

# Investigating the Relationship between SEM Test Results and TSR Parameter for Measuring the Moisture Sensitivity Index of Asphalt Mixtures Containing Anti-Stripping Agents\*

Research Article

Mahmoud Ameri<sup>1</sup>      Hamid Shaker<sup>2</sup>

Amirhosein Ameri<sup>3</sup>      Seyed Amir Saadatjoo<sup>4</sup>

Saeed Fatemi<sup>5</sup>      Seyed Ali Ziaee<sup>6</sup>

## 1. Introduction

One of the main goals of designing and implementing asphalt pavement is to ensure its performance in conditions that pavement may change. To achieve the best pavement performance, the asphalt mixture must be of good quality in terms of durability and stability. The quality of asphalt pavement depends on various factors such as the quality of the aggregates and the bitumen, and the proper mixing between the bitumen and the aggregates. To evaluate the anti-stripping properties of asphalt mixtures, various tests have been performed, including the AASHTO T283 test, which determines the amount of anti-stripping properties based on the TSR parameter (indirect tensile strength ratio of wet and dry asphalt mixture samples). The minimum acceptable amount of TSR parameter is considered to be 75% in Iran pavement regulations.

Image processing of asphalt mixture samples was performed for the first time in 1993 at the University of Southern California. The main purpose of this research was to study the inside of the asphalt core after paving and find deformation and damage before and after loading. Later, various image processing methods were used to model 3D asphalt samples. In 2013, the analysis of the structure of the asphalt mixture was performed using digital image processing techniques that was developed based on the research of Zelelew et al. In this research, different components of asphalt mixture and volumetric information were investigated. The methods used were based on detecting the threshold between air, mastic (bitumen and filler), and aggregate based on laboratory data.

The main purpose of this study was to investigate the characteristics of asphalt mixtures containing modified bitumen with nano-lime, zycotherm and ivanic. In addition, the relationship between the results of SEM test

and the results of moisture sensitivity test with the proposed method AASHTO T283 were explored.

## 2. Materials and methods

Aggregates were extracted from the Asbcheran stone mine according to grading No. 4 of Iran. Moreover, bitumen with a penetration degree of 60/70 was used as standard. To improve the anti-stripping properties of asphalt mixtures in this study, Zycotherm, Ivanic, and nano-lime nanomaterials were used. To investigate the properties, indirect tensile tests, Marshall Resistance, Resilient Modulus, dynamic creep, SEM test, and image processing by MATLAB software were used.

## 3. Results and conclusion

The mechanical properties of asphalt mixtures containing bitumens modified with nano-lime, Ivanic and Zycotherm were studied. Moreover, in order to investigate the properties of moisture sensitivity in addition to AASHTO T283 regulation, the amount of stripping was examined using SEM images and quantified using MATLAB software. Finally, the TSR results and parameter C, which are obtained by quantifying the results of images taken with SEM, were used to compare the results. The general results obtained in this research are:

- The results of Resilient Modulus test of modified and unmodified mixtures show that the use of Zycotherm and lime reduces the hardness of the mixtures;
- The results of the dynamic creep test show that the use of lime and zycotherm improves the rutting resistance and between these two materials zycotherm has a better effect. In contrast, Ivanic slightly reduces the amount of rutting resistance;
- Marshall Resistance test results show that all three additives improve the compressive strength of the mixture, and among these materials, lime, zycotherm, and Ivanic have the highest values, respectively, compared to the control sample;
- Ivanic additive improves moisture sensitivity and increases the amount of indirect tensile strength. In contrast, mixtures containing lime and zycotherm, have better moisture sensitivity than Ivanic sample, but this improvement in moisture sensitivity is achieved by reducing the indirect tensile strength;
- The results related to TSR and Boiling Water parameters show that all three additives Ivanic, Zycotherm, and Lime, are suitable for anti-stripping properties, and all three of these materials have obtained better conditions than the control sample,

\*Manuscript received: May, 30, 2021; Revised, December, 21, 2021, Accepted, January, 08, 2022.

<sup>1</sup> Corresponding Author: Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. **Email:** ameri@iust.ac.ir

<sup>2</sup> Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> M.Sc. Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>4</sup> Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>5</sup> Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>6</sup> Assistant Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

and among these materials, lime has better conditions compared to others;

- The results related to moisture sensitivity show that the use of nano-lime is more effective than the other two additives. This comparison can also be done based on parameter C obtained from the quantification of the SEM test results;
  - The results of the SEM test are similar to the results of the quantitative tests. However, performing quantitative moisture sensitivity tests is a long process and requires more time and equipment than SEM testing;
  - The results of examining the relationship between the SEM test and the quantitative moisture sensitivity tests show that the qualitative tests obtained from the SEM are of good accuracy.
-

## بررسی ارتباط بین نتایج آزمایش SEM و پارامتر TSR برای سنجش شاخص حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مواد ضدعریان‌شدگی\*

مقاله پژوهشی

محمود عامری<sup>(۱)</sup> حمید شاکر<sup>(۲)</sup> امیرحسین عامری<sup>(۳)</sup> سید امیر سعادتجو<sup>(۴)</sup> سعید فاطمی<sup>(۵)</sup> سید علی ضیائی<sup>(۶)</sup>

**چکیده** باتوجه به این‌که عریان‌شدگی یکی از خرابی‌های اصلی مخلوط‌های آسفالتی به‌شمار می‌رود روش‌ها و آزمون‌های خاصی برای ارزیابی این پدیده توسط آیین‌نامه‌های مختلف پیشنهاد شده‌است که ازجمله آن‌ها می‌توان به آیین‌نامه آشتو T284 و آزمایش آب‌جوشان اشاره کرد. از بین روش‌های بیان‌شده نتایج نامه آشتو T284 باتوجه به عددی بودن نتایج دقت بیشتری در بررسی حساسیت رطوبتی دارد ولی آزمایش‌های کیفی مانند آب جوشان نیز باتوجه به راحتی آزمایش و همچنین دید بصری می‌تواند مفید باشد. بر همین اساس در این تحقیق به بررسی عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانو مواد ضدعریان‌شدگی ازجمله زایکوترم، ایوانیک و نانواهک پرداخته شده‌است. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از این نمونه‌ها برداشت شده و با استفاده از نرم‌افزار متلب به صورت عدد و رقم تبدیل شده‌است تا ارتباط بین نتایج نامه آشتو T284 و روش‌های بصری با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرد. در کنار آزمایش‌های مربوط به عریان‌شدگی از آزمایش‌های مقاومت مارشال، مدول برجهندگی، خزش دینامیکی نیز برای بررسی خصوصیات مخلوط‌ها بهره گرفته شده‌است. نتایج این تحقیق نشان داده‌است که استفاده از بررسی کیفی مانند استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌تواند نتیجه کلی عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی را مشخص کند.

**واژه‌های کلیدی** عریان‌شدگی، شاخص‌های حساسیت رطوبتی، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، متلب.

### مقدمه

آسفالتی ایفا می‌کند و هر تغییری در قیر باعث تغییر در عملکرد مخلوط آسفالتی می‌گردد [3]. استفاده از افزودنی‌ها در قیر باهدف بهبود ویژگی‌های قیر صورت می‌گیرد و براساس ویژگی در نظر گرفته‌شده نوع افزودنی انتخاب و نحوه اختلاط آن مشخص می‌گردد [4]. ازجمله موادی که در سال‌های اخیر برای اصلاح قیر مورد استفاده قرارگرفته‌اند می‌توان به مواد پلیمری، بازیافتی، نانومواد اشاره کرد که هر کدام بسته به هدف خاصی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [5] و [6].

همان‌گونه که بیان شد کارایی روسازی‌های آسفالتی به اختلاط مناسب بین قیر و سنگ‌دانه‌ها و سیستم چسبندگی و پیوستگی بین آن‌ها وابستگی زیادی دارد و یکی از عمده‌ترین خرابی‌های روسازی یعنی عریان‌شدگی در اثر نفوذ آب بین

یکی از اهداف اصلی طراحی و اجرای روسازی آسفالتی اطمینان از عملکرد آن در شرایط مختلفی است که روسازی در طول عمر خود با آن‌ها مواجه می‌گردد. برای رسیدن به این بهترین عملکرد در روسازی، مخلوط آسفالتی باید از کیفیت مناسبی در دوام و پایداری برخوردار باشد [1]. کیفیت روسازی آسفالتی به عوامل متفاوتی مانند کیفیت مصالح سنگی تشکیل‌دهنده، قیر مورد استفاده و اختلاط مناسب بین قیر و سنگ‌دانه مرتبط است [2].

در بین عوامل مطرح‌شده هرچند مقدار قیر از نظر وزنی در مقابل سنگ‌دانه‌ها بسیار کم است اما نقش بسیار مهمی در عملکردهای مختلف روسازی از نظر دوام و پایداری مخلوط‌های

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۰/۱۸ می‌باشد.

Email: ameri@iust.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۲) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۳) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۴) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۵) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۶) استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

بعد از بارگذاری بوده است [14]. بعدها از روش‌های مختلف پردازش تصویر به منظور مدل‌سازی سه‌بعدی نمونه‌های آسفالتی استفاده شد [15] و [16]. در سال ۲۰۱۳ تجزیه و تحلیل ساختار مخلوط آسفالت با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر دیجیتال توسط کی هونمون انجام شد [17]. که براساس تحقیقات زلزله و همکارانش توسعه یافته است [18]. در این تحقیق، اجزای مختلف مخلوط آسفالتی و اطلاعات حجمی مورد بررسی قرار گرفته است. روش‌های استفاده شده برپایه تشخیص آستانه بین هوا، ماستیک (قیر و فیلر) و سنگ‌دانه براساس اطلاعات آزمایشگاهی است.

هدف اصلی در این تحقیق بررسی مشخصات مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده با نانواهک، زایکوترم و ایوانیک بوده و در کنار آن به بررسی ارتباط بین نتایج آزمایش SEM با نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی به روش پیشنهادی AASHTO T283 پرداخته شده است.

### مواد و روش‌ها

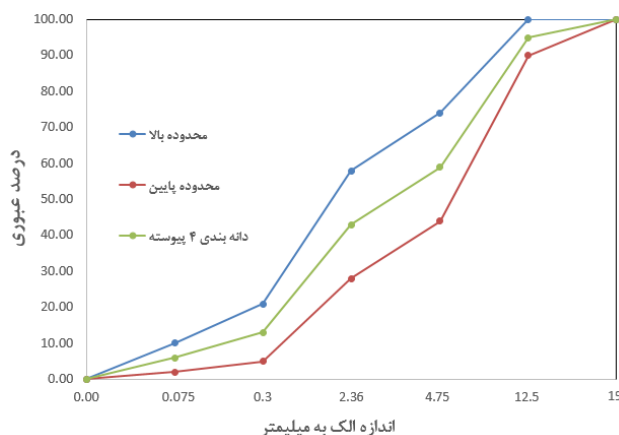
#### مواد و مصالح

در این تحقیق از مصالح سنگی مستخرج شده از معدن اسب چران دماوند مطابق با دانه‌بندی شکل (۱) استفاده شده است. این دانه‌بندی طبق رتبه‌بندی نشریه ۲۳۴ ایران مطابق دانه‌بندی شماره چهار پیوسته می‌باشد. مشخصات مصالح سنگی در جدول شماره (۱) بیان شده است. هم‌چنین از قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ مطابق جدول (۲) به صورت استاندارد استفاده شده است.

برای بهبود عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی در این تحقیق و هم‌چنین بررسی روش پیشنهادی که مرتبط با عریان‌شدگی است از نانومواد زایکوترم، ایوانیک و نانواهک مطابق با مشخصات جدول (۳) استفاده شده است. مواد فوق با استفاده از دستگاه هم‌زن دور بالا (high shear) با قیر مخلوط شده است. درصد ترکیب هر ماده با قیر مطابق با جدول (۴) می‌باشد

سنگ‌دانه‌ها و چسبندۀ قیری اتفاق افتاده که در نتیجه آن با از بین رفتن پیوستگی در ارتباط با چسبندۀ قیری و سنگ‌دانه اتفاق می‌افتد که در نتیجه این عمل عریان‌شدگی به وقوع می‌پیوندد [۷] و [۸]. معمولاً استفاده از سنگ‌دانه‌های مناسب در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند مانع عریان‌شدگی گردد با این وجود اصلاح قیر نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از قیرهای اصلاح شده می‌تواند به کاهش عریان‌شدگی منجر شود [۹]. مواد ضدعریان‌شدگی علاوه بر تأثیر بر پیوند بین سنگ‌دانه و قیر می‌توانند موجب تغییر در سختی و مقاومت شیارشدگی و افزایش و کاهش روند رشد ترک‌ها نیز گردند [۱۰]. برای بررسی عریان‌شدگی در مخلوط‌های آسفالتی آزمایش‌های مختلفی توسط آیین‌نامه‌های معتبر بیان شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به آزمایش AASHTO T283 و آزمایش آب جوشان ASTM D3625 اشاره کرد [۱۱] و [۱۲]. برطبق روش آشتو برای بررسی عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی ابتدا نمونه‌هایی با فضای خالی ۶ تا ۸ درصد ساخته می‌شوند. برای هر نمونه مورد بررسی ۶ نمونه ساخته می‌شود. سه نمونه در دمای محیط، مورد آزمایش کشش غیرمستقیم قرار می‌گیرند و سه نمونه به صورت تر (بعد از طی یک دوره ذوب و انجماد) مورد آزمایش قرار می‌گیرند و در نهایت پارامتر TSR از تقسیم مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم تر به مقاومت کششی غیرمستقیم خشک به صورت درصدی بیان می‌شود که این عدد بیانگر مقدار عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی می‌باشد [۱۱]. حداقل مقدار پارامتر TSR در آیین‌نامه روسازی ایران برابر با ۷۵ درصد در نظر گرفته شده است [۱۲]. در روش آبجوشان که توسط ASTM پیشنهاد شده است مقدار عریان‌شدگی به صورت کیفی مورد بررسی قرار می‌گیرد در این آزمایش ۲۵۰ گرم از نمونه که به روش چارک جدا شده است در حدود ۸۰۰ میلی‌لیتر آب در حال جوش به مدت ده دقیقه قرار می‌گیرد و در انتها نمونه‌ها به صورت بصری مورد بررسی قرار می‌گیرند [۱۲].

از طرفی در سال ۱۹۹۳ در دانشگاه کالیفرنیا جنوبی برای اولین بار پردازش تصویر از نمونه‌های مخلوط آسفالتی انجام شد. هدف اصلی که این تحقیق بر مبنای آن انجام گرفت مطالعه داخل هسته آسفالت بعد از اجرا و یافتن تغییر شکل و خرابی قبل و



شکل ۱ دانه بندی مصالح کاربردی

جدول ۱ مشخصات مصالح سنگی

نتایج آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		استاندارد آزمایش	شرح
	رویه	آستر		
۲۳	۲۵	۳۰	AASHTO T96	حداکثر سایش به روش لوس آنجلس (درصد) برای مصالح درشت دانه
۰/۱	۸	۸	AASHTO T104	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد) برای مصالح درشت دانه
۰/۳	۱۵	۱۵	ASTM D4791	سنگ دانه های پهن و دراز (درصد) برای مصالح درشت دانه
۲/۲	۲/۵	۲/۵	AASHTO T85	حداکثر درصد جذب آب درشت دانه
۱/۰	۱۲	۱۲	AASHTO T104	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد) برای مصالح ریزدانه
۲/۴	۲/۵	۲/۸	AASHTO T84	حداکثر درصد جذب آب ریز دانه

جدول ۲ مشخصات فنی قیر مصرفی

قیر ۶۰-۷۰	حدود استاندارد		روش آزمایش	خصوصیات
	حد بالا	حد پایین		
۱/۰۳	۱/۰۶	۱/۰۱	ASTM D70	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی گراد
۶۶	۷۰	۶۰	ASTM D5	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد
۵۳	۵۶	۴۹	ASTM D36	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)
۱۰۳	--	۱۰۰	ASTM D113	انگمی در ۲۵ درجه سانتی گراد
۳۰۰	--	۲۵۰	ASTM D92	نقطه اشتعال (درجه سانتی گراد)
۵/۹۹	--	--	ASTM D4	حلالیت در دی سولفید (درصد)
۰/۲	--	--	ASTM D6	افت وزنی در اثر حرارت (درصد)

جدول ۳ خصوصیات افزودنی های مورد استفاده

درجه اشتعال	نوع ماده	وزن مخصوص	زایکوترم
۸۰ درجه سانتی گراد	مایع بدون بو و زرد رنگ	۰/۹۷ گرم بر سانتی متر مکعب	
ارزش آمین	ارزش اسید	نوع ماده	ایوانیک
۱۵۰	۳۵	مایع شفاف	
CaO	Ca(OH) <sup>2</sup>	ثرفد افت وزنی در برابر حرارت	نانو آهک
۰/۵	۹۲	۱۰/۹	

جدول 4 ترکیبات استفاده شده در تحقیق

نام ترکیب	اصلاح کننده	درصد مورد استفاده
نمونه شاهد	بدون اصلاح کننده	۰
نمونه اصلاح شده با نانو آهک	نانو آهک	۲ درصد قیر (ساعدی و همکاران ۱۳۹۷)
نمونه اصلاح شده با ایوانیک	ایوانیک	۰/۱ درصد قیر (عامری و همکاران ۱۳۹۶)
نمونه اصلاح شده با زایکوترم	زایکوترم	۰/۱ درصد قیر (Mirzababaei, 2016)

آزمایش مقاومت مارشال در این تحقیق طبق استاندارد ASTM D 1559 انجام شد [19]. بر همین اساس ابتدا نمونه‌ها با دستگاه تراکم مارشال متراکم شدند و سپس به مدت نیم ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و در نهایت با دستگاه شکست مارشال مورد آزمون قرار گرفتند.

**آزمایش مدول برجهنگی.** آزمایش مدول برجهنگی یک آزمایش غیرمخرب می‌باشد که در آن، بارهای اعمال شده به نمونه کوچک هستند. این آزمایش توسط دستگاه UTM انجام شد. مدول برجهنگی را با نماد (MR) نشان می‌دهند و مقداری که MR نشان می‌دهد حداکثر انرژی قابل تحمل برای واحد حجم مخلوط آسفالتی است به گونه‌ای که هیچ تغییر شکل دائمی به وجود نیاید و با باربرداری مخلوط به حالت اول خود برگردد. مقدار MR با انتگرال گیری از ناحیه محصور شده نمودار تنش- کرنش به دست می‌آید.

در این تحقیق نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش مدول برجهنگی با استفاده از دستگاه ژیراتوری و طبق استاندارد ASTM D 3387 متراکم شد. در نهایت به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری و طبق استاندارد ASTM D4123 با اعمال بار به اندازه ۴۰۰ نیوتن، به صورت نیمه‌سینوسی با ۰/۵ ثانیه بارگذاری و ۱/۵ ثانیه باربرداری، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفتند.

**آزمایش خزش دینامیکی.** برای انجام آزمایش خزش دینامیکی طبق استاندارد Australian code AS 2891-12 نمونه‌های با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر و درصد فضای خالی ۵ درصد ساخته شد. در نهایت با استفاده از دستگاه UTM25 با ۴۵۰ کیلو پاسکال در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و به صورت مربعی شکل به نمونه اعمال گردید و برپایه تئوری ویتزک تعداد دفعات بارگذاری تا شروع ناحیه سوم به عنوان عدد روانی و خروجی آزمایش گزارش شد.

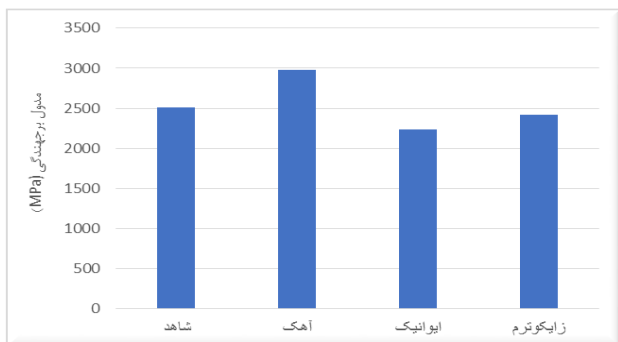
اختلاط هر سه افزودنی با استفاده از دستگاه هم‌زن دور بالا (High Shear) و در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و با سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۳۰ دقیقه انجام گرفته است. درصد قیر بهینه برای نمونه شاهد طبق روش مارشال برابر ۵/۱۰ برای نمونه حاوی زایکوترم برابر ۵/۱۶، برای نمونه حاوی ایوانیک برابر ۵/۱۵ و برای نمونه حاوی نانو آهک برابر ۵/۳۱ به دست آمد. لازم به ذکر است ساخت نمونه‌های مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های اصلی با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری صورت گرفته است.

### روش آزمایش‌ها

**آزمایش کشش غیرمستقیم.** ساخت و تست نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش کشش غیرمستقیم در این تحقیق بر اساس استاندارد AASHTO T283 انجام شده است [11]. بر همین اساس نمونه‌های ۱۲۰۰ گرمی با دستگاه ژیراتوری و با درصد فضای خالی ۷ درصد متراکم شدند. سپس نمونه‌ها به دو سری تر و خشک تقسیم شدند. در نهایت نمونه‌های خشک در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مورد تست قرار گرفتند. نمونه‌های تر ابتدا با استفاده از وکیوم کردن بیش از ۸۵ درصد اشباع گردیدند و به مدت ۱۶ ساعت در دمای منفی ۱۷ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای ۶۰ درجه سانتی-گراد نگهداری شد و در نهایت دو ساعت در آب دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و مورد تست قرار گرفتند.

**آزمایش مقاومت مارشال.** استقامت مارشال به طور چشم‌گیری با زاویه اصطکاک داخلی مصالح و ویسکوزیته قیر در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به طور کلی می‌توان گفت که مقدار استقامت مارشال نشان‌دهنده توانایی مخلوط آسفالتی برای مقاومت در برابر شیارشدگی و برآمدگی تحت بارگذاری‌های سنگین ترافیکی می‌باشد.

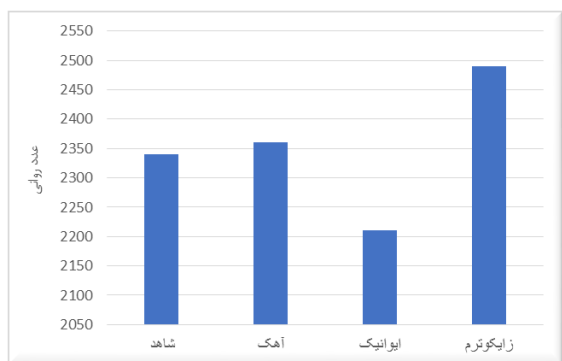
تحقیقات دیگر [۲۰] پیداست باعث تغییر بسیار ناچیزی در سختی و به تبع آن در مدول برجهنگی مخلوط آسفالتی شده است.



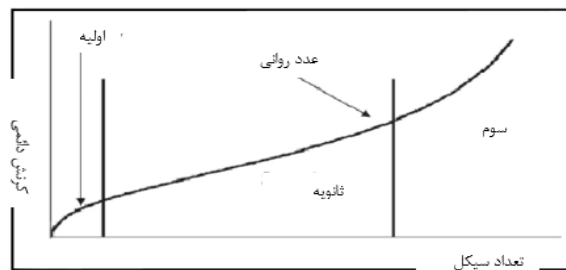
شکل ۳ نتایج آزمایش مدول برجهنگی

### خزش دینامیکی

در این تحقیق، عدد روانی براساس پیشنهاد NCHRP Project 09-33، برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. عدد روانی برای نمونه‌های این تحقیق در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌گونه که از شکل برمی‌آید نتایج مربوط به خزش دینامیکی برای نمونه‌ها روندی متفاوت دارد. در این نمودار شاهد بهبود قابل ملاحظه عدد روانی برای نمونه حاوی زایکوترم هستیم. نمونه حاوی آهک نیز افزایش داشته است اما این افزایش به‌مانند زایکوترم آشکار نیست. در مقابل نمونه حاوی ایوانیک روند کاهشی را نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که این عدد روانی خیلی پایینی نسبت به نمونه شاهد دارد. باتوجه به این نمودار می‌توان گفت استفاده از زایکوترم و آهک باعث بهبود شیارشدگی مخلوط می‌شوند ولی استفاده از ایوانیک نه تنها بهبودی در شیارشدگی پدید نمی‌آورد بلکه به‌صورت جزئی مقاومت در برابر شیار شدگی را کاهش می‌دهد.



شکل ۴ نتایج آزمایش خزش دینامیکی



شکل ۲ منحنی کرنش تجمعی کل در برابر سیکل بارگذاری در آزمایش خزش

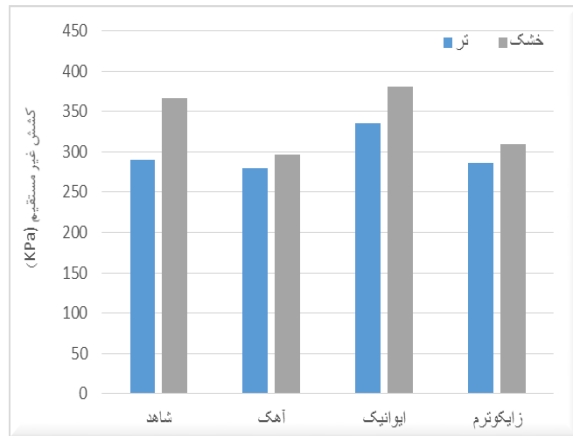
**آزمایش SEM.** برای انجام این آزمایش ابتدا به‌روش چارک ۲۵۰ گرم از مخلوط جدا شده و در آب جوشان به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفته است. برای این کار از استاندارد آزمایش آب‌جوشان مطابق آیین‌نامه ASTM D3625 بهره گرفته شده است. سپس مصالح حدوداً ۱/۲ گرم جدا می‌شوند و در دستگاه میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) قرار می‌گیرند و تصاویر با زوم ۵۰۰ برابری برداشت می‌شود.

**پردازش تصاویر با متلب.** برای به‌دست آوردن اعداد کمی برای انطباق‌سازی با نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی که از طریق آزمون کشش غیرمستقیم به‌دست آمده است در این تحقیق از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. برای این کار ابتدا تصاویر به‌صورت سیاه‌وسفید تبدیل شده و با نسبت دادن سری اعداد به هر کدام از رنگ‌های طیف انجام گرفته است. در نهایت درصد هر طیف رنگ سیاه‌وسفید ملاکی برای ارزیابی در نظر گرفته می‌شود.

### نتایج

#### مدول برجهنگی

نتایج آزمایش مدول برجهنگی نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۳) نشان داده شده است. آزمایش مدول برجهنگی از آن جهت مورد بررسی قرار می‌گیرد که به بررسی سخت‌شدگی مخلوط می‌پردازد و پارامتری مهم برای تعیین ضخامت در اختیار طراح قرار می‌دهد. همان‌گونه که از نتایج مشخص است نانوآهک باعث افزایش مدول برجهنگی مخلوط شده و زایکوترم و ایوانیک باعث کاهش مدول برجهنگی شده‌اند. نانوآهک با افزایش سختی قیر باعث افزایش سختی مخلوط آسفالتی می‌گردد، ولی ایوانیک باعث کاهش سختی قیر می‌شود [۲۰] و به همین دلیل باعث کاهش مدول برجهنگی مخلوط آسفالتی شده است. از طرفی زایکوترم همان‌گونه که در نتایج



شکل ۶ نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم



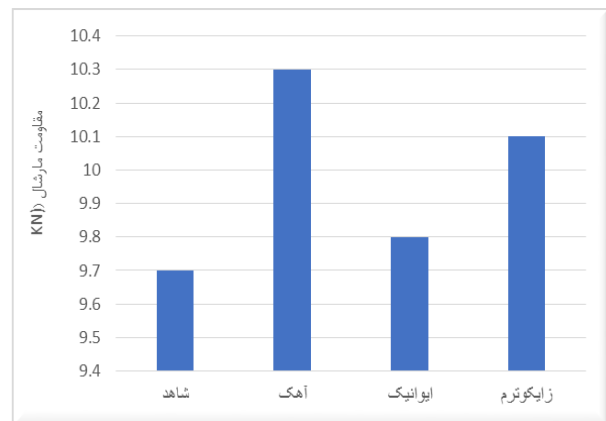
شکل ۷ نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی بر اساس پارامتر TSR

### حساسیت رطوبتی

پارامتر TSR به عنوان پارامتری برای تعریف حساسیت رطوبتی استفاده می‌شود. این پارامتر از تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم تر به مقاومت کششی غیرمستقیم خشک اطلاق می‌شود. نتایج مربوط به این پارامتر برای اصلاح‌کننده‌های مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که از نتایج پیداست هر سه اصلاح‌کننده سبب افزایش مقاومت در برابر عریان‌شدگی شده‌اند که در این بین مقدار مربوط به مخلوط حاوی نانوآهک بیشتر از دو افزودنی دیگر است. در توجیه روند مشاهده شده می‌توان چنین بیان کرد که هرچه قدر مقدار مقاومت کششی تر و خشک به هم نزدیک‌تر باشند مقدار حساسیت رطوبتی بهتر خواهد بود حال آن‌که این نزدیک شدن با کاهش مقدار مقاومت کششی خشک همراه شود یا افزایش مقدار مقاومت کششی تر، بستگی به خصوصیات ماده مورد استفاده دارد؛

### مقاومت مارشال

نتایج مربوط به آزمایش مقاومت مارشال در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودار برمی‌آید همه افزودنی‌ها تأثیر مثبتی در استقامت مارشال داشته‌اند و این تأثیر مثبت برای نمونه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. برای نمونه‌های حاوی نانوآهک این مقدار بیشتر و برای نمونه مربوط به ایوانیک این مقدار کمتر است. دلیل این تغییرات را به نوعی می‌توان به سختی ناشی از اضافه شدن ماده اصلاح‌کننده نسبت داد چراکه نانوآهک مقدار بیشتری سختی را افزایش داده و ایوانیک باعث کاهش سختی شده است. از طرفی زایکوترم که تأثیر چندانی در مدول برجهنگی و سختی ندارد تفاوتی مابین ایوانیک و نانوآهک ایجاد کرده است.



شکل ۵ نتایج آزمایش مقاومت مارشال

### مقاومت کشش غیرمستقیم

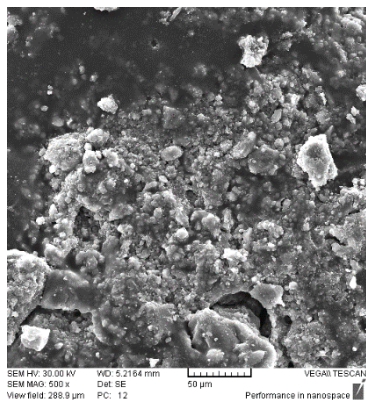
شکل (۶) نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم را در دو حالت تر و خشک نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نتایج برمی‌آید اصلاح‌کننده‌ها تغییرات زیادی را در نمونه‌ها ایجاد کرده است و هر دو مقاومت تر و خشک را دست‌خوش تغییر قرار داده‌اند. در بین نتایج، ایوانیک با افزایش هر دو مقاومت تر و خشک همراه بوده که با ادعای گروه سازنده این ماده نیز هم‌خوانی دارد. از طرفی استفاده از نانوآهک و زایکوترم باعث کاهش ناچیز در مقاومت تر و کاهش بیشتر در مقاومت خشک بوده است.



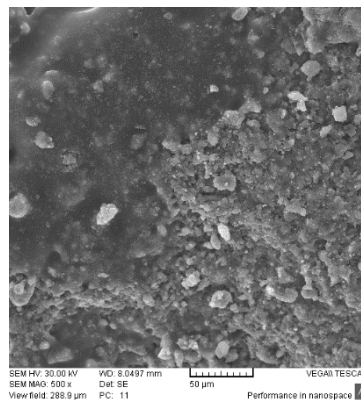
### SEM

نتایج به دست آمده از تصاویر SEM در شکل (۸) گزارش شده است. در این تصاویر محل های سفید نشان از وجود قیر دارد و محل های سیاه نشان از وجود قیر کمتر دارد.

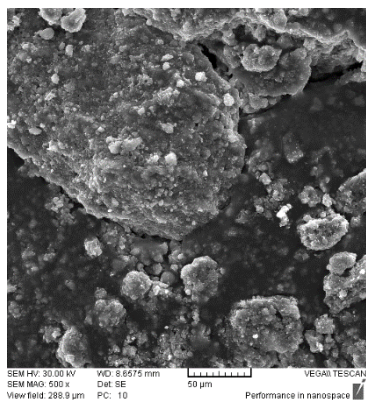
به عنوان مثال برای نمونه حاوی نانوآهک و زایکوترم بهبود حساسیت رطوبتی با کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم خشک اتفاق افتاده حال آن که برای نمونه حاوی ایوانیک با افزایش مقاومت های تر و خشک اتفاق افتاده است.



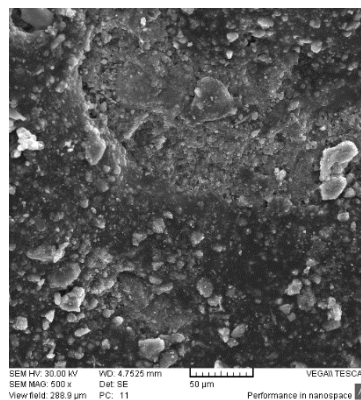
SEM مربوط به نمونه اصلاح شده با نانو آهک



SEM مربوط به نمونه شاهد



SEM مربوط به نمونه اصلاح شده با زایکوترم



SEM مربوط به نمونه اصلاح شده با ایوانیک

شکل ۸. نتایج آزمایش SEM برای نمونه های اصلاح شده و اصلاح نشده

جدول ۵ نتایج خروجی متلب برای نمونه های SEM

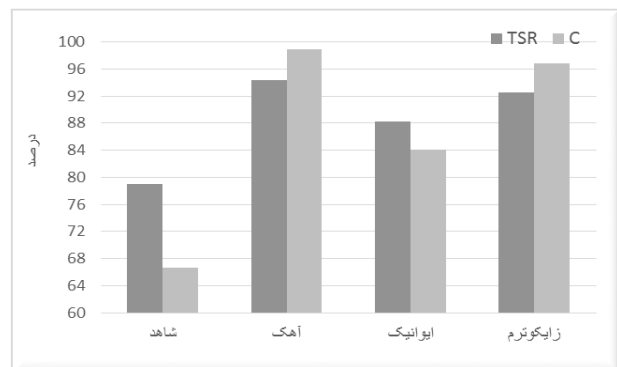
نام نمونه	درصد بخش عریان شده (A)	درصد بخش عریان نشده (B)	$C=100*((B-A)/B)$
شاهد	۲۲/۴	۷۵/۶۰	۶۷/۷۲
اصلاح شده با آهک	۱/۰۸	۹۸/۹۲	۹۸/۹۱
اصلاح شده با ایوانیک	۱۳/۷۵	۸۶/۲۵	۸۴/۰۶
اصلاح شده با زایکوترم	۳/۱۲	۹۶/۸۸	۹۶/۷۸

۱. نتایج آزمایش مدول برجهندگی مخلوط‌های اصلاح‌شده و نشده نشان می‌دهد که استفاده از زایکوترم و آهک باعث کاهش سختی مخلوط‌ها می‌شوند.
۲. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان می‌دهد که استفاده از آهک و زایکوترم باعث بهبود شیارشدگی می‌شوند و در بین این دو ماده زایکوترم تأثیر بهتری دارد و در مقابل ایوانیک به صورت جزئی مقدار مقاومت شیارشدگی را کاهش می‌دهد.
۳. از نتایج آزمون استقامت مارشال می‌توان مشاهده کرد که هر سه افزودنی باعث بهبود مقاومت فشاری مخلوط می‌شوند و در بین این مواد آهک، زایکوترم و ایوانیک به ترتیب بیشترین مقدار را نسبت به نمونه شاهد کسب کرده‌اند.
۴. نتایج کشش غیرمستقیم باتوجه به نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم، در بین نمونه‌های اصلاح‌شده ایوانیک شرایط بهتری را دارد چراکه بهبود حساسیت رطوبتی را با افزایش مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم به دست می‌دهد. در مقابل نمونه حاوی آهک و زایکوترم اگرچه حساسیت رطوبتی بهتری نسبت به نمونه ایوانیک دارند ولی این بهبود در حساسیت رطوبتی را با کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم کسب می‌کنند.
۵. نتایج مربوط به پارامتر TSR و آب جوشان نشان می‌دهد که برای عریان‌شدگی هر سه ماده ایوانیک، زایکوترم و آهک مناسب هستند و هر سه این مواد شرایط بهتری را نسبت به نمونه شاهد کسب کرده‌اند و در بین این مواد آهک شرایط بهتری نسبت به بقیه مواد دارد.
۶. نتایج مربوط به حساسیت رطوبتی نشان داد که استفاده از نانوآهک تأثیر بیشتری نسبت به دو افزودنی دیگر دارد. این مقایسه براساس پارامتر C که از کمی‌سازی نتیجه آزمایش SEM به دست آمده بود نیز قابل برداشت است.
۷. نتایج آزمایش SEM نشان داد که نتایج این آزمایش کیفی نیز می‌تواند دربرگیرنده نتایج آزمایش‌های کمی باشد. حال آن‌که برای انجام آزمایش‌های کمی حساسیت رطوبتی مراحل طولانی است و نیاز به زمان و تجهیزات بیشتری نسبت به آزمایش SEM دارد.
۸. نتایج مربوط به بررسی ارتباط بین آزمایش SEM و آزمایش‌های کمی حساسیت رطوبتی نشان داد که در واقع

### مقایسه نتایج حساسیت رطوبتی

تصاویر برداشت‌شده به وسیله SEM (شکل ۸) وارد محیط نرم‌افزار متلب شده و نتایج به دست آمده در جدول (۵) گزارش شده است. در این جدول پارامتری به نام پارامتر C معرفی شده است که این پارامتر از بررسی نتایج برداشت‌های مختلف و بررسی خروجی‌های مختلف نرم‌افزار متلب توسط محققان این تحقیق پیشنهاد شده است. در نهایت این پارامتر با پارامتر TSR به دست آمده از حساسیت رطوبتی مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج این مقایسه در شکل (۹) گزارش شده است.

همان‌گونه که در شکل (۹) مشخص است هم‌بستگی تقریبی بین پارامتر C و پارامتر TSR وجود دارد. هرچند تفاوت‌هایی بین این دو عدد وجود دارد اما استفاده از روش یادشده کیفی است و می‌توان خروجی آن را به عنوان روشی برای بررسی عریان‌شدگی مطرح کرد.



شکل ۹ مقایسه پارامتر C و ضریب TSR

### جمع‌بندی

در این تحقیق به مطالعه خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیرهای اصلاح‌شده با نانوآهک، ایوانیک و زایکوترم پرداخته شده است. هم‌چنین برای بررسی خصوصیات حساسیت رطوبتی در کنار آیین‌نامه AASHTO T283، مقدار عریان‌شدگی با استفاده از تصاویر SEM مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از نرم‌افزار متلب کمی‌سازی شده است. در نهایت با مقایسه بین نتایج TSR و پارامتر C که از کمی‌سازی نتایج تصاویر برداشت‌شده با SEM به دست آمده است برای مقایسه نتایج استفاده شده است. نتایج کلی به دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

آزمایش‌های کیفی به‌دست‌آمده از SEM از دقت مناسبی برخوردار هستند.

## مراجع

- Ameri, M., Shaker, H., Badarloo, B., & Jafari, F., "Numerical and Experimental Investigation on the Modified of Hot Mix Asphalt Concrete Containing Crumb Rubber and Waste Pet", *Tehnički vjesnik*, Vol. 27, No. 4, pp. 1186-1193, (2020).
- Ameri, M., Mohammadi, R., Mousavinezhad, M., Ameri, A., Shaker, H., & Fasihpour, A., "Evaluating Properties of Asphalt Mixtures Containing polymers of Styrene Butadiene Rubber (SBR) and recycled Polyethylene Terephthalate (rPET) against Failures Caused by Rutting", *Moisture and Fatigue, Frattura ed Integrità Strutturale*, Vol. 14, No. 53, pp. 177-186, (2020).
- Jahanian, H. R., Shafabakhsh, G. H., & Divandari, H., "Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) Containing Bitumen Modified with Gilsonite", *Construction and Building Materials*, Vol. 131, pp. 156-164, (2017).
- Ameri, M., Nemati, M., & Shaker, H., "Experimental and Numerical Investigation of the Properties of the Hot Mix Asphalt Concrete with Basalt and Glass Fiber", *Frattura ed Integrità Strutturale*, Vol. 13, No. 50, pp. 149-162, (2019).
- Mansourian, A., Ameri, M., Mirabi Moghaddam, M. H., Riahi, E., Shaker, H., & Ameri, A. H., "Behavioural Mechanism of SBR, LDPE, and SBS Modified Bituminous Mixtures", *Australian Journal of Civil Engineering*, pp. 1-10, (2021).
- عامری، ا.، عامری، م.، شاکر، ح.، کرم رودی، م.، "ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات رئولوژیکی و فیزیکی قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک و پلیمر EVA"، *مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل*، ۶(۳)، صص. ۱-۱۲، (۱۳۹۹).
- عامری، ا.، عامری، م.، شاکر، ح.، جعفری، ف.، بدرلو، ب.، "ارزیابی اثر افزودنی دوگانه پودر لاستیک و PET به صورت عددی و آزمایشگاهی در مخلوط آسفالتی گرم"، *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۵۴(۱)، ص. ۱۲، (۱۴۰۱).
- عامری، م.، منصوریان، ا.، شاکر، ح.، عامری، ا.، "تعیین مقدار مناسب استفاده از ترکیب سرباره ریزدانه و درشت‌دانه براساس خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش سطح پاسخ"، *مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل*، ۷(۳)، صص. ۱۱-۲۰، (۱۴۰۰).
- Farazmand, P., Hayati, P., Shaker, H., & Rezaei, S., "Relationship between Microscopic Analysis and Quantitative and Qualitative Indicators of Moisture Susceptibility Evaluation of Warm-Mix Asphalt Mixtures Containing Modifiers", *Frattura ed Integrità Strutturale*, Vol. 14, No. 51, pp. 215-224, (2020).
- Yilmaz, M., & Yalcin, E., "The Effects of Using Different Bitumen Modifiers and Hydrated Lime Together on the Properties of Hot Mix Asphalts", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 17, No. 2,, pp. 499-511, (2016).
- American Association of State Highway and Transportation Officials, "Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage", Aashto T283-99, Washington D.C., USA, (2000).
- American Society for Testing and Materials, "Standard Practice for Effect of Water on Bituminous Coated Aggregate Using Boiling Water", ASTM D 3625-96, West Conshohocken, PA, USA, (2001).
- آیین‌نامه‌ی روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴)، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، (۱۳۹۰).
- Wang, H., & Hao, P., "Numerical Simulation of Indirect Tensile Test Based on the Microstructure of Asphalt

- Mixture", *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. Vol. 23, No. 1, 21-29, (2011).
15. Moon, K. H., Falchetto, A. C., & Jeong, J. H., "Microstructural Analysis of Asphalt Mixtures Using Digital Image Processing Techniques", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp.74-86, (2014).
16. Zelelew, H. M., Papagiannakis, A. T., & Masad, E., "Application of Digital Image Processing Techniques for Asphalt Concrete Mixture Images", *In The 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, pp. 119-124, (2008, October).
17. Nejad, F. M., Motekshases, F. Z., Zakeri, H., & Mehrabi, A., "An Image Processing Approach to Asphalt Concrete Feature Extraction", *Journal of Industrial and Intelligent Information*, Vol. 3, No. 1, pp. 54-60, (2015).
18. Al-Qadi, I. L., Leng, Z., Lahouar, S., & Baek, J., "In-Place Hot-Mix Asphalt Density Estimation Using Ground-Penetrating Radar", *Transportation research record*, Vol. 2152, No. 1, pp. 19-27. (2010).
19. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus", ASTM D1559, West Conshohocken, PA, USA, (2000)
۲۰. امیری، ایمان. «ارزیابی اثر نانومواد و مواد ضدعریان‌شدگی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تهران: دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۹۵).
۲۱. ساعدی، د.، قهرمانی، ح. و حامدی، غ.، «ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر قیر اصلاح شده با نانواهک هیدراته بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای»، دومین کنفرانس ملی توسعه زیرساخت‌های فناوری صنعت راه و ساختمان ایران، تهران، (۱۳۹۷).
۲۲. عامری، م.، وامق، م.، امیری، ا.، چاووشیان نائینی، س. ف.، «ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ایوانیک و زایکوترم»، فصل‌نامه مهندسی حمل و نقل ۹ (ویژه‌نامه روسازی)، صص. ۲۷-۴۲، (۱۳۹۶).
23. Mirzababaei, P., "Effect of Zycotherm on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations ", *Construction and Building Materials*, Vol. 116, pp. 403-412, (2016).