

## Sıcak Karışım Asfalt Kaplamanın Su Hasarı Direnci Üzerinde RET Katkısının Etkisi

Tacettin GEÇKİL<sup>1\*</sup>, Maksut SELOĞLU<sup>2</sup>, Ceren Beyza İNCE<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

<sup>2</sup> İnşaat Bölümü, Elazığ OSB Meslek Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

\*<sup>1</sup> tacettin.geckil@inonu.edu.tr, <sup>2</sup> mseloglu@firat.edu.tr, <sup>3</sup> c.beyzaince@gmail.com

(Geliş/Received: 16/02/2021;

Kabul/Accepted: 22/04/2021)

**Öz:** Bu çalışmada, reaktif terpolimer (RET) katkılı sıcak karışım asfalt kaplamaların su etkilerine karşı direnci üzerinde reaktif terpolimer (RET) katkısının etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, penetrasyon sınıfı B 100/150 olan saf asfalta ağırlıkça %0,5; %0,75 ve %1 oranlarında RET (Elvaloy 4170) eklenerek modifiye asfaltlar hazırlanmıştır. Modifiye asfaltların fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası ve duktilite deneyleri ile, işlenebilirlik özellikleri ise dönel viskozimetre (RV) deneyi ile belirlenmiştir. Daha sonra, karışım tasarımı için agrega ve saf asfalt kullanılarak Marshall yöntemine göre karışımın optimum asfalt içeriği belirlenmiştir. Belirlenen bu oran sabit tutularak saf ve modifiye asfaltlar ile sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan saf ve RET katkılı modifiye karışım numuneleri Marshall stabilitesi, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) ve dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneylerine maruz bırakılmıştır. Asfalt test sonuçlarına göre, RET katkısı ile modifiye bağlayıcıların sertliğinin ve karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarının arttığı görülmüştür. Karışım sonuçlarına göre, özellikle %0,75 katkılı karışımların Marshall stabilitesi, RMS ve dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) değerlerinin önemli artışlar göstermesi sebebiyle yol kaplamalarının suya karşı hassasiyeti üzerinde RET katkısının iyileştirici bir etki gösterdiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Asfalt, RET, modifiye karışım, dolaylı çekme mukavemeti, su hassasiyeti.

### The Effect of RET Additive on the Water Damage Resistance of Hot Mix Asphalt

**Abstract:** In this study, the effects of reactive terpolymer (RET) additive on the resistance of reactive terpolymer (RET) additive hot mix asphalt pavements against water effects were investigated. For this purpose, modified asphalts were prepared by adding 0.5%, 0.75% and 1% RET (Elvaloy 4170) by weight to pure asphalt with penetration class B 100/150. The physical properties of modified asphalts were determined by penetration, softening point and ductility tests, the workability properties were determined by the rotational viscometer (RV) test. Then, the optimum asphalt content of the mixture was determined according to the Marshall method using aggregate and pure asphalt for the mixture design. By keeping this determined ratio constant, samples of pure and modified asphalts and hot mixes were prepared. The prepared pure and modified mixture samples with RET additives were subjected to Marshall stability, retained Marshall stability (RMS) and indirect tensile strength (ITS) tests. According to the asphalt test results, it was observed that the hardness and mixing-compression temperatures of the modified binders increased with RET additive. According to the results of the mixture, it was observed that the RET additive had an improving effect on the sensitivity of road pavements to water, especially since the Marshall stability, RMS and indirect tensile strength ratio (ITSR) values of the mixtures with 0.75% additive increased significantly.

**Key words:** Asphalt, RET, modified mixture, indirect tensile strength, water sensitivity.

### 1. Giriş

Sıcak karışım asfalt (HMA) kaplamalar inşa edildikten bir süre sonra farklı trafik yükleri, çevre ve iklim koşulları sebebiyle çeşitli deformasyonlara uğramaktadır. Oluşan deformasyonlar, HMA kaplamaların performansına ve sürüş konforuna doğrudan etki etmektedir. Özellikle iklim koşullarına bağlı olarak HMA kaplamaların bünyesinde oluşan suyun varlığı kaplamanın dış etkilere karşı koyma yeteneği olan durabilitesi üzerinde olumsuz etkilere sebep olmaktadır [1-3].

Fazla yağış alan bölgelerde yol platformu üzerinde oluşan suyun varlığı güvenlik bakımından sürücüler üzerinde endişe oluştururken, kaplama yapısına giren su ise agrega ile asfalt arasındaki bağın zayıflaması veya asfalt filminin soyulmasına (adezyon kaybı) ve kaplamanın ayrışmasına neden olarak (kohezyon kaybı) kaplamanın mekanik özelliklerinin bozulmasına sebep olmaktadır [4-8]. Su etkisiyle oluşan bu bozulmalar,

\* Sorumlu yazar: [tacettin.geckil@inonu.edu.tr](mailto:tacettin.geckil@inonu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-8070-6836, <sup>2</sup> 0000-0002-0200-8423, <sup>3</sup> 0000-0002-6385-0964

kaplamanın performansının azalmasına ve yol bakım-onarım maliyetlerinin ciddi oranda artmasına yol açmaktadır. Su hasarı sebebiyle HMA'nın içsel dayanımı azaldığında, trafik yükleri sebebiyle kaplamada meydana gelen gerilmeler büyük oranda artış gösterir ve kaplamada prematüre tekerlek izi, yorulma çatlakları ve sökümler meydana gelmektedir [5,9].

Kaplamada su sebebiyle meydana gelen deformasyonları azaltmak amacıyla araştırmacılar tarafından, agregaya ile asfalt arasındaki bağ kuvvetini güçlendirmek ve asfaltın daha az yüzey gerilmesiyle ıslanmasını arttırmak için hidrate ve sönmemiş kireç, geleneksel sıvı katkıları, metal iyonu yüzey ajan katkıları, silan katkıları ve silikon katkıları soyulma önleyici olarak sıklıkla kullanılmaktadır [6,10]. Özellikle hidrate ve sönmemiş kireç soyulma önleyici olarak en yaygın kullanılan katı tipteki katkılarıdır [10-12]. HMA'ya kireç eklenmesiyle, kirecin yapıdaki yüksek polar moleküllerle reaksiyona girerek suyu çekmeyen çözünmez tuzlar oluşturduğu kısaca yapı ile reaksiyona girdiği ve kirecin asfalt ile agregaya arasındaki bağ kuvvetlendirdiği görülmüştür [13]. Hidrate kireci HMA'ya eklemenin beş farklı yöntemi vardır. Bunlar sırasıyla kireç bulamacından kuru veya yaş agregaya, kuru kireçten yaş agregaya, kuru kireçten kuru agregaya, kuru kireçten direkt asfalta ve sönmemiş kireç bulamacından kuru veya yaş agregaya şeklindedir [10,12,14]. Su hasarını azaltmak için bir diğer yöntem de polimer modifiye asfaltların HMA'larda kullanılmasıdır [15]. Sudan kaynaklı hasarların azaltılmasında polimer modifiye asfaltların kullanımı sınırlı olsa da soyulma önleyici katkıları gibi işlev gördüğü çeşitli çalışmalarda belirtilmiştir [16]. Yapılan çalışmalarda, polimer modifiye asfalt karışımların, modifiye olmayan asfalt karışımlara kıyasla sudan kaynaklı bozulmalara karşı daha dirençli olduğu görülmüştür [17-19].

Bu çalışmada ise, bir polimer türü olan ve daha önce karışım modifikasyonunda kullanılmamış olan RET (Elvaloy 4170) katkısının yol kaplamalarının suya karşı hassasiyetine olan etkisi araştırılmıştır.

Reaktif terpolimerler asfalt içerisindeki asfaltlar ile kimyasal reaksiyona girerek karışımın homojen ve tek fazlı bir yapı olmasını sağlarlar. Ancak, bu polimerlerin asfalt modifikasyonunda kullanım oranı sınırlı olabilmektedir. Çünkü fazla kullanımda karışım içerisinde jelleşme meydana getirerek karışımın topaklaşmasına sebep olmakta ve işlenebilirliğini olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple modifikasyonda polimer cinsine bağlı olmakla birlikte bu oran genellikle %2-2,5 ile sınırlandırılmıştır. Modifikasyonda RET ile asfalt bağlayıcı arasındaki kimyasal reaksiyonun hızlandırmak amacıyla çoğunlukla karışıma katalizör olarak fosforik asit ilave edilmektedir. Fosforik asit kullanımı ile karışımında kullanılabilen RET miktarı azalmakta ve karışımın tekerlek izi, yaşlanma ve yorulma direnci ayrıca artış göstermektedir [20-22]. RET kullanılarak yapılan çalışmalarda modifiye asfaltların kıvamlarında sertleşme meydana geldiği, sıcaklık hassasiyetlerinin azaldığı, kalıcı deformasyon ve yorulma dirençlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca asfaltın yüksek sıcaklık ve oksidasyon direnci üzerinde RET'in iyileştirici etkisi gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte, oluşan kimyasal reaksiyon sebebiyle bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki depolama stabilitesi üzerinde çok olumlu bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir [20-25]. RET katkısı literatürde asfalt modifikasyonunda çok sık kullanılmış olmasına rağmen, sıcak karışımların performansı ve karışımın su hasarı direnci üzerindeki etkilerine yönelik çalışmalar yok denecek kadar azdır.

Bu çalışmada, Elvaloy 4170 polimerinin HMA kaplamalarının su veya nem hasarlarına karşı direnci Marshall stabilitesi, RMS ve ITS deneyleri yardımı ile tespit edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Bu çalışmada, asfalt modifikasyonu için Batman TUPRAŞ rafinerisinden temin edilen penetrasyon sınıfı B100/150 saf asfalt ve Elvaloy 4170 katkısı kullanılmıştır. Asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri

Özellik	Standart	Limit	Sonuç
Penetrasyon (0.1mm)	ASTM D5	100-150	146,8
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	39-47	45,45
Düktilite (cm)	ASTM D113	min. 100	124
Parlama noktası (°C)	ASTM D92	min. 230	234
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM D70	1,0-1,1	1,032
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-	0,714

Katkı malzemesi olarak, Dupont firması tarafından üretilen ve bir polimer çeşidi olan reaktif terpolimer (Elvaloy 4170) kullanılmıştır. Katkı malzemesinin genel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Elvaloy 4170’in özellikleri

Özellik	Standart	Sonuç
Moleküler yapısı	-	Doğrusal
Özgül ağırlık	ASTM D 792	0,94
Fiziksel hali	-	Toz tanecikli
Erime noktası (°C)	ASTM D 3418	72
Hacim özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	TS 1087	0,557
Akış katsayısı (g/10min)	ASTM D 1238	8

HMA tasarımı için kullanılan agrega Karayolları 8. Bölge Müdürlüğünden temin edilmiştir. Kırmataş kalker agregasının gradasyonu Tablo 3’de, fiziksel özellikleri ise Tablo 4’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Agrega gradasyonu

Açıklık (mm)	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
Geçen (%)	100	94	84	58	35	22	16	12	8	5

**Tablo 4.** Agreganın fiziksel özellikleri

Özellik	Standart	Limit	Sonuç
Kaba agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127	-	2,711
Kaba agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )		-	2,648
Kaba agrega su emme yüzdesi		maks.2	0,88
İnce agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM C128	-	2,750
İnce agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )		-	2,664
İnce agrega su emme yüzdesi		maks.2	1,17
Filler zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM D 854	-	2,751
Aşınma kaybı, Los Angeles (%)	ASTM C131	maks.30	28
Donma kaybı (%)	ASTM C88	maks.10	4,5
Yassı ve uzun daneler (%)	ASTM D4791	maks.10	4

## 2.2. Metot

### 2.2.1. Modifiye Asfaltların Hazırlanması

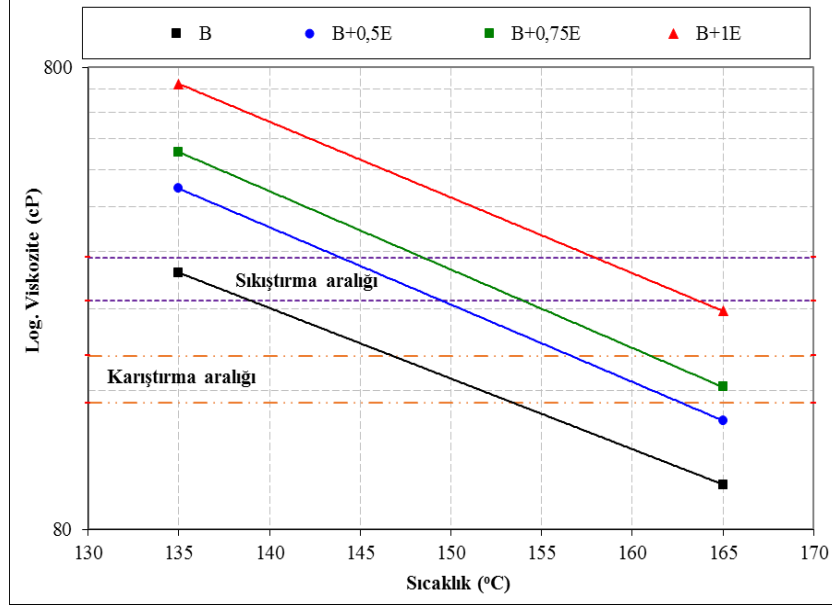
Çalışmada, ilk olarak saf B 100/150 asfaltı 150°C’de ısıtılmıştır. Daha sonra, ağırlıkça %0,5; %0,75 ve %1,0 oranlarında RET katkısı asfalta eklenerek modifiye asfaltlar hazırlanmıştır. Homojen bir asfalt- RET karışımı hazırlayabilmek amacıyla, RET katkılı asfalt bağlayıcılara katalizör olarak ağırlıkça %0,25 oranında süper fosforik asit eklenerek 500 devir/dakika hızında toplam 2 saat boyunca 185 °C sıcaklıkta karıştırma işlemi yapılmıştır.

RET katkı oranının belirlenmesinde daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınarak %1,25 oranında da numune hazırlanmış ancak bu orandaki karışımda jelleşme ve topaklaşma meydana gelmesi sebebiyle bu oran ve üzeri için karışım yapılmamıştır. Çünkü jel oluşumunun sıcak karışımın performansı üzerinde olumsuz bir etki oluşturabileceği belirtilmiştir [20].

Çalışmada hazırlanan saf ve RET katkılı asfalt bağlayıcılar sırasıyla B, B+0,5E; B+0,75E ve B+1E olarak kodlanmıştır.

Saf ve RET katkılı asfaltların fiziksel özellikleri penetrasyon (ASTM D5), yumuşama noktası (ASTM D36) ve düktilite (ASTM D113) deneyleri ile belirlenerek elde edilen sonuçlar Tablo 5’de verilmiştir. Bağlayıcıların

ayrıca yüksek sıcaklıklardaki akıcılık özellikleri dönel viskozimetre (ASTM D 4402) deneyi ile belirlenmiştir. Dönel viskozimetre deney sonucunda elde edilen viskozite-sıcaklık grafiği (Şekil 1) kullanılarak, saf ve RET katkıli asfalt bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklık aralıkları ve ortalama karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar yine Tablo 5’de verilmiştir.



Şekil 1. Bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafiği

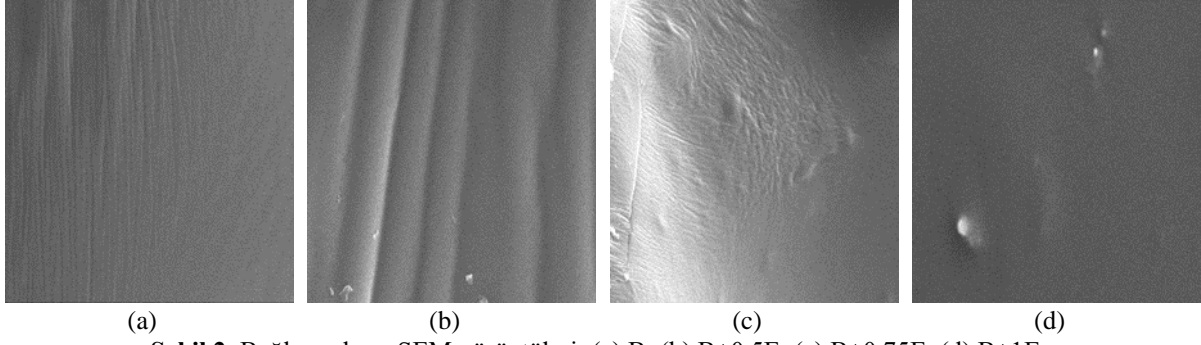
Tablo 5. Asfalt bağlayıcıların geleneksel test sonuçları

Özellik	Bağlayıcı türü			
	B	B +0,5E	B +0,75E	B +1E
Penetrasyon (0.1mm)	146,8	111,1	106,2	100,8
Yumuşama noktası (°C)	45,45	49,80	52,70	55,95
Düktilite (cm)	124	96	82	72
Karıştırma aralığı (°C)	149-155	153-158	158-163	167-172
Sıkıştırma aralığı (°C)	136-143	141-148	146-153	151-158
Karıştırma sıcaklığı (°C)	152	155,5	160,5	169,5
Sıkıştırma sıcaklığı (°C)	139,5	144,5	149,5	154,5

Tablo 5 incelendiğinde, RET katkı oranının artışı ile bağlayıcıların penetrasyon ve düktilite değerlerinde düzenli bir azalma, ancak yumuşama noktası değerlerinde düzenli bir artış görülmüştür. Bu durumda, RET katkısıyla bağlayıcıların sertleşmeye eğiliminin arttığını ve sıcaklık hassasiyetinin azaldığını söylemek mümkündür.

Bağlayıcıların viskozite değerleri incelendiğinde ise (Şekil 1), katkı oranının artışıyla viskozite değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu viskozite değerleri kullanılarak tespit edilen plentteki karıştırma ve yoldaki sıkıştırma sıcaklıkları da RET katkı oranının artışı ile beraber artış göstermiştir. Tüm bu sonuçlar, RET katkısıyla asfalt bağlayıcıların kıvamının sertleştiğini ve dolayısıyla bu bağlayıcıların plentte karıştırma ve yoldaki serme esnasında daha fazla enerji harcanabileceğini göstermektedir. Ancak RET’in asfalt ve dolayısıyla sıcak karışımın performansı üzerinde oluşturabileceği pozitif etki kaplamanın bakım ve onarım maliyetlerini düşüreceğinden fazla enerji sarfiyatı göz ardı edilebilecektir.

Çalışmada saf ve RET katkıli modifiye asfaltların mikromorfolojik yapısında meydana gelen değişimler taramalı elektron mikroskopu (SEM) kimyasal analizi ile belirlenmiştir. Asfalt bağlayıcıların SEM görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Bağlayıcıların SEM görüntüleri; (a) B; (b) B+0,5E; (c) B+0,75E; (d) B+1E

Şekil 2'de saf asfaltın SEM görüntüsü incelendiğinde, asfaltın homojen tek fazlı bir yapıda olduğu görülmektedir. RET katkı oranı arttıkça modifiye asfaltlarda RET-asfalt etkileşimi göz önüne alındığında, her üç oranda da homojen yapının korunduğu görülmektedir. RET'in kimyasal olarak asfaltla reaksiyona girdiği bilinmektedir. Bu sebeple, elde edilen asfalt-RET karışımının homojen ve tek fazlı bir yapıda olduğu ifade edilebilir. Sonuç olarak, modifiye asfaltların SEM görüntülerinde yüzey morfolojisi açısından yapıdaki homojenlik açıkça görülmüştür.

### 2.2.2. Modifiye Karışımların Hazırlanması

RET katkısının HMA'ların su hasarına olan etkisini belirlemek amacıyla saf ve modifiye asfaltlar kullanılarak Marshall tasarım yöntemi ile ASTM D 1559 standardına göre karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bunun için öncelikle, agrega ve saf asfalt kullanılarak saf (katkısız) sıcak karışımlar için optimum asfalt içeriği belirlenmiştir. Bu içerik baz alınarak saf ve modifiye asfaltlar ile sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Her bir karışım numunesi için 1200 gr agrega alınmış ve asfaltlar kendi karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında işlenerek numuneler elde edilmiştir. Numuneler 457 mm yükseklikten serbest düşürülen sıkıştırma tokmağı ile her bir yüzeyine 75, toplamda 150 vuruş yapılarak hazırlanmıştır.

Çalışmada, saf ve RET katkılı karışım numuneleri yine sırasıyla B, B+0,5E; B+0,75E ve B+1E olarak kodlanmıştır.

## 3. Deneysel Yöntem

### 3.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

HMA'ların plastik akmaya karşı gösterdiği direnç ASTM D1559'a göre Marshall stabilite ve akma deneyi ile tespit edilmektedir. Deneyde, hazırlanmış olan karışım numunelerinin ağırlıkları ve yükseklikleri alınarak  $60 \pm 1$  °C sıcaklığa sahip su banyosunda ortalama 35 dakika bekletildikten sonra çıkarılarak Marshall stabilite cihazına (Şekil 3a) yerleştirilir. Daha sonra numuneler  $50 \pm 2$  mm/dakika yükleme hızına maruz bırakılarak kırıldıkları andaki stabilite ve akma değerleri tespit edilir. Stabilite değeri, kaplamaların deformasyonlara karşı koyabildiği en yüksek yük değerini ifade ederken; akma değeri ise bu yük değerine ulaşıldığında oluşan deformasyonu ifade etmektedir. Deneyde, standart kabul edilen 63,5 mm'den farklı yüksekliklere sahip olan numuneler için denklem (1) bağıntısı kullanılarak, numunelerin düzeltilmiş stabilite değerleri hesaplanır. Denklem 1'de yer alan c; düzeltme katsayısını, h ise numune yüksekliğini ifade etmektedir [3,5].

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258xh)} \quad (1)$$

Marshall stabilite ve akma deneyi sonucunda, stabilite ve akma değerleri kullanılarak sıcak karışımların sertliklerinin ve deformasyonlara karşı dirençlerinin bir ölçüsü olarak kabul gören Marshall oranı (MQ) değerleri de hesaplanarak karışımlar değerlendirilebilmektedir. MQ değeri, karışım stabilitesinin akma değerine bölünmesiyle belirlenmektedir. Bu değer yüksek olması kaplamasının deformasyonlara karşı dirençli olduğunu ifade etmektedir [5].

### 3.2. Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS)

Kaplamaların sudan kaynaklı nem hasarlarına karşı dayanımları RMS deneyi ile belirlenebilmektedir. Bu amaçla numuneler  $60 \pm 1$  °C sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletilerek Marshall stabilite cihazı ile yüklemeye maruz bırakılmaktadır. Elde edilen stabilite değeri numunenin normal stabilite değerine bölünmesiyle RMS değeri elde edilmektedir. Deney sonucunda, yüksek RMS değerine sahip olan sıcak karışım numunelerinin su veya nem hasarlarına karşı daha yüksek dirence sahip olduğu değerlendirilmektedir [5].

### 3.3. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi (ITS)

ITS deneyi, ısı ve yüklere maruz kalan sıcak karışım yol kaplamalarının bünyesinde meydana gelen çekme gerilmelerini karakterize etmektedir. Deney, AASHTO T245 standardına göre Marshall stabilite test cihazı kullanılarak yapılmaktadır. ITS deneyinde, silindirik numuneler dakikada 50mm'lik yüklenme hızında çap düzlemi doğrultusunda düşey olarak yüklemeye maruz bırakılarak kırılması sağlanır. Deney sonucunda, sıcak karışım kaplamalarda meydana gelen bu kırılmalar ile kaplamanın yapısı arasında bir ilişki kurulabilmektedir. Ayrıca, kaplamanın sahip olduğu kohezyon kuvveti ve orta sıcaklıklardaki kalıcı deformasyon direncinin başlıca parametreleri olan sertlik ve durabilitesi de değerlendirilebilmektedir. Karışım numunelerinin ITS değeri denklem (2) yardımı ile hesaplanabilmektedir [3,5].

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi t x d} \quad (2)$$

Denklem 2'de,  $P_{max}$ ; numuneye uygulanmış maksimum yükü,  $t$ ; numune kalınlığını,  $d$  ise numune çapını ifade etmektedir. Karışım numunelerinin ITS değerleri, sıcak karışımın kohezyon yeteneğine bağlı olarak değişmekte ve bu da büyük oranda asfaltın özelliklerinden kaynaklanmaktadır [5,26].

### 3.4. Su Hasarı Direnci Deneyi

Su hassasiyeti, HMA kaplamaların su ile temas etmesinden sonra bünyesinde oluşan nem sebebiyle oluşabilecek hasara karşı göstermiş olduğu direnci ifade edilmektedir. Kaplamadaki su veya nemin varlığı, asfalt ile agrega arasındaki bağı zayıflatır ve kaplamada bozulmalara sebep olur. HMA kaplamalarda suya karşı hassasiyet AASHTO T283 standardı ile belirlenmektedir. Standarda göre sıcak karışım numuneleri "koşullandırılmamış" ve "koşullandırılmış" olmak üzere iki gruba ayrılarak değerlendirilir. Koşullandırılmamış numuneler 2 saat boyunca 25°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Koşullandırılmış numuneler ise numunelerin hava boşlukları %60-80 su ile dolacak şekilde vakum işlemine (Şekil 3b) maruz bırakılır. Bunun ardından numuneler streç film ile sarılarak 16 saat boyunca -18°C sıcaklıktaki dondurucuda bekletilir ve süre bitiminde bu numuneler 24 saat boyunca 60°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Süre bitiminde banyodan alınan numuneler 2 saat boyunca 25°C sıcaklıktaki banyosunda bekletilir. Bu işlemlerden sonra koşullandırılmamış ( $ITS_{kuru}$ ) ve koşullandırılmış ( $ITS_{yaş}$ ) numuneler Marshall cihazı kullanılarak dolaylı çekme direnci (ITS) testine (Şekil 3c) tabi tutulur. Deney sonucunda karışım numunelerinin dolaylı çekme direnci oranı (ITSR) değerleri denklem (3) yardımı ile hesaplanır. HMA numunelerinin sudan kaynaklı bozulmalara karşı dirençleri bakımından ITSR değerlerinin %80'den daha fazla olması istenmektedir [5,10].

$$ITSR = (ITS_{yaş}/ITS_{kuru}) \times 100 \quad (3)$$

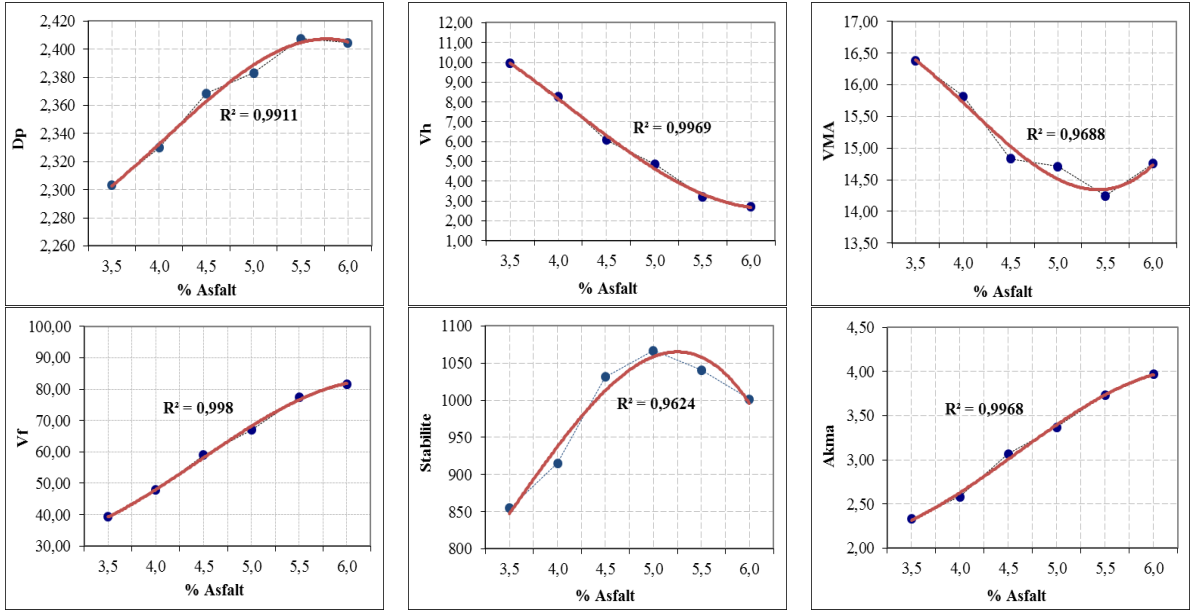


Şekil 3. Marshall stabilite deney cihazı (a), Numunelere vakum uygulanması (b), ITS deney cihazı (c)

## 4. Bulgular

### 4.1. Marshall Stabilite Deney Sonuçları

Karışım tasarımı için, B 100/150 saf asfalt ve 1200 gr agrega kullanılarak sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu amaçla, agrega miktarı sabit tutularak agreganın ağırlıkça %3,5 - %4 - %4,5 - %5 - %5,5 ve %6 oranlarında asfalt eklenerek her bir yüzde için üç karışım numunesi hazırlanmıştır. Her bir numunenin ağırlığı ve yüksekliği tespit edildikten sonra hacim özgül ağırlıkları (Dp), boşluk oranları (Vh), agregalar arası boşluk oranları (VMA) ve asfalt dolu boşluk oranları (Vf) gibi hacimsel özellikleri belirlenmiştir. Ardından tüm numunelerin Marshall stabilite ve akma değerleri tespit edilmiştir. Saf asfalt bağlayıcı ile hazırlanan karışım numunelerinin tespit edilmiş olan hacimsel ve mekanik özelliklerinin asfaltla değişim grafikleri Şekil 4’de verilmiştir.



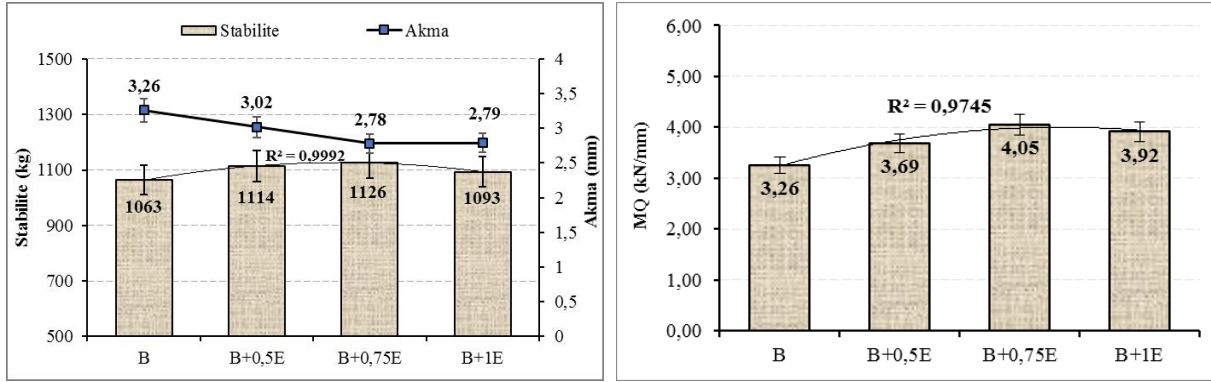
Şekil 4. Optimum asfalt içeriğinin belirlenmesinde kullanılan grafikler

Şekil 4’deki grafiklerden, Dp’nin maksimum (%5,5) ve stabilitenin maksimum (%5,0), Vh’in %4 (%5,2) ve Vf’nin %70 (%5,1) olduğu asfalt yüzdelere aritmetik ortalaması alınarak optimum asfalt içeriği %5,2 olarak belirlenmiştir. Bu oranda üç adet kontrol numunesi hazırlanarak elde edilen sonuçların uygunluğu Karayolları Teknik Şartnamesi (KTS) değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar ve şartname limitleri Tablo 6’da verilmiştir. Kontrol numune sonuçlarının KTS asfalt betonu aşınma tabakası için verilmiş olan sınır değerleri sağladığı görülmüştür. Çalışmada, tespit edilen optimum asfalt oranı %5,2 esas alınarak saf ve RET katkıli modifiye asfaltlarla sıcak karışım numuneleri hazırlanmış ve elde edilen değerler aynı tabloda gösterilmiştir. RET katkıli modifiye karışım numunelerinin saf karışım numuneleri ile kıyas yapılabilmesi amacıyla bu oran sabit tutulmuştur.

Tablo 6. Kontrol ve karışım numunelerine ait sonuçlar

Karışım türü	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
B (%5,2)	2,386	4,48	14,77	69,65	1063	3,26
B+0,5E	2,372	4,28	14,57	71,21	1114	3,02
B+0,75E	2,369	4,17	14,45	72,08	1126	2,78
B+1E	2,364	4,02	14,32	72,74	1093	2,79
KTS	-	3-5	14-16	65-75	>900	2-4

Hazırlanmış olan saf (B) ve RET modifiyeli sıcak karışım numunelerinden elde edilen Marshall stabilite ve akma değerleri Şekil 5’de, tüm karışım numunelerinin sertlik ve deformasyonlara karşı dirençlerinin tespiti için hesaplanan MQ değerleri de yine Şekil 5’de verilmiştir.



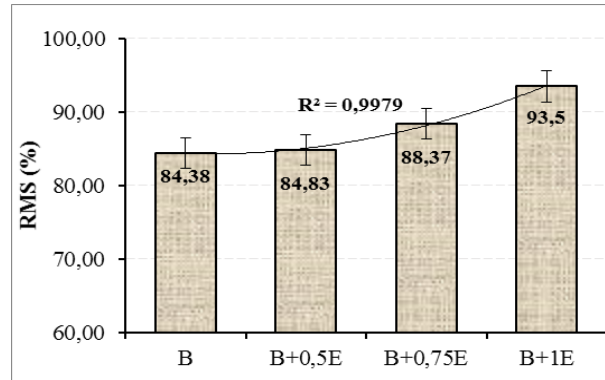
Şekil 5. Karışım numunelerinin Marshall stabilite-akma ve MQ değerleri

Şekil 5 dikkate alındığında, RET katkısıyla karışımların stabilite değerlerinde saf numuneye kıyasla değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler sırasıyla %4,8; %5,9 ve %2,8 artış şeklindedir. RET katkısıyla karışımların stabilite değerlerindeki bu artış, RET katkılı kaplamaların kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığını göstermektedir. Elde edilen sonuç değerlendirildiğinde, en yüksek stabilite değerine B+0,75E katkılı karışımda ulaşılmıştır, bu durumda kalıcı deformasyonlara karşı direnci en yüksek karışım numunesinin B+0,75E katkılı karışım olduğunu ifade etmek mümkündür. RET modifiyeli karışımların akma değerlerinde, saf (B) karışıma kıyasla değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler sırasıyla %7,4; %14,7 ve %14,4 azalma şeklindedir. Sıcak karışımların akma değeri, yol kaplamasının trafik yükleri altında plastik veya esnek davranışını simüle etmektedir. RET katkısıyla akma değerlerinin azalması, HMA kaplamanın kırılma esnasında daha plastik davranış sergileyeceğini göstermektedir.

Saf ve modifiye karışımların MQ değerleri incelendiğinde ise (Şekil 5), RET katkı oranı artışı ile değişiklik göstermiştir. Meydana gelen bu değişimler saf karışıma kıyasla %13,2; %24,2 ve %20,2 artış şeklindedir. Bu sonuçlara göre, en yüksek artışın B+0,75E karışım numunelerinde görüldüğü ve bu sebeple kayma gerilmelerine karşı en dirençli karışımların B+0,75E karışımlar olduğu ifade edilebilir.

#### 4.2. RMS Deney Sonuçları

RET'in HMA kaplamaların suya karşı hassasiyeti üzerindeki etkilerini belirlemek için saf ve RET modifiyeli karışım numunelerinin RMS değerleri tespit edilerek Şekil 6'da verilmiştir.



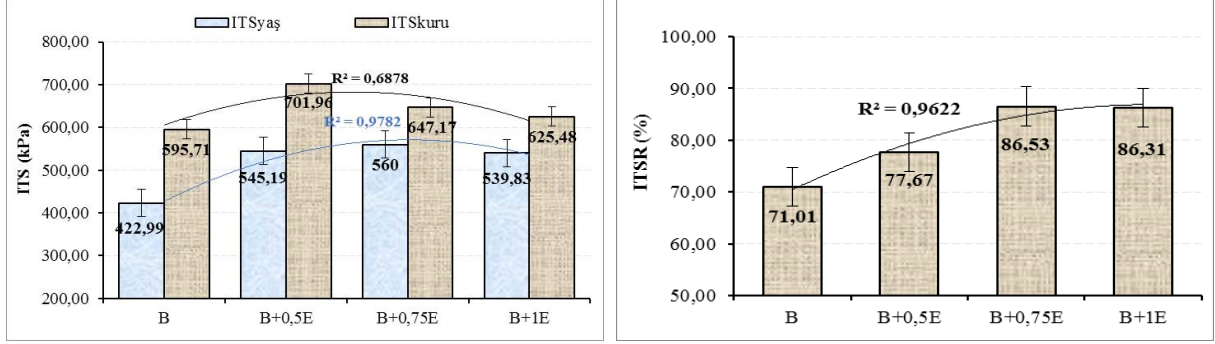
Şekil 6. Karışım numunelerinin RMS değerleri

Şekil 6 incelendiğinde, RET artışı ile modifiye karışımların saf karışıma kıyasla RMS değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler sırasıyla %0,5; %4,7 ve %10,8 artış şeklindedir. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek RMS değerinin B+1E karışımlarda elde edildiği ve dolayısıyla en yüksek nem hasarı direncinin B+1E karışımlarda olduğu söylenebilir. RET ilavesiyle RMS değerlerinin artış göstermesi, RET'in agrega ile asfalt arasındaki bağlanma yeteneği üzerinde iyileştirici etkiye sahip olduğunu ve bu nedenle de kaplamanın sudan kaynaklı bozulmalara karşı direnci üzerinde artışa sebep olduğu ifade edilebilir.



### 4.3. ITS ve Su Hasarı Direnci Deneysel Sonuçları

RET'in HMA'nın sudan kaynaklı bozulmalara karşı dirençlerini belirlemek için, ayrıca koşullandırılmış ve koşullandırılmamış saf ve RET modifiyeli karışım numunelerine ITS deneyi uygulanmıştır. Belirlenen ITS ve ITSR değerleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Karışım numunelerinin ITS ve ITSR değerleri

Şekil 7 incelendiğinde, RET katkı oranının artışıyla koşullandırılmış (ITS<sub>yaş</sub>) karışım numunelerinin saf karışıma kıyasla dolaylı çekme mukavemeti değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler sırasıyla %28,9; %32,4 ve %27,6 artış şeklindedir. Koşullandırılmamış (ITS<sub>kuru</sub>) karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemet değerlerinde meydana gelen değişimler ise sırasıyla %17,8; %8,6 ve %5,0 artış şeklindedir. RET katkı oranının artışıyla karışım numunelerinin ITS<sub>yaş</sub> ve ITS<sub>kuru</sub> değerlerinin artış göstermesi, trafik yüklerine maruz kalan HMA kaplamaların yük altında oluşan çekme gerilmelerine karşı direncinin arttığını göstermektedir.

Yine Şekil 7'de, karışım numunelerinin ITSR oranları incelendiğinde, RET katkı oranının artışıyla ITSR değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler saf karışıma kıyasla sırasıyla %9,4; %21,9 ve %21,5 artış şeklindedir. Bu sonuçlara göre, en yüksek ITSR değeri B+0,75E karışımlarda görülmüştür. RET modifiyeli karışımların, ITSR değerlerinin özellikle %0,75 oranından sonra %80'in üzerinde olması, bu oranın kritik olduğunu ve bu orandan sonraki karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin yüksek olduğunu göstermektedir.

RMS ve ITSR sonuçları birlikte ele alındığında, RET katkısının yol kaplamalarının suya karşı hassasiyeti üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğu, %0,75 - %1 RET katkı oranının kaplamaların adezyon ve kohezyon yeteneğini arttırmada etkili olduğu görülmüştür.

### 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, RET'in sıcak karışım asfalt kaplamaların suya karşı hassasiyeti üzerindeki etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Saf ve RET modifiyeli bağlayıcıların fiziksel test sonuçları değerlendirildiğinde, RET katkısıyla bağlayıcıların sertliğinin arttığı ve dolayısıyla daha yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde kullanılabileceği görülmüştür.
2. Bağlayıcıların mikromorfolojik analiz sonuçlarına göre, asfalt ile RET arasında iyi bir etkileşim olduğu ve bu etkileşim sebebiyle karışımın homojen tek fazlı bir yapı gibi davrandığı tespit edilmiştir.
3. Marshall stabilite deney sonuçlarına göre, RET katkısı ile karışımların stabilitesinin %5,9 kadar arttığı ve en yüksek stabilite değerinin B+0,75E katkılı karışımlardan elde edildiği görülmüştür.
4. MQ sonuçlarına göre, RET katkısı ile MQ değerinin %24,2 artış ile B+0,75E karışımlardan elde edildiği görülmüştür. Bu durumda, RET katkısının HMA kaplamanın kayma gerilmelerine karşı direncinde iyileşme sağladığı söylenebilir.
5. RMS sonuçlarına göre, RET ilavesiyle RMS değerinin %10,8 artış ile B+1E karışımlardan elde edildiği ve bu oranda sıcak karışımların su etkilerine karşı daha dirençli olduğu görülmüştür.
6. ITSR sonuçlarına göre, RET ilavesiyle karışımların ITSR değerlerinin %21,9 artış ile B+0,75E karışımlardan elde edildiği ve RET'in sıcak karışımların adezyon ve kohezyon yeteneğini arttırarak yol kaplamalarının nem direncini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür.

Sonuç olarak, bir polimer çeşidi olan RET katkısının asfalt ve dolayısıyla karışım modifikasyonunda kullanılmasıyla yol kaplamalarının nem direncini arttırmada iyileştirici bir etkiye sahip olduğunu ifade etmek mümkündür.

### Kaynaklar

- [1] Hamedi GH, Nejad FM, Oveisi K. Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA. *Road Materials and Pavement Design* 2015;16(3): 536-552.
- [2] Grenfell J, Ahmad N, Liu Y, Apeagyei A, Large D, & Airey G. Assessing asphalt mixture moisture susceptibility through intrinsic adhesion, bitumen stripping and mechanical damage. *Road Materials and Pavement Design* 2014; 15(1): 131-152.
- [3] Geçkil T. Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2008.
- [4] Ahmad J, Yusoff NIM, Hainin MR, Rahman MYA, & Hossain M. Investigation into hot-mix asphalt moisture-induced damage under tropical climatic conditions. *Construction and Building Materials* 2014; 50: 567–576.
- [5] Geçkil T, Önal Y, İnce CB. Atık PET ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Sıcak Karışımların Nem Direnci. *Politeknik Dergisi* 2021; 24(2): 461-471.
- [6] Aksoy A, İskender E, Oruç Ş, Özen H. SBS Polimeri ve Su Hasarı Önleyici Katkıların Asfalt Kaplamalarda Performans Karşılaştırması. *İMO Teknik Dergi* 2012; 380: 5967-5986.
- [7] Kandhal PS. Field and laboratory investigation of stripping in asphalt pavements: State of the art report. *Transportation Research Record No. 1454, Asphalt Concrete Mixture Design and Performance* 1994; 36-47.
- [8] Kumar P, Anand P. Laboratory study on moisture susceptibility of dense graded mixes. *Journal of Transportation Engineering* 2012; 138(1): 105–113.
- [9] Kok BV, Yılmaz M. The effects of using lime and styrene–butadiene–styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials* 2009; 23: 1999–2006.
- [10] Gorkem Ç, Şengöz B. Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. *Construction and Building Materials* 2009; 23(6): 2227–2236.
- [11] Petersen JC, Plancher HP, Harnsbergen M. Lime treatment of asphalt to reduce age hardening and improve flow properties. In: *Proceedings, AAPT 1987*, 56: 632-653.
- [12] Kennedy TW. Anagnos NJ. Lime treatment of asphalt mixtures, FHWA/TX-83/22+253-4. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin 1983, p. 20–8
- [13] National Lime Association. Lime the versatile chemical hydrated lime: a solution for high performance hot mix asphalt, fact sheet, 2003.
- [14] Kennedy TW, Turnham N, Epps JA, Smoot CW, Young FM, Button JW. Evaluation of methods for field application of lime to asphalt concrete mixtures. In: *Proceeding, Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 52, 1983. p. 508-34.
- [15] Martin AE, Rand D, Weitzel D, Tedford D, Sebaaly P, Lane L. Moisture sensitivity of asphalt pavements: a national seminar, San Diego, California, 2003 on February 4-6.
- [16] Epps J, Berger E, Anagnos JN. Moisture sensitivity of asphalt pavements: a national seminar, California, 2003.
- [17] Kim YR, Lee HJ, Little DN, Fatigue characterization of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory. *J AAPT* 1997; 66: 520–49.
- [18] Kumar P, Chandra S, Bose S, Strength characteristics of polymer modified mixes. *Int J Pav Eng.*, 2006 ;7(1): 63–71.
- [19] Stuart KD, Youtcheff JS, Mogawer WS. Understanding the performance of modified asphalt binders in mixtures: evaluation of moisture sensitivity. FHWA-RD02-029, Turner-Fairbank Highway Research Center, 2001.
- [20] Jasso M, Hampl R, Vacin O, Bakos D, Stastna J, Zanzotto L. Rheology of conventional asphalt modified with SBS, Elvaloy and polyphosphoric acid. *Fuel Processing Technology* 2015; 140: 172-179.
- [21] Ge D, Yan K, You L, Wang Z. Modification mechanism of asphalt modified with Sasobit and Polyphosphoric acid (PPA). *Construction and Building Materials* 2017; 143: 419–428.
- [22] Singh D, Habal A, Ashish PK, Kataware A. Evaluating suitability of energy efficient and anti-stripping additives for polymer and Polyphosphoric acid modified asphalt binder using surface free energy approach. *Construction and Building Materials* 2018; 158: 949–960.
- [23] Geçkil T, Seloğlu M. Performance properties of asphalt modified with reactive terpolymer. *Construction and Building Materials* 2018; 173: 262–271.
- [24] Keyf S. Investigation of penetration and penetration index in bitumen modified with SBS and reactive terpolymer. *Sigma* 2010; 28: 26–34.
- [25] Irfan M, Saeed M, Ahmed S, Ali Y. Performance evaluation of Elvaloy as a fuel-resistant polymer in asphaltic concrete airfield pavements. *Journal of Materials Civil Engineering* 2017; 29(10): ASCE, ISSN 0899-1561.
- [26] Ahmedzade P, Şengöz B. Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 165(1-3): 300-305.