلاعات زیر حاصل شده است:

به طور کامل روی سطح سنگدانه باقی بماند، گسیختگی داخل قیر اتفاق افتاده است. در صورتی که قیر کاملاً از روی سطح سنگدانه جدا شده باشد، گسیختگی بین قیر و سطح سنگ اتفاق افتاده است. حالت سومی نیز ممکن رخ دهد که در آن قیر به طور ناقص از روی سطح سنگ جدا می‌شود. با استفاده از نرم افزار Image J تشخیص نوع گسیختگی سطح امکان‌پذیر است.

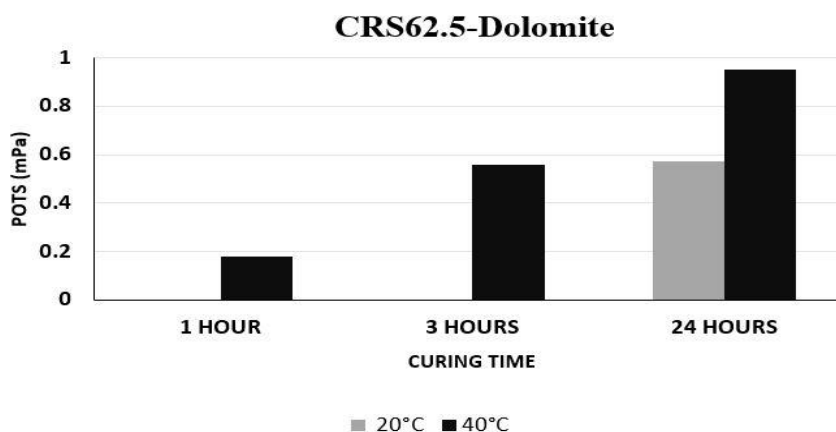
#### ۴- نتایج و بحث

در این پژوهش جهت ارزیابی مقاومت چسبندگی قیر امولسیون و سنگدانه‌ها، ۲۸۸ نمونه آزمایش کشش و کنده شدن انجام شد. خلاصه دسته



شکل ۳. نتایج آزمایش کنش و کنده شدن قیر امولسیون زودشکن و سنگ گرانیت

Fig. 3. BBS testing results for the CRS emulsion and granite aggregate



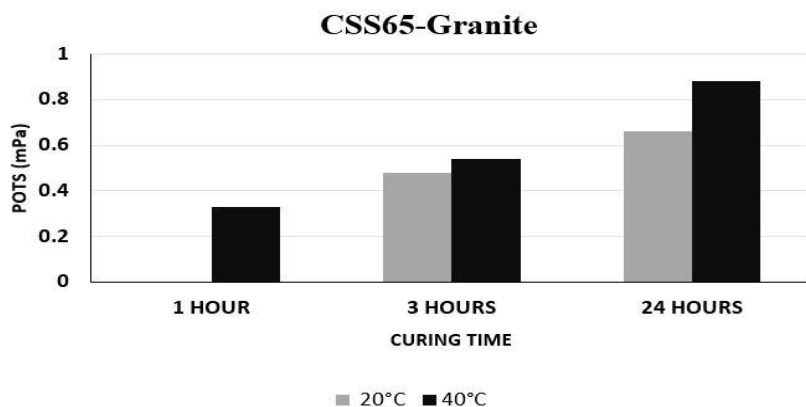
شکل ۴. نتایج آزمایش کنش و کنده شدن قیر امولسیون زودشکن و سنگ دولومیت

Fig. 4. BBS testing results for the CRS emulsion and dolomite aggregate

- سرعت گیرش ابتدایی قیر امولسیون بر روی سنگ دولومیت به خصوص در دمای عمل‌آوری ۲۰ درجه سانتی‌گراد به کندی انجام شد.
- در دمای عمل‌آوری ۲۰ درجه سانتی‌گراد، گیرش قیر امولسیون در سنگ دولومیتی بعد از گذشت ۳ ساعت به یک باره افزایش پیدا کرد. اما در سنگ گرانیت بعد از گذشت زمان ۱ ساعت به یک باره افزایش پیدا کرده و بعد از گذشت زمان ۲۴ ساعت تغییر قابل توجهی حاصل نشد.

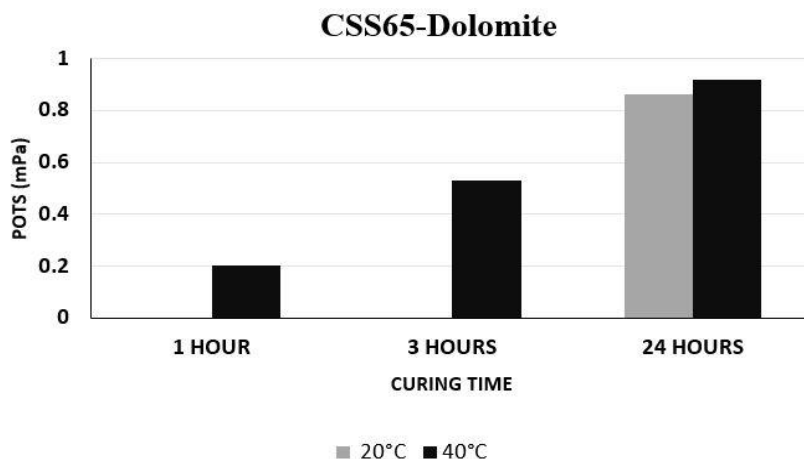
شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نمودارهای مربوط به مقاومت چسبندگی قیر

- در سنگدانه گرانیتی مقاومت چسبندگی سریع‌تر از سنگ دولومیتی حاصل شده است. مقاومت چسبندگی در دمای عمل‌آوری ۴۰ درجه سانتی‌گراد و زمان عمل‌آوری ۱ ساعت میزان ۰/۴۷ مگاپاسکال حاصل شد. در سنگدانه دولومیتی این مقاومت ۰/۱۸ مگاپاسکال به دست آمد.
- علی‌رغم گیرش سریع‌تر قیر امولسیون در سنگدانه گرانیتی، بالاترین مقاومت حاصل در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت از سنگ کوهی دولومیتی حاصل شد.



شکل ۵. نتایج آزمایش کشش و کنده شدن قیر امولسیون کندگیر و سنگ گرانیت

Fig.5. BBS testing results for the CSS emulsion and granite aggregate



شکل ۶. نتایج آزمایش کشش و کنده شدن قیر امولسیون کندگیر و سنگ دولومیت

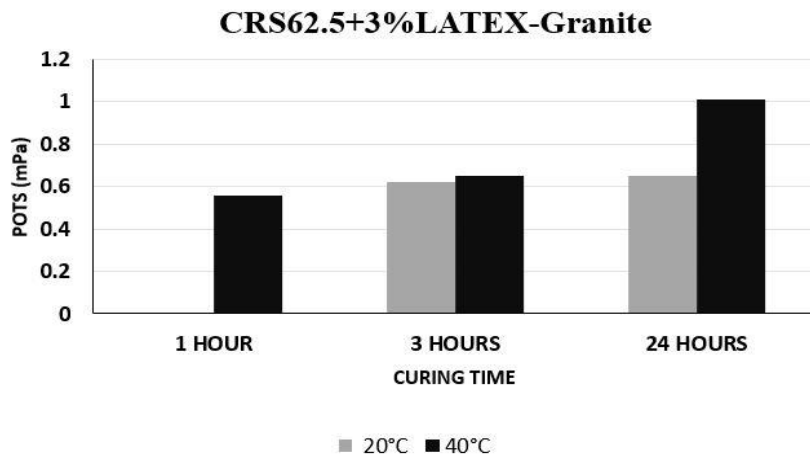
Fig. 6. BBS testing results for the CSS emulsion and dolomite aggregate

- سرعت گیرش ابتدایی قیر امولسیون بر روی سنگ دولومیت به خصوص در دمای عمل‌آوری ۲۰ درجه سانتی‌گراد به کندی انجام شد.
- در دمای عمل‌آوری ۲۰ درجه سانتی‌گراد، گیرش قیر امولسیون بر سنگ دولومیت بعد از گذشت ۳ ساعت به یک باره افزایش یافت. در سنگ گرانیت نیز بعد از گذشت ۱ ساعت، مقاومت چسبندگی افزایش و بعد از گذشت زمان ۲۴ ساعت تغییر قابل توجهی حاصل نشد.

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نمودارهای مربوط به مقاومت چسبندگی قیر امولسیون زودشکن اصلاح شده بر روی سنگ‌های گرانیت و دولومیت است

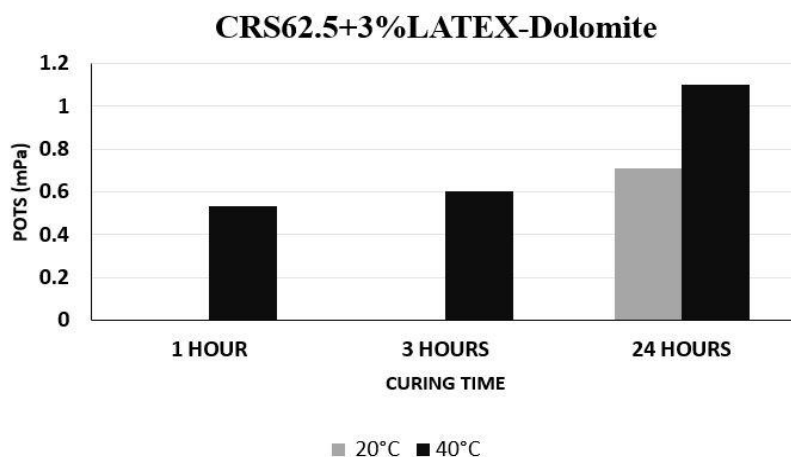
امولسیون کندشکن اصلاح نشده بر روی سنگ‌های گرانیتی و دولومیتی را نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها نتایج زیر حاصل شد:

- در سنگ گرانیتی مقاومت چسبندگی سریع‌تر از سنگ دولومیت به دست آمد. میزان مقاومت چسبندگی در دمای عمل‌آوری ۴۰ درجه سانتی‌گراد و زمان عمل‌آوری ۱ ساعت میزان ۰/۳۳ مگاپاسکال، و در سنگ دولومیتی این مقاومت ۰/۲۰ مگاپاسکال حاصل شد.
- علی‌رغم گیرش سریع‌تر قیر امولسیون کندشکن خالص در سنگ گرانیت، بالاترین مقاومت حاصل در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت در سنگ دولومیت به دست آمد.



شکل ۷. نتایج آزمایش کشش و کنده شدن قیر امولسیون زودشکن اصلاح شده و سنگ گرانیت

Fig.7. BBS testing results for the modified CRS emulsion and granite aggregate



شکل ۸. نتایج آزمایش کشش و کنده شدن قیر امولسیون زودشکن اصلاح شده و سنگ دولومیت

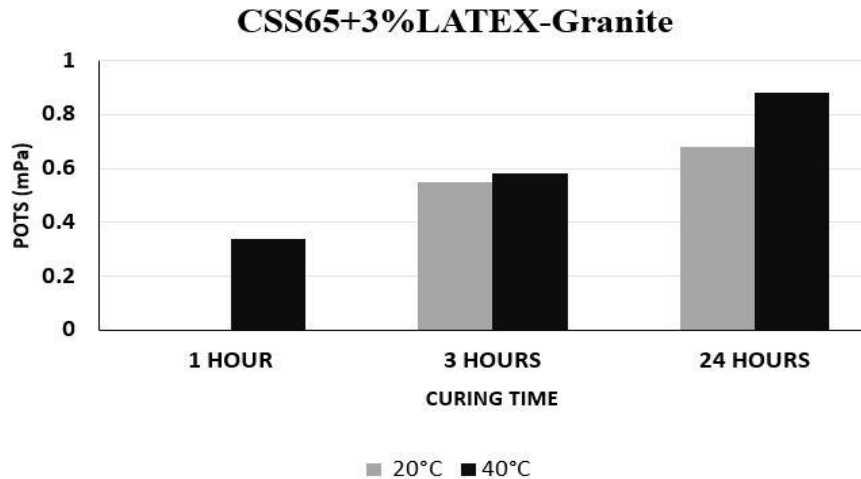
Fig. 8. BBS testing results for the modified CRS emulsion and dolomite aggregate

۴۰ درجه سانتی‌گراد و زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت در سنگ کوهی دولومیت حاصل شد.

- سرعت گیرش ابتدایی قیر امولسیون روی سنگ دولومیت به خصوص در دمای عمل‌آوری ۲۰ درجه سانتی‌گراد بسیار کند بود.
- در دمای عمل‌آوری ۲۰ درجه سانتی‌گراد، گیرش قیر امولسیون در سنگ دولومیت بعد از گذشت ۳ ساعت به یک باره افزایش پیدا کرد. سرعت گیرش در سنگ گرانیت نیز بعد از گذشت زمان ۱ ساعت افزایش نشان داد.

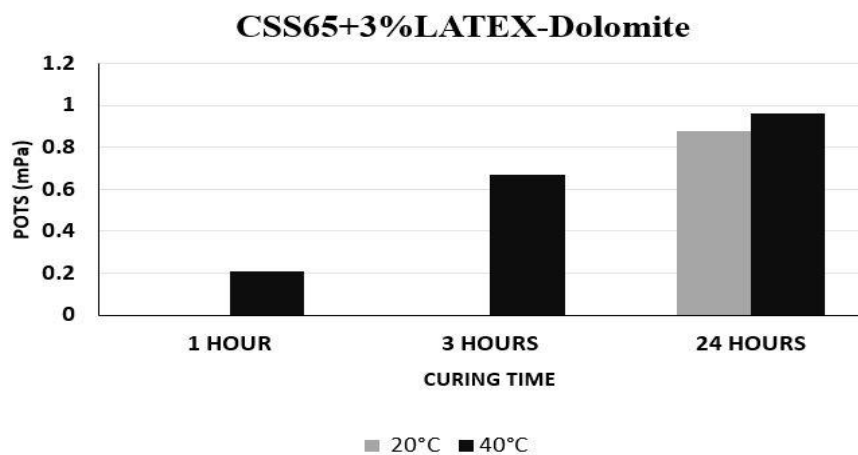
. با توجه به این دو شکل نتایج زیر قابل بحث است:

- در قیر امولسیون زودشکن اصلاح شده، مقاومت چسبندگی در دمای عمل‌آوری ۴۰ درجه سانتی‌گراد و زمان عمل‌آوری ۱ ساعت بر روی سنگدانه‌های گرانیت و دولومیت افزایش قابل توجهی داشته است. این افزایش مقاومت در سنگ دولومیتی بیشتر بود.
- با وجود گیرش ابتدایی سریع‌تر قیر امولسیون در سنگ گرانیت در زمان‌های ابتدای عمل‌آوری، بالاترین مقاومت چسبندگی در دماهای ۲۰ و



شکل ۹. نتایج آزمایش کشش و کنده شدن قیر امولسیون کندشکن اصلاح شده و سنگ گرانیت

Fig. 9. BBS testing results for the modified CSS emulsions and granite aggregate



شکل ۱۰. نتایج آزمایش کشش و کنده شدن قیر امولسیون کندشکن اصلاح شده و سنگ دولومیت

Fig. 10. BBS testing results for the modified CSS emulsion and dolomite aggregate

- گیرش ابتدایی قیر امولسیون کندشکن اصلاح شده بر روی سنگ دولومیت به خصوص در دمای عمل‌آوری ۲۰ درجه سانتی‌گراد به کندی انجام و در زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۳ ساعت گیرش قابل توجهی حاصل نشد.
- در دمای عمل‌آوری ۲۰ درجه سانتی‌گراد، گیرش قیر امولسیون در سنگ دولومیت بعد از گذشت ۳ ساعت به یک باره افزایش یافت. در سنگ گرانیت بعد از گذشت زمان ۱ ساعت، سرعت گیرش به یک باره افزایش و بعد از گذشت زمان ۲۴ ساعت تغییر قابل توجهی حاصل نشد.

- اما بعد از زمان ۲۴ ساعت تغییر قابل توجهی حاصل نشد.
- شکل ۹ و ۱۰ نمودارهای مربوط به مقاومت چسبندگی قیر امولسیون کندشکن اصلاح شده بر روی سنگ‌های گرانیتی و دولومیتی را نشان می‌دهند. با توجه به این دو شکل نتایج زیر حاصل شد:
- در ساعت‌های اولیه عمل‌آوری علی‌رغم گیرش سریع‌تر قیر امولسیون در سنگ گرانیت، بالاترین مقاومت چسبندگی در دماهای عمل‌آوری ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد و زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت در سنگ کوهی دولومیت حاصل شد.

امولسیون خالص و قیر امولسیون اصلاح شده با لاتکس روی سنگ گرانیت در گیرش نهایی قیر امولسیون به ترتیب ۳٪ و ۱۵٪ افزایش داشت. نتایج به دست آمده نشان دهنده برتری مقاومت چسبندگی قیر امولسیون زودشکن بر قیر امولسیون کندشکن است. میزان این برتری در قیر امولسیون خالص جزئی ولی در قیر امولسیون اصلاح شده قابل توجه بود.

#### ۴-۲- عمل آوری

جهت حصول مقاومت چسبندگی نهایی میان قیر امولسیون و سنگدانه می‌بایست قیر امولسیون در تماس با سنگدانه شکسته شده و لایه نازک قیر بر روی سنگدانه باقی بماند. زمان شکست قیر امولسیون، تشکیل لایه نازک قیر و تثبیت و گیرایی آن به نوع قیر امولسیون و جنس سنگدانه وابسته است [۴۱]. به عبارت دیگر مقاومت چسبندگی میان قیر و سنگدانه به شرایط عمل آوری مخلوط و شکسته شدن قیر امولسیون وابسته است. شرایط عمل آوری همانند دما و زمان نقش مهمی در ایجاد مقاومت چسبندگی میان قیر امولسیون و سنگدانه ایفا می‌کند.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمودارهای تاثیر زمان عمل آوری ۳ و ۲۴ ساعت را بر مقاومت چسبندگی قیر امولسیون زودشکن، کندشکن و اصلاح شده این خانواده‌ها نشان می‌دهند. از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که تعداد ۱۸ داده از ۲۰ داده موجود بالای خط تعادل قرار گرفته‌اند. بنابراین افزایش زمان عمل آوری در قیر امولسیون زودشکن و قیر امولسیونی اصلاح شده باعث افزایش مقاومت چسبندگی شده است.

همچنین شکل ۱۲ حاکی از آن است که تمام ۲۰ داده موجود بالای خط تعادل قرار گرفته‌اند. بنابراین افزایش زمان عمل آوری در قیر امولسیون کندشکن و قیر امولسیون اصلاح شده آن باعث افزایش مقاومت چسبندگی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بین افزایش مقاومت چسبندگی قیر امولسیون و افزایش زمان عمل آوری رابطه مستقیم وجود دارد.

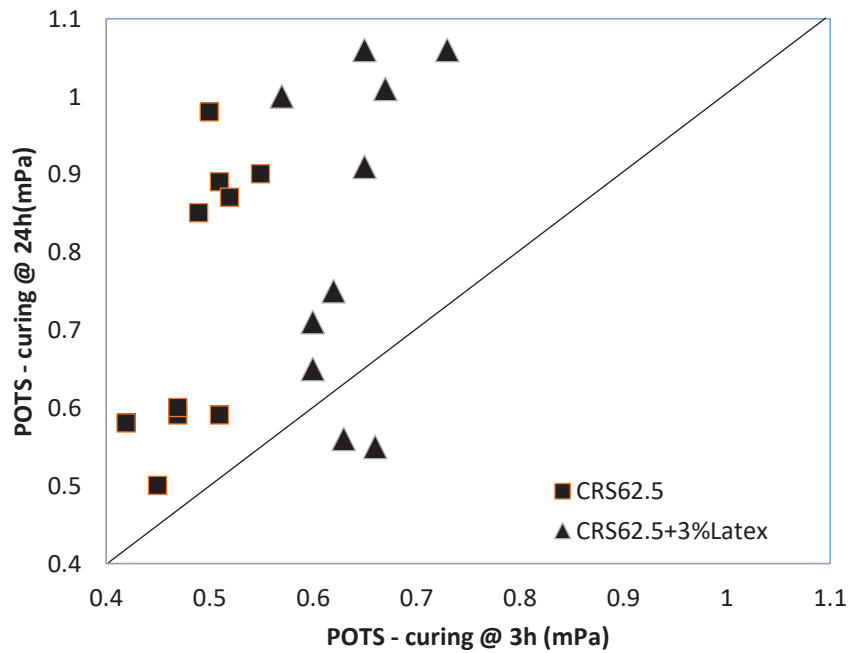
شکل ۱۳ و ۱۴ تاثیر دمای عمل آوری ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد را بر مقاومت چسبندگی قیرهای امولسیون زودشکن، کندشکن و اصلاح شده نشان می‌دهند. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که تعداد ۱۸ داده از ۲۰ داده موجود در زیر خط تعادل قرار گرفته‌اند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش دمای عمل آوری تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت چسبندگی میان قیر امولسیون زودشکن با سنگ‌های دولومیت و سنگ گرانیت به ترتیب ۵۳٪ و ۵۷٪ افزایش داشته است. همچنین مقاومت چسبندگی میان قیر امولسیون

در سنگ گرانیت مقاومت چسبندگی سریع‌تر از سنگ دولومیت حاصل شد. با وجود گیرش سریع‌تر قیر امولسیون روی سنگ گرانیت در زمان‌های عمل آوری ۱ و ۳ ساعت، بالاترین مقاومت در سنگ کوهی دولومیتی حاصل گردید. نتایج آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن در سیستم قیر امولسیون و سنگدانه نشان داد که در دو دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت چسبندگی قیر امولسیون زودشکن و قیر امولسیون زودشکن اصلاح شده روی سنگ دولومیتی در مقایسه با سنگ گرانیتی به ترتیب ۹٪ و ۱۰٪ افزایش یافت. همچنین در دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت چسبندگی قیر امولسیون کندشکن و قیر امولسیون کندشکن اصلاح شده در سنگ دولومیتی، در مقایسه با سنگ گرانیتی، به ترتیب ۳۰٪ و ۱۰٪ افزایش داشت. با توجه به نتایج آزمایش XRF سنگ دولومیت و بالا بودن میزان اکسید کلسیم آن، این سنگ خاصیت بازی داشته و آبگریز و قیردوست است. این یکی از دلایل برتری مقاومت چسبندگی آن در مقابل سنگدانه دولومیتی پس از گیرش نهایی قیر امولسیون است. این یافته با نتایج به دست آمده از پژوهش‌های قبلی در این زمینه همخوانی مناسبی دارد. همچنین در پژوهش‌های گذشته مشاهده شد که قدرت چسبندگی قیر به سنگدانه، تا آنجا که به سنگدانه مربوط است، علاوه بر خاصیت اسیدی یا بازی بودن، به جنس سنگ و بافت سطحی آن نیز وابسته است [۴۰ و ۱].

اصلاح قیرهای امولسیون با افزودن شیره لاستیک SBR باعث افزایش مقاومت چسبندگی در مقایسه با قیر امولسیون اصلاح نشده گردید. این افزایش در قیر امولسیون زودشکن بیشتر از قیر امولسیون کندشکن بود. نتایج نشان داد که با افزودن ۳٪ شیره لاستیک SBR، مقاومت چسبندگی بین سنگ دولومیت و قیر امولسیون زودشکن در دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱۳٪ و ۱۶٪ افزایش و در قیر امولسیون کندشکن به ترتیب ۳٪ و ۵٪ افزایش داشت. همچنین مقاومت چسبندگی بین سنگدانه گرانیتی و قیر امولسیون زودشکن در دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱۳٪ و ۱۴٪ افزایش و در قیر امولسیون کندشکن به ترتیب ۲٪ و ۳٪ افزایش داشت.

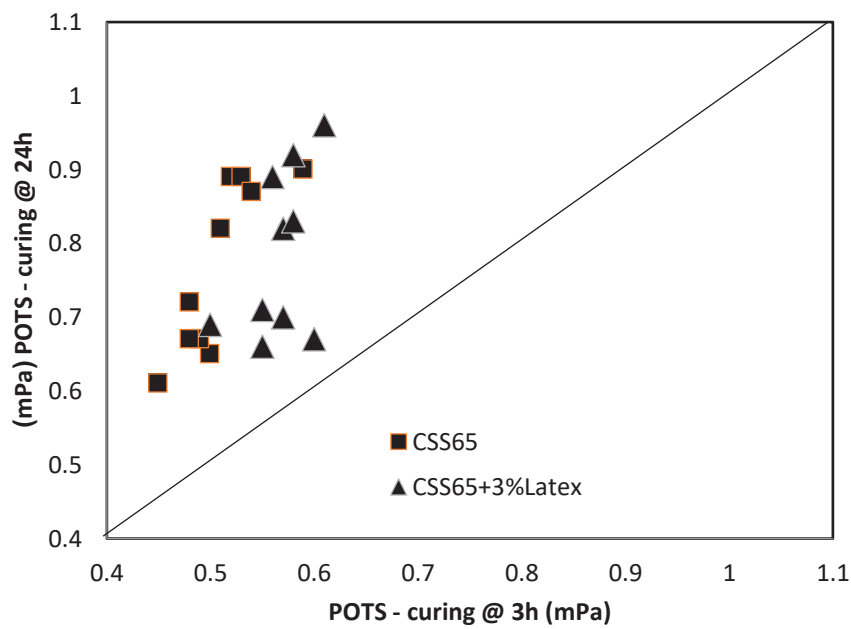
نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن با دو نوع قیر امولسیون کندشکن و زودشکن نشان می‌دهد که در سیستم قیر و سنگدانه، مقاومت چسبندگی در قیر امولسیون زودشکن بیشتر از قیر امولسیون کندشکن حاصل شد. این افزایش مقاومت چسبندگی در سیستم قیر امولسیون خالص و قیر امولسیون اصلاح شده با سنگ دولومیت درگیرش نهایی قیر امولسیون به ترتیب ۳٪ و ۱۴/۵٪ افزایش نشان داد. همچنین مقاومت چسبندگی قیر





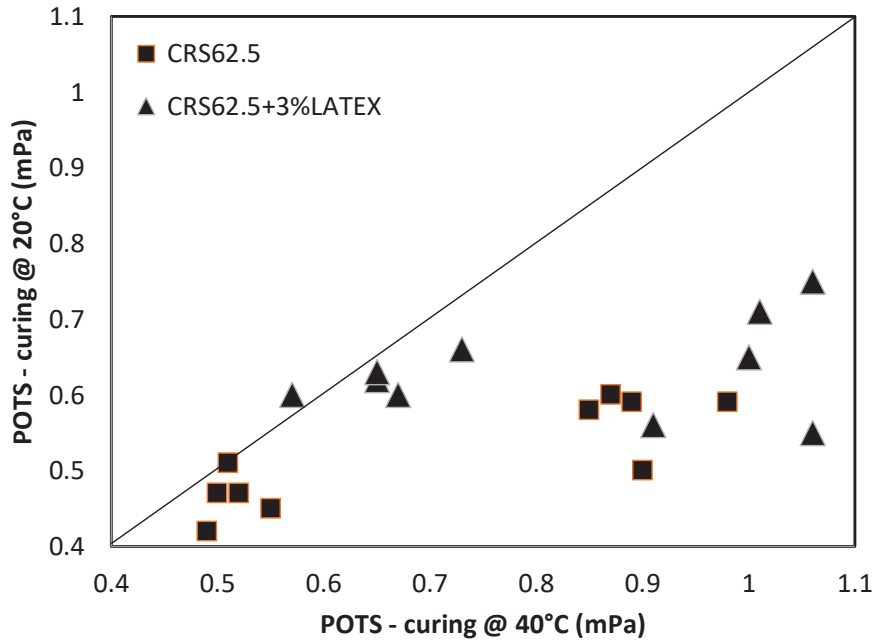
شکل ۱۱. تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت چسبندگی قیر امولسیون زودشکن

Fig. 11. Effect of curing time on POTS values for CRS emulsion



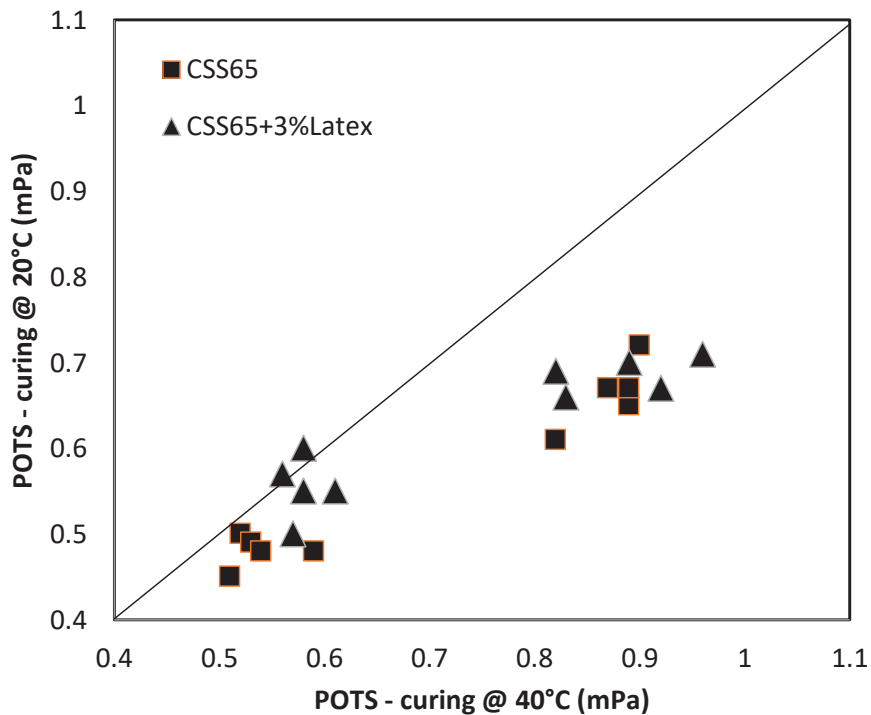
شکل ۱۲. تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت چسبندگی قیر امولسیون کندشکن

Fig. 12. Effect of curing time on POTS values for CSS emulsion



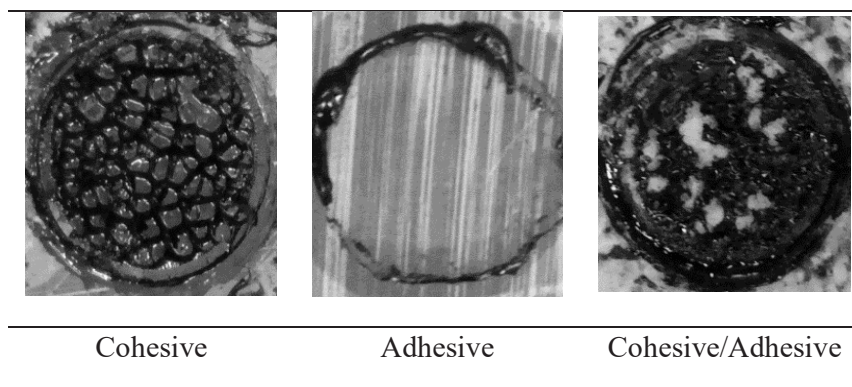
شکل ۱۳. تاثیر دمای عمل‌آوری بر مقاومت چسبندگی قیر امولسیون زودشکن

Fig. 13. Effect of temperature on POTS values for CRS emulsion



شکل ۱۴. تاثیر دمای عمل‌آوری بر مقاومت چسبندگی قیر امولسیون کندشکن

Fig. 14. Effect of temperature on POTS values for CSS emulsion



شکل ۱۵. انواع حالت‌های شکست بین قیر و سنگدانه، شامل شکست‌های چسبندگی، پیوستگی و ترکیبی

Fig.15. Failure modes between bitumen and aggregates, consisting of adhesion, cohesion or combined

اتفاق افتاده است. همچنین در شرایط استفاده از قیر امولسیون اصلاح شده شکست میان قیر و سنگدانه به سمت شکست ترکیبی<sup>۳</sup> پیش رفته است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

از انجام آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن روی نمونه قیرهای امولسیونی ساده و اصلاح شده با شیره لاستیک و انتخاب دو نوع مصالح سنگی دولومیتی و گرانیتی، نتایج زیر حاصل شد:

- افزایش زمان عمل‌آوری قیرهای امولسیونی باعث افزایش مقاومت چسبندگی و مقاومت پیوستگی قیر شد. بنابراین در نظر گرفتن مدت زمان مناسب جهت گیرش و عمل‌آوری قیرهای امولسیونی یکی از عوامل مهم در حصول روسازی آسفالتی با کیفیت است.

- با توجه به اسیدی بودن سنگ گرانیت که از نتایج آزمایش XRF حاصل شد، مقاومت چسبندگی بین قیر و سنگدانه گرانیتی در ساعت‌های ابتدایی آزمایش بیشتر از مقاومت چسبندگی سنگ دولومیت بود. بنابراین در مسیرهایی که نیاز به باز کردن فوری مسیر جاده بعد از اقدامات تعمیر و نگهداری است، توجه به جنس و منشاء سنگ و شناسایی اجزاء تشکیل دهنده آن حائز اهمیت است.

- با افزایش دمای عمل‌آوری قیر امولسیون، گیرش بین قیر و سنگدانه سریع‌تر حادث شد و نتایج مثبتی برای تمام نمونه‌ها به همراه داشت. بنابراین در مناطق سردسیر، قیر امولسیون دیرتر می‌شکند و بازگشایی راه به تاخیر خواهد افتاد، لذا در به کارگیری قیرهای امولسیونی باید به شرایط

زودشکن اصلاح شده با دو سنگ دولومیت و سنگ گرانیت به ترتیب ۵۴٪ و ۵۷٪ افزایش داشته است. بنابراین افزایش دمای عمل‌آوری در قیر امولسیون زودشکن و قیر امولسیون اصلاح شده آن باعث افزایش مقاومت چسبندگی شده است. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که تعداد ۱۸ داده از ۲۰ داده موجود در زیر خط تعادل قرار گرفته‌اند. با افزایش دمای عمل‌آوری تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت چسبندگی میان قیر امولسیون کندشکن با سنگ‌های دولومیت و گرانیت به ترتیب ۷٪ و ۳۳٪ افزایش داشته است. همچنین مقاومت چسبندگی میان قیر امولسیون کندشکن اصلاح شده با سنگ دولومیت و سنگ گرانیت به ترتیب ۹٪ و ۲۹٪ افزایش داشته است. بنابراین افزایش دمای عمل‌آوری در قیر امولسیون کندشکن و قیر امولسیونی اصلاح شده باعث افزایش مقاومت چسبندگی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقاومت چسبندگی قیرهای امولسیونی با افزایش دمای عمل‌آوری رابطه مستقیم دارد.

شکل ۱۵ انواع شکست‌های رخ داده در سطح قیر و سنگ را نشان می‌دهد. در خصوص سنگ دولومیت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و زمان عمل‌آوری ۱ و ۳ ساعت، مقاومت پیوستگی قیر بیشتر از مقاومت میان قیر و سنگ شده است و در نتیجه، جداشدگی بین قیر و سنگدانه<sup>۱</sup> اتفاق افتاده است. در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های عمل‌آوری ۳ و ۲۴ ساعت، مقاومت پیوستگی قیر کمتر از مقاومت چسبندگی میان قیر و سنگدانه شده و شکست پیوستگی قیر<sup>۲</sup> اتفاق افتاده است. در خصوص سنگ گرانیت و در شرایط استفاده از قیر امولسیون اصلاح نشده، شکست بین قیر و سنگدانه

1 Adhesive Failure

2 Cohesive Failure

3 Cohesive/Adhesive Failure

- tackness of asphalt binders in moisture damage of HMA (with discussion), *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72 (2003).
- [9] R. Moraes, R. Velasquez, H. Bahia, Using bond strength and surface energy to estimate moisture resistance of asphalt-aggregate systems, *Construction and Building Materials*, 130 (2017) 156-170.
- [10] H. Bahia, J. Meng, R. Velasquez, T. Miller, C. Daranga, R. Moraes, Evaluation of the Bitumen Bond Strength (BBS) Test for Moisture Damage Characterization, Asphalt Research Consortium report prepared for the Federal Highway Administration, University of Wisconsin-Madison, (2010).
- [11] J. Youtcheff, C. Williams, K. Stuart, Moisture sensitivity testing of bitumen using a pneumatic adhesion test, in: *Eurobitume Workshop*, 1999.
- [12] Q. Lv, W. Huang, X. Zhu, F. Xiao, On the investigation of self-healing behavior of bitumen and its influencing factors, *Materials & Design*, 117 (2017) 7-17.
- [13] R. Moraes, R. Velasquez, H.U. Bahia, Measuring the effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test, *Transportation Research Record*, 2209(1) (2011) 70-81.
- [14] A.R. Copeland, J. Youtcheff, A. Shenoy, Moisture sensitivity of modified asphalt binders: factors influencing bond strength, *Transportation research record*, 1998(1) (2007) 18-28.
- [15] Q. Lv, W. Huang, N. Tang, F. Xiao, Comparison and relationship between indices for the characterization of the moisture resistance of asphalt-aggregate systems, *Construction and Building Materials*, 168 (2018) 580-589.
- [16] Y.-R. Kim, I. Pinto, S.-W. Park, Experimental evaluation of anti-stripping additives in bituminous mixtures through multiple scale laboratory test results, *Construction and Building Materials*, 29 (2012) 386-393.
- [17] J. Xie, Z. Chen, L. Pang, S. Wu, Implementation of modified pull-off test by UTM to investigate bonding characteristics of bitumen and basic oxygen furnace slag دمای محیط توجه نمود.
- اصلاح قیرهای امولسیون با ۳ درصد شیره لاستیک SBR باعث افزایش مقاومت چسبندگی بین قیر امولسیون و سنگدانه شد. میزان افزایش مقاومت چسبندگی قیرهای امولسیونی اصلاح شده به نوع قیر امولسیون بستگی دارد. بیشترین افزایش مقاومت چسبندگی در قیر امولسیون زودشکن اصلاح شده حاصل شد.
  - از مقایسه عملکرد چسبندگی قیرهای امولسیونی کاتیونی زودشکن و کندشکن با انجام آزمایش کشش کنده شدن، نتیجه گردید که مقاومت چسبندگی قیر امولسیون زودشکن بیشتر بود. قیر امولسیون کاتیونی کندشکن زمان بیشتری برای گیرایی کامل (از زمان‌های بررسی شده در این تحقیق) نیاز دارد.
- ### منابع
- [1] K. Louw, K. Spence, P. Kuun, The use of bitumen emulsions as a cost effective solution for constructing seals during winter, in: *Proc., 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA)*, Sun City, South Africa, 2004.
- [2] K. Kanitpong, H. Bahia, Relating adhesion and cohesion of asphalt to effect of moisture on asphalt mixtures' laboratory performance, in: *84th Annual Meeting of Transportation Research Board (CD-ROM)*, 2005.
- [3] H.J. Fromm, The mechanisms of asphalt stripping from aggregate surfaces, (1997).
- [4] P. Rychen, M. Pitter, A. Dumont, Determination of the presence and efficiency of adhesion agent in asphalt concrete, EPFL report, 153410 (2010).
- [5] A. James, Overview of asphalt emulsion, *Transportation Research Circular E-C102: Asphalt Emulsion Technology*, (2006) 1-15.
- [6] F. Canestrari, F. Cardone, A. Graziani, F.A. Santagata, H.U. Bahia, Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage, *Road Materials and Pavement Design*, 11(sup1) (2010) 11-32.
- [7] B. Shell, The shell bitumen handbook, in, English, UK, 2003.
- [8] K. Kanitpong, H.U. Bahia, Role of adhesion and thin film

- predictive and experimental method to assess bitumen emulsion wetting on mineral substrates, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 489 (2016) 322-335.
- [27] A.W. Hefer, A. Bhasin, D.N. Little, Bitumen surface energy characterization using a contact angle approach, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(6) (2006) 759-767.
- [28] T.A. Ahmed, R.C. Williams, Using a modified asphalt bond strength test to investigate the properties of asphalt binders with poly ethylene wax-based warm mix asphalt additive, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(1) (2018) 28-37.
- [29] H. Bahia, R. Moraes, R. Velasquez, The effect of bitumen stiffness on the adhesive strength measured by the bitumen bond strength test, in: 5th Eurasphalt and Eurobitume Congress, Istanbul, Turkey, 2012.
- [30] W. Huang, L. Zhou, Evaluation of Adhesion Properties of Modified Asphalt Binders with Use of Binder Bond Strength Test, *Transportation Research Record*, 2632(1) (2017) 88-98.
- [31] L. Zhou, W. Huang, F. Xiao, Q. Lv, Shear adhesion evaluation of various modified asphalt binders by an innovative testing method, *Construction and Building Materials*, 183 (2018) 253-263.
- [32] B. A., Basic Emulsion Chemistry, AEMA asphalt emulsion technologies workshop, Section Asphalt Innovations, St. Louis, Missouri, USA, (2001).
- [33] A. Hanz, Test method to determine aggregate/asphalt adhesion properties and potential moisture damage, University of Wisconsin--Madison, 2007.
- [34] F. Xiao, S. Amirhanian, C.H. Juang, Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6) (2007) 475-483.
- [35] J.R. Grenfell, N. Ahmad, Y. Liu, A.K. Apegyei, G.D. Airey, D. Large, Application of surface free energy techniques to evaluate bitumen-aggregate bonding strength and bituminous mixture moisture sensitivity, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-* (BOF), *Construction and Building Materials*, 57 (2014) 61-68.
- [18] W. Huang, Q. Lv, F. Xiao, Investigation of using binder bond strength test to evaluate adhesion and self-healing properties of modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 49-56.
- [19] S.A. Asif, N. Ahmed, A. Hayat, S. Hussan, F. Shabbir, K. Mehmood, Study of adhesion characteristics of different bitumen–aggregate combinations using bitumen bond strength test, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 41(5) (2018) 430-440.
- [20] M. Kazemi, A. Goli, M. Nasimifar, Evaluation of the self-healing performance of polyurethane-modified bitumen using bitumen bond strength (BBS) test and CT scan, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(2) (2021) 168-173.
- [21] A. Graziani, A. Virgili, F. Cardone, Testing the bond strength between cold bitumen emulsion composites and aggregate substrate, *Materials and Structures*, 51(1) (2018) 1-11.
- [22] J. Zhang, G.D. Airey, J.R. Grenfell, Experimental evaluation of cohesive and adhesive bond strength and fracture energy of bitumen-aggregate systems, *Materials and Structures*, 49(7) (2016) 2653-2667.
- [23] J.P. Aguiar-Moya, L.G. Loría-Salazar, J. Salazar-Delgado, J.P. Corrales-Azofeifa, E.Y. Hajj, Evaluation of adhesion properties of Costa Rican asphalt mixtures using the bitumen bond strength (BBS) and contact angle measurement tests, (2013).
- [24] A. Tarrer, V. Wagh, The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding, Strategic Highway Research Program, National Research Council Washington, DC, 1991.
- [25] R. Ghabchi, D. Singh, M. Zaman, Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixes containing RAP and different types of aggregates and asphalt binders using the surface free energy method, *Construction and Building Materials*, 73 (2014) 479-489.
- [26] L. Ziyani, V. Gaudefroy, V. Ferber, F. Hammoum, A

- Conshohocken, 2013.
- [39] T.-. AASHTO, Standard Test Method of Test for Determining Asphalt Binder Strength by Means of the Asphalt Bond Strength (ABS) Test, American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO), (2011).
- [40] H.H. Weinert, Natural road construction materials of Southern Africa, CSIR, 1980.
- [41] D. Lesueur, J.J. Potti, Cold mix design: a rational approach based on the current understanding of the breaking of bituminous emulsions, Road Materials and Pavement Design, 5(sup1) (2004) 65-87.
- Construction Materials, 167(4) (2014) 214-226.
- [36] J. Meng, Affinity of Asphalt to Mineral Aggregate: Pull-off, University of Wisconsin Madison, (2010).
- [37] T. Miller, A. Greyling, H. Bahia, K. Jenkins, Development of a test method for determining emulsion bond strength using the bitumen bond strength (BBS) test: A South African perspective, in: INTERNATIONAL SPRAYED SEALING CONFERENCE, 2ND, 2010, MELBOURNE, VICTORIA, AUSTRALIA, 2010.
- [38] A. E-13, Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry, in, ASTM International West

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Negarchi, A. Kavussi, Application of Pull-off Test for Evaluating Bond Strength Properties of Modified Bitumen Emulsions, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 631-648.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19010.7028](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19010.7028)

