



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Atık PET ile modifiye edilmiş bitümlü sıcak karışımların nem direnci

## *Moisture resistance of bituminous hot mixtures modified with waste PET*

Yazar(lar) (Author(s)): Tacettin GEÇKİL<sup>1</sup>, Yunus ÖNAL<sup>2</sup>, Ceren Beyza İNCE<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-8070-6836

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-6342-6816

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-6385-0964

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Geçkil T., Önal Y. ve İnce C.B., “Atık PET ile modifiye edilmiş bitümlü sıcak karışımların nem direnci”, *Politeknik Dergisi*, 24(2): 461-471, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.699662

# Atık PET ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Sıcak Karışımların Nem Direnci

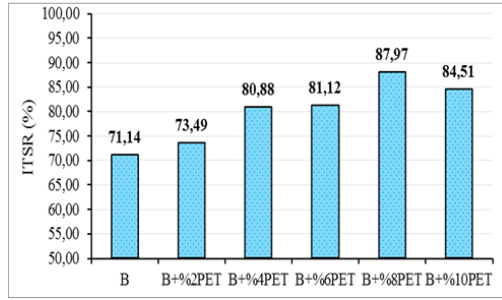
## Moisture Resistance of Bituminous Hot Mixtures Modified with Waste PET

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bitüm, PET ve TEO arasında iyi bir kimyasal etkileşim sağlanarak karışımlar hazırlandı. / Mixtures were prepared by providing a good chemical interaction between bitumen, PET and TEO.
- ❖ PET ve TEO katkıları ile karışımların kalıcı deformasyon ve nem direnci artış gösterdi. / The permanent deformation and moisture resistance of the mixtures increased with PET and TEO additives.
- ❖ Karışımların nem direnci üzerinde en etkili PET oranı % 8 olarak belirlendi. / The most effective PET ratio on the moisture resistance of the mixtures was determined as 8%.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çalışmada, atık PET katkısının bitümlü karışımların nem direnci üzerindeki etkisi RMS ve ITS deneyleri ile belirlenmiştir. / In the study, the effect of waste PET additive on moisture resistance of bituminous mixtures was determined by RMS and ITS tests.



Şekil 1. Karışımların ITSr değerleri / Figure 1. ITSr values of mixtures

### Amaç (Aim)

Çalışmada, atık PET katkısının bitümlü sıcak karışımların nem direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. / In the study, the effect of waste PET additive on the moisture resistance of bituminous hot mixtures was investigated.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Bitümlü karışımların mekanik özellikleri Marshall stabilite, RMS ve ITS testleri ile belirlenmiştir. / The mechanical properties of bituminous mixtures were determined by Marshall stability, RMS and ITS tests.

### Özgünlük (Originality)

Atık PET ve TEO katkılarının bitümlü karışımların nem direncini arttırdığı ilk kez bu çalışmada ortaya konmuştur. / It was first demonstrated in this study that waste PET and TEO additives increase the moisture resistance of bituminous mixtures.

### Bulgular (Findings)

Atık PET'in, karışımların kalıcı deformasyon direncini ve kohezyon yeteneğini iyileştirdiği görülmüştür. / Waste PET has been found to improve the permanent deformation resistance and cohesion ability of the mixtures.

### Sonuç (Conclusion)

Bitümlü karışımların nem direnci atık PET ilavesiyle önemli ölçüde artmıştır. / The moisture resistance of bituminous mixtures increased significantly with the addition of waste PET.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Atık PET ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Sıcak Karışımların Nem Direnci

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Tacettin GEÇKİL<sup>1</sup>, Yunus ÖNAL<sup>2</sup>, Ceren Beyza İNCE<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Malatya İnönü Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Kimya Müh. Bölümü, Malatya İnönü Üniversitesi, Türkiye

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

(Geliş/Received : 06.03.2020 ; Kabul/Accepted : 11.04.2020)

## ÖZ

Bu çalışmada, atık PET katkısının bitümlü sıcak karışımların (BSK) nem hasarı direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk olarak bitüm ile PET arasında kimyasal bir bağ oluşturmak üzere saf B 70/100 bitümüne ağırlıkça % 2.5 Trietanolamin (TEO/TEOA) kimyasal ilave edildi. Daha sonra, bu bitüm-TEO karışımına bitümün ağırlıkça % 2, % 4, % 6, % 8 ve % 10 oranlarında atık PET ilave edilerek modifiye bitümler elde edildi. Modifiye bitüm numuneleri, bitüm ile PET arasındaki etkileşimi belirlemek için X-Işını Kırınımı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) testlerine tabi tutuldu. Çalışmanın ikinci aşamasında, saf bitüm ve agrega kullanılarak Marshall karışım tasarımı yöntemine göre karışımın optimum bitüm içeriği (obi) belirlendi. Saf (kontrol) karışım sonuçlarıyla karşılaştırmak amacıyla, bu bitüm oranı sabit tutularak modifiye karışım numuneleri hazırlandı. Hazırlanan karışım numuneleri Marshall stabilitesi ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) ve dolaylı çekme mukavemeti (ITS) testlerine tabi tutuldu. Test sonuçlarına göre, atık PET ilavesi ile bitümün sertleşme eğilimi gösterdiği ve bitüm ile PET arasında iyi bir kimyasal etkileşim olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, atık PET katkısının karışımların Marshall stabilitesi ve akma değeri üzerinde ciddi bir etkiye sahip olmadığı, ancak RMS ve dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) değerlerinde önemli artışlar meydana getirerek karışımların nem hasarı direncini arttırdığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Bitüm, polietilen tereftalat (PET), modifiye karışım, marshall stabilite, nem hassasiyeti.

## Moisture Resistance of Bituminous Hot Mixtures Modified with Waste PET

### ABSTRACT

In this study, effect of waste PET additive on moisture damage resistance of bituminous hot mixtures were investigated. For this purpose, firstly, 2.5% by weight Triethanolamine (TEO/TEOA) chemical was added to pure B 70/100 bitumen to create a chemical bond between bitumen and PET. Then, modified bitumens were obtained by adding waste PET in the ratios of 2%, 4%, 6%, 8% and 10% by weight of bitumen to this bitumen-TEO blend. Modified bitumen samples were subjected to X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) tests to determine the interaction between bitumen and PET. In the second stage of the study, the optimum bitumen content (obc) of the mixture was determined according to Marshall mixture design method using pure bitumen and aggregate. Modified mixture specimens were prepared by keeping this bitumen ratio constant in order to compare it with pure (control) mixture results. The mixture specimens prepared were subjected to Marshall stability and flow, retained Marshall stability (RMS) and indirect tensile strength (ITS) tests. According to the test results, it was observed that bitumen tends to harden with the addition of waste PET and a good chemical interaction occurs between bitumen and PET. In addition, it was observed that the waste PET additive did not have a serious effect on the Marshall stability and flow value of the mixtures, but increased the moisture damage resistance of the mixtures by generating significant increases in RMS and indirect tensile strength ratio (ITSR) values.

**Keywords:** Bitumen, polyethylene terephthalate (PET), modified mix, marshall stability, moisture sensitivity.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkemizde en çok tercih edilen üstyapı çeşidi esnek üst yapıdır. Esnek üstyapılar kaplama, temel ve alt temel olmak üzere üç tabakadan meydana gelmektedir. Kaplama tabakasında bitüm ve agreganın karışımıyla elde edilen bitümlü sıcak karışımlar (BSK) kullanılmaktadır. BSK kaplamalar, belirli bir gradasyona sahip agreganın, uygun orandaki bitüm ile belirli sıcaklıkta asfalt plentinde karıştırılmasıyla elde

edilmektedir. Sıcak karışımında büyük oranda bulunan agrega; karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlarken, bitüm ise agrega tanelerinin arasını doldurarak tanelerin birbirine bağlanmasını ve trafik yükleri altında kaplamanın dağılmasını önlemekte, ayrıca düzgün bir yüzey sağlayarak sürüş konforunu arttırmaktadır [1,2,3,4].

Bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalarda zaman içerisinde trafik ve çevre koşulları sebebiyle çeşitli bozulmalar meydana gelmektedir. Bu bozulmalardan tekerlek izi, düşük sıcaklık çatlağı, yorulma çatlağı ve sudan kaynaklı hasarlar en sık görülen bozulma

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : c.beyzaince@gmail.com

çeşitleridir [4,5]. Kaplamalarda meydana gelen bu bozulmaların başlıca sebepleri, yapım ve tasarım hataları, iklim ve çevresel faktörler ve trafik etkileri olarak sıralanabilir [6].

BSK kaplamalarda meydana gelen bozulmalar, asfalt kaplama yapımından bir süre sonra yol eksenini boyunca ya da yolun belirli kesimlerinde bölgesel şekilde görülen yapısal bozukluklardır [7]. Bu bozulmalardan tekerlek izi deformasyonu genellikle ağır trafik yükleri, yetersiz sıkışma, aşırı asfalt yüzdesi ve yüksek hava sıcaklıkları gibi nedenlerden meydana gelmektedir. Düşük sıcaklık çatlağının en temel sebebi asfaltın kıvamı ve sıcaklığa olan duyarlılığıdır. Ayrıca karışımda kullanılan asfaltın miktarı, asfaltın yaşlanması, hava sıcaklığı ve çok soğuk gün sayıları da bu çatlakların meydana gelmesinde dikkat edilmesi gereken diğer etkenlerdendir. Yorulma çatlakları; ağır dingil yükleri, fazla yük tekrarı, kaplama ve tabakalarının yetersiz kalınlığı ve yetersiz drenaj gibi sebeplerden meydana gelmektedir [4]. Sudan kaynaklı bozulmalar ise su etkisiyle asfalt-agrega arasındaki bağın zayıflaması, asfaltın sertliği, kohezyon kaybı ve asfalt bağlayıcının özelliklerinin değişmesi gibi nedenlerden meydana gelmektedir [8].

Kaplamalarda suyun veya nemin varlığı, asfalt-agrega arasındaki bağı zayıflatarak adezyonu, asfalt bağlayıcı yapısında değişiklikler yaparak da kohezyonu etkilemektedir. Asfalt-agrega arasındaki adezyonun kaybolması ve asfalt bağlayıcının özelliklerinin değişmesi BSK'da çok önemli mühendislik özelliklerinin değişmesine ve üst yapının bozulmasına neden olmaktadır [8]. Kaplamanın performansı, kohezyon ve adezyon ile doğrudan ilişkilidir. Adezyon kaybı, asfalt ve agregası arasındaki bağın suyla zayıflamasından ve asfalt filminin soyulmasından kaynaklanır. Kohezyon kaybı ise asfalt betonunun yumuşamasından meydana gelir. Adezyon ve kohezyon kaybıyla BSK kaplamalarda nem hasarı deformasyonları meydana gelmektedir [9].

Günümüzde asfalt kaplamalarda nem hasarı nedeniyle meydana gelen deformasyonları en aza indirmek amacıyla çeşitli soyulma önleyici katkıları, hidrate kireç, uçucu kül ve polimerler kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanı ise agregaya hidrate kireç ilave edilmesidir [8]. Yapılan çalışmalarda BSK'ya kireç ilavesinin agregası ve asfalt arasındaki sıkışma kuvvetini artırdığı, tekerlek izi oluşumunu azalttığı ve yorulma dayanımını artırdığı tespit edilmiştir [10-12]. Bununla birlikte çeşitli polimerlerin de BSK kaplamaların nem hasarı direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür [4,13,14].

Bu çalışmada, bir polimer çeşidi olan ve ciddi çevresel kirliliğe sebebiyet veren atık polietilen tereftalat (PET)'in sıcak karışımların nem hasarı direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Plastik türleri içerisinde en çok kullanılan türlerden biri olan PET, yarı kristal termoplastik bir polimer olup polyeşter malzeme olarak kabul edilmektedir [15]. Kimyasal maddelere karşı kararlılığı, hafifliği, renklendirilebilirliği, üstün termal özellikleri ve

ekonomik olmaları sebebiyle son 20 yılda önemli teknik plastik malzeme grupları içerisinde yer alan PET, mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan malzemelerden biri olmuştur [16,17]. Günümüzde şişe, fotoğraf filmi, iplik, lastik kablo, saklama kapları, emniyet kemeri gibi birçok alanda kullanılmaktadır [18].

Teknolojinin hızlı gelişimi, yapım kolaylığı ve uygun maliyet bakımından günlük yaşamımızda kullanımı hızlı bir şekilde artan PET sebebiyle, çevremizde büyük miktarda atık oluşmaktadır. PET'in geniş kullanımı sonucu meydana gelen bu atıklar, ciddi çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. PET esaslı katı atıklar dünyadaki katı atık miktarının ağırlıkça %8, hacimce %12'sini oluşturmaktadır. Ülkemizde yıllık üretilen 165 bin ton pet şişenin sadece 40 bin tonu geri dönüşüm ile değerlendirilmektedir. Her yıl doğaya karışan 125 bin ton pet şişenin ortalama maliyeti 70 milyar dolardır. Çevre kirliliğinin azalması ve maliyet açısından sağlayacağı faydalar göz önüne alındığında, geri dönüşüm konusuna yeterince önem verilmesi ülkemize pek çok konuda büyük oranda katkılar sağlayacaktır [18,19]. Bu sebeple, doğada biyolojik olarak parçalanamayan PET atıklarının değerlendirilmesi ve tekrar kullanılması konusunda ülkemizde ve dünyada çeşitli alternatif çözümler aranmaktadır. Atıkların değerlendirilmesi konusunda öncelikli yapılan çalışmalar genellikle geri dönüşüm üzerine olmuştur [18,20]. Atık PET, kimyasal ve fiziksel olmak üzere iki şekilde geri dönüştürülerek kullanılmaktadır. Kimyasal süreç, yüksek basınç ve sıcaklık altında, katalizörler aracılığıyla gerçekleştirilirken, fiziksel süreç ise mekanik araçlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir [18,21].

Atık PET'in karayolu mühendisliğinde alternatif bir katkı olarak kullanımının kaplama performansı, ekonomi ve çevre kirliliği bakımından faydalar sağlayacağı düşüncesiyle birçok çalışma yapılmıştır [22-25].

Önceki çalışmalarda atık PET katkısı, asfalt karışımlarda ıslak ve kuru proses olmak üzere iki farklı şekilde kullanılmıştır [26]. Islak yöntemde, agregası ile karıştırılmadan önce PET katkısının asfalt bağlayıcının içerisine direkt ilave edilerek kullanılması [27,28,29] veya PET'in çeşitli ısı veya sıvılaştırma işlemlerinden geçirilerek bitüm modifikasyonunda kullanılması [23,30,31]; kuru yöntemde ise, PET katkısının doğrudan karışıma veya agregadan bir miktar eksiltilecek onun yerine ikame edilmesi (plastiphalt) şeklinde kullanılması olmuştur [22,26,32].

Genel olarak atık PET kullanılarak yapılan çalışmalar incelendiğinde, karışımların yorulma özelliklerinin iyileştiği [24,33], kıvamının sertleştiği [23,29,30] ve stabilite değerinin arttığı [25,34] görülmektedir.

Hoxha tarafından atık PET'in asfalt betonunda kullanılabilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada, PET katkılı karışımların sertliğinin arttığı ve bu sebeple sıcak iklimli bölgelerde tekerlek izi deformasyonuna karşı dirençli olduğu ve ayrıca karışımların nem hasarına karşı dirençli olduğu sonucuna varılmıştır [27].

Ahmadinia ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada atık PET'in taş mastik asfaltta kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, PET katkı oranının artışıyla karışımların esneklik modülünün arttığı ve en yüksek değer %6 PET katkılı karışımda meydana geldiği, ayrıca PET katkılı karışımların sürtünme direncinin orijinal karışıma oranla çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, PET katkılı karışımların nem hasarı direncinin olumlu yönde arttığı görülmüştür [35].

Hassani ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, atık PET'i agrega yerine ikame ederek (plastiphalt) asfalt karışımda kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, karışımdaki plastiphalt oranının artmasıyla, sıcak karışımın stabilitesinin ve MQ değerinin azaldığı, akma değerinin arttığı ve en iyi karışımın %20 plastiphalt içeren karışımlardan elde edildiği görülmüştür [22].

PET katkılı modifiye asfalt karışımların statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarının incelendiği bir çalışmada, PET katkı oranının artması ile karışımların Marshall oranı (MQ) ve ITS değerlerinin azaldığı, karışımların kalıcı deformasyon direncinde statik yükler altında azalma olurken dinamik yükler altında artış meydana geldiği görülmüştür [26].

Bu çalışmada, daha önceki çalışmalarda nem hasarı direnci bakımından çok fazla kullanılmayan atık PET'in sıcak karışımların nem direncine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla hazırlanan modifiye karışım numuneleri, Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) ve dolaylı çekme dayanımı (ITS) deneylerine tabi tutularak karışımların nem hasarı direnci belirlenmiştir.

## 2. MATERYAL (MATERIAL)

Çalışmada bitümlü bağlayıcı olarak, Elazığ Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü asfalt şantiyesinden temin edilen B 70/100 penetrasyon sınıfına sahip bitüm kullanılmıştır. Kullanılan bitümün fiziksel özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** B 70/100 saf bitümün fiziksel özellikleri (Physical properties of B 70/100 pure bitumen)

Deneyler	Deney Standardı	Şartname Limitleri	Sonuç
Penetrasyon (0.1mm)	TS EN 1426	70-100	88
Yumuşama Noktası (°C)	TS EN 1427	43-51	46,75
Düktilite (cm)	TS 119	Min. 100	>100
Parlama Noktası (°C)	EN 22719	Min. 230	238
Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	TS 1087	1,0-1,1	1,038
Kütle Kaybı	ASTM D2872	Maks. 0,8	0,23

Bitüm ile PET arasında kimyasal bir bağ oluşturmak amacıyla, İnönü Üniversitesi Kimya Mühendisliği laboratuvarından temin edilen Trietanolamin (TEO) kimyasalı kullanılmıştır. TEO (C<sub>6</sub>H<sub>15</sub>NO<sub>3</sub>)'nun kimyasal özellikleri Çizelge 2'de belirtilmiştir.

**Çizelge 2.** TEO'nun özellikleri (Features of TEO) [36]

Özellik	TEO
Kimyasal formül	C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>3</sub>
Molar kütle	149.19 gr/mol
Kaynama Noktası (°C)	335.4 (°C)
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1.12 gr/cm <sup>3</sup>
Yapı	Bazik

Modifikasyonda kullanmak üzere Adana Meltem Kimya LTD.ŞTİ.'den temin edilen granül haldeki atık PET kullanılmıştır. PET'in genel özellikleri Çizelge 3'de verilmiştir.

**Çizelge 3.** PET'in özellikleri (Features of PET) [34]

Özellik	PET
Özgül Ağırlık	1,33 – 1,38 gr/cm <sup>3</sup>
Fiziksel boyut	Granüler tanecikli
Renk	Açık renk
Erime Sıcaklığı	250 °C
Kullanılabilir sıcaklık	60 °C
Kullanılabilir maks. boyut	0,3 mm

Karışım tasarımında Elazığ Karayolları Bölge Müdürlüğünden temin edilen kırmataş kalker agregası kullanılmıştır. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri Çizelge 4'de, agrega gradasyonu ise Çizelge 5'de verilmiştir.

### 2.1. Modifiye Bitüm Numunelerinin Hazırlanması (Preparation of Modified Bitumen Samples)

Çalışmada, modifiye bitümler elde etmek amacıyla ilk olarak saf bitüm 160 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve ağırlıkça %2,5 TEO ilave edilerek aynı sıcaklıkta 500

devirde 10 dakika boyunca karıştırma işlemi yapılmıştır. Daha sonra, bitüm ağırlığının %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında PET ilave edilerek, karıştırma işlemi 1000 devirde 30 dakika boyunca aynı sıcaklıkta devam ettirilmiştir.

**Çizelge 4.** Agreganın fiziksel özellikleri (Physical properties of aggregate)

Deneyler	Deney Standardı	Şartname Limitleri	Sonuç
Kaba agregaya zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127	-	2,70
Kaba agregaya hacim özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127	-	2,67
Kaba agregaya su emme yüzdesi	ASTM C127	Maks.2	0,47
İnce agregaya zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM C128	-	2,75
İnce agregaya hacim özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM C128	-	2,63
İnce agregaya su emme yüzdesi	ASTM C128	Maks.2	1,66
Filler zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM D 854	-	2,85
Aşınma kaybı, Los Angeles (%)	ASTM C131	Maks.30	27
Donma kaybı (%)	ASTM C88	Maks.10	2
Yassı ve uzun daneler (%)	ASTM D4791	Maks.10	5

**Çizelge 5.** Agregaya gradasyonu (Aggregate gradation)

Elek Açıklığı (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

Modifiye bitümlerin hazırlanmasında her bir yüzde için aynı işlem sırası takip edilmiştir. Bitüme TEO eklenmesiyle, bitüm ve PET arasında kimyasal bir etkileşim kurulması ve modifiye karışımda homojen bir dağılım sergilenmesi amaçlanmıştır. En uygun TEO oranı kimya mühendisliği laboratuvarında %2,5 olarak tespit edilmiştir. Bu oran, literatürde benzer çalışmalar olmaması sebebiyle, laboratuvarında yapılan ön çalışmalar sonucunda, TEO'nun bitümün mikro-morfolojik yapısı üzerindeki etkisi incelenerek belirlenmiştir.

Çalışmada, saf ve modifiye bitümler sırasıyla B, B+%2PET, B+%4PET, B+%6PET, B+%8PET ve B+%10PET olarak kodlanmıştır.

Elde edilmiş olan saf ve modifiye bitümlerin fiziksel özellikleri, penetrasyon (TS EN 1426), yumuşama noktası (TS EN 1427) ve düktilite (TS 119) gibi geleneksel test yöntemleri ile belirlenerek Çizelge 6'da verilmiştir. Ayrıca saf ve modifiye bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık özelliklerini belirlemek amacıyla, ASTM D 4402 standardına göre Brookfield Dönel Viskozimetre (RV) deneyi uygulanmıştır. Bu deney ile bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları tespit edilerek, plentteki ortalama karıştırma ve yoldaki ortalama sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiş ve aynı çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 6 incelendiğinde, PET katkısıyla modifiye bitümlerin %6 oranına kadar penetrasyon ve düktilite değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası değerinin ise arttığı, bu kritik orandan sonra penetrasyon ve düktilite değerlerinin artmaya, yumuşama noktası değerinin azalmaya başladığı görülmektedir. Bu deney sonuçlarına göre PET katkısı ile modifiye bitümlerin

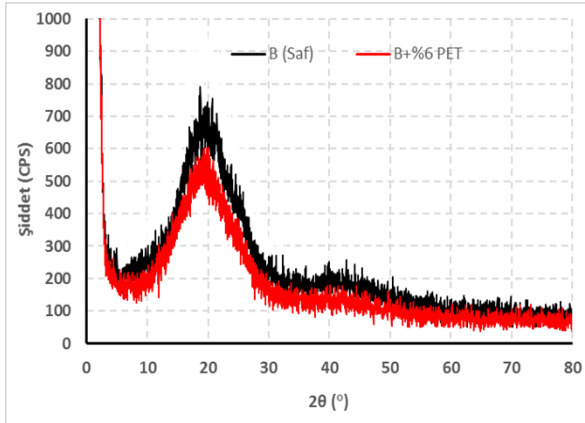
kıvamlarında ciddi oranda bir sertleşme olmasına rağmen bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında saf bitüme göre neredeyse bir değişim meydana gelmemiştir. Bu durum bağlayıcıların sertleşirken elastik kıvamlarını koruduğu ve bunun sonucu olarak karıştırma ve sıkıştırma sürecinde ilave bir enerji sarfıyatı olmayacağı anlamına gelmektedir. Modifiye bitümler üzerinde yapılan geleneksel test sonuçları değerlendirildiğinde genel olarak kritik oranın %6 PET olduğu görülmektedir. Bu orandan sonra modifiye bağlayıcıların sertliğinde meydana gelen azalmanın, karışımdaki fazla PET miktarının bir kısmının bitüm ile reaksiyona girememesi sebebiyle, karışımda dibe çökmesi sonucunda oluştuğu değerlendirilmektedir.

Saf ve modifiye bitümlerin kimyasal karakterizasyonları XRD ve SEM analiz yöntemleri kullanılarak tespit edilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu amaçla saf ve kritik bir oran olan %6 PET katkılı modifiye bağlayıcılar analizlere tabi tutulmuştur. XRD, katı formdaki malzemelerin kristal fazları tanımlamada ve bu fazların yapısal özelliklerini analiz etmek için kullanılan çok yönlü bir analiz yöntemidir. Modifiye bitümlerin kristalit parametreleri genellikle XRD ile belirlenmektedir. SEM, malzemelerin mikro-morfolojik yapısının gözlemlenmesinde kullanılan analiz yöntemidir. Polimer modifiyeli bitümün faz morfolojisini incelemede en çok kullanılan yöntemlerden biri olan SEM görüntüleri; bitüm-polimer uyumluluğunu ve yaşlanma sırasında meydana gelen hasarı ortaya çıkarmada kullanılmaktadır [37].

Saf ve PET modifiyeli bağlayıcılar üzerinde uygulanan XRD analiz sonuçları Şekil 1'de verilmiştir.

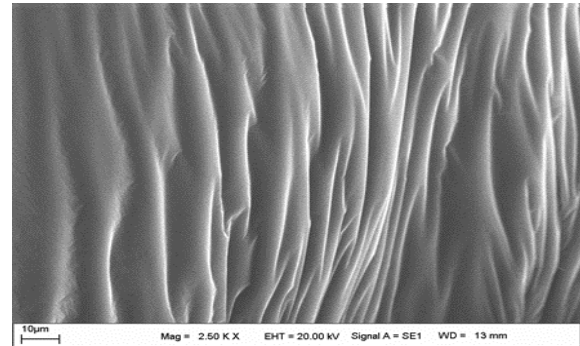
**Çizelge 6.** Saf ve modifiye bitümlerin fiziksel özellikleri (Physical properties of pure and modified bitumen)

Deneyleer	Bağlayıcı Türü					
	B	B +%2PET	B +%4PET	B +%6PET	B +%8PET	B +%10PET
Penetrasyon	88	75	73	64	73	81
Yumuşama noktası	46,75	50,8	51,1	52,2	50,25	48,4
Düktilite	117	109	105	101	107	112
Karıştırma aralığı	159-165	154-160	157-162	159-163	160-165	157-162
Sıkıştırma aralığı	147-152	142-147	146-151	148-153	148-152	148-153
Karıştırma sıcaklığı	162	157	159,5	161	162,5	159,5
Sıkıştırma sıcaklığı	149,5	144,5	148,5	150,5	150	150,5

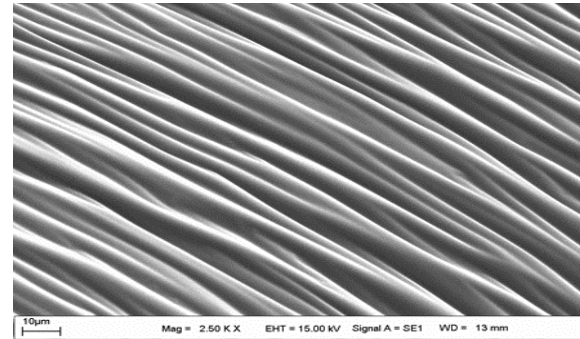
**Şekil 1.** Saf ve %6 PET modifiyeli bitümlerin XRD analizleri (XRD analysis of pure and 6% PET modified bitumen)

Şekil 1’de saf bitüm ve %6 PET + TEO katkılı numunelerin XRD difraktogramları incelendiğinde saf bitüme (B) ait difraktogramda pik şiddeti daha yüksek ve kısmen kristalin bölgeler mevcut olduğu görülmektedir. Ayrıca iki farklı makromoleküler yapı mevcuttur. İlk pik maksimumu yaklaşık 20-2θ geniş ve yayvan olan, diğeri ise 43-2θ değerinde ve daha az alana sahip olan amorf piktir. Saf bitüme TEO+PET katıldığında ise pik şiddeti azalmaktadır. Geniş pike ait azalma tamamen belirgin olup kristalin pikler tamamen kaybolmaktadır. 43-2θ’daki pik hemen hemen kaybolmuştur. Bu durum PET+TEO’nun asfalt ile kimyasal reaksiyona girdiği ve yapıyı amorflaştırıldığı şeklinde izah edilebilir. TEO’nun güçlü bazik yapısı asfaltı parçalayıp yapıdaki fonksiyonel gruplar ile reaksiyona girerek yapıyı amorf yapıya dönüştürdüğü ve amorf PET’in katkısı ile amorfliğin arttığı ifade edilebilir.

PET modifiyeli bitümde, PET’in saf bitümdeki dağılım durumunu belirlemek ve sürekli ve süreksiz faz yapısını yüzey morfolojisi açısından belirlemek için SEM kullanılmıştır. Tüm bağlayıcı numunelerinin yüzey görüntülemesi, 2.50K büyütme ile Zeiss EVO 50 Model cihazı kullanılarak yapılmıştır. Saf ve %6 PET modifiyeli bitümlerden elde edilen SEM görüntüleri, Şekil 2’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 2.** Numunelerin SEM görüntüleri (SEM images of samples) (a) B; (b) B+%6 PET

Şekil 2’den görüldüğü gibi saf bitüme ait SEM sonucuna göre yüzey morfolojisinin oldukça homojen ve grafitik yapıda olduğu görülmektedir. Oda koşullarında meydana gelen soğuma esnasında, düzlemsel grafitik yapısı nedeniyle, numunede yapısal gerilmeler sonucunda büzülme meydana gelmiştir. Büzülme arasındaki düzensizlikler yapıda kristalin bölgelerin varlığı ile açıklanabilir. Yukarıda saf bitüme ait XRD difraktogramı incelendiğinde, bu bitümün büyük oranda amorf karakterde olduğu ve kısmen kristalin bölgelere sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak B+%6 PET karışımında TEO’nun PET ile kimyasal reaksiyonu ve/veya etkileşimi sonucu grafitik bir yapının ortaya çıktığı görülmektedir. Kurumadan sonraki büzülmenin daha belirgin ortaya çıkması bu etkileşimin gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Özellikle kristalin PET ile etkileşim sonucu grafitik yapının ortaya çıkması, PET’in bitüm içerisinde çözülerek homojen bir dağılım göstermesi ve büzülmenin homojenliği, sonuç ürününün (bitümlü karışımın) mekaniksel özellikleri üzerinde olumlu bir etki oluşturabileceği sonucuna varılabilir.

## 2.2. Modifiye Karışım Numunelerinin Hazırlanması (Preparation of Modified Mix Samples)

PET’in BSK’ların performans özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla saf ve modifiye bitümler ile ASTM D1559’a göre Marshall tasarım yöntemi kullanılarak sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak saf bitüm kullanılarak karışım tasarımı için gerekli olan optimum bitüm içeriği (obi) belirlenmiştir. Belirlenen obi esas alınarak, karışım testlerinde kullanılmak üzere saf (kontrol) ve modifiye karışım numuneleri hazırlanmıştır. Her bir saf numunenin hazırlanması için, bitüm ve 1200 gr agrega sırasıyla 162 ve 165 °C sıcaklıkta ısıtılmıştır. Bitüm ve agrega karıştırma sıcaklığında karıştırıldıktan sonra, 457 mm yüksekten serbest düşen tokmak ile her bir yüzeyine 75, toplamda 150 darbe uygulanarak sıkıştırma sıcaklığında sıkıştırılmıştır. Benzer şekilde, modifiye bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları esas alınarak, modifiye karışım numuneleri hazırlanmıştır.

Çalışmada, saf ve modifiye karışım numuneleri yine sırasıyla B, B+%2PET, B+%4PET, B+%6PET, B+%8PET ve B+%10PET olarak kodlanmıştır.

## 3. DENEYSSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

### 3.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi (Marshall Stability and Flow Test)

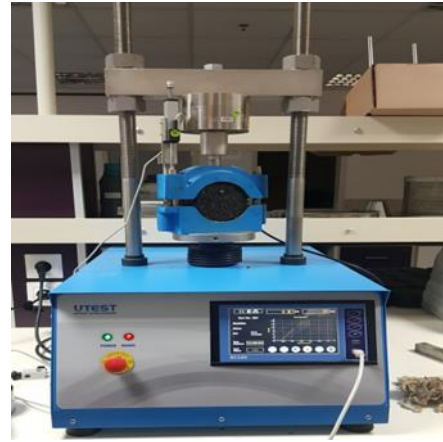
Bu deney, ASTM D1559 standardında belirtildiği üzere, bitümlü karışımların plastik akmaya karşı gösterdiği direncin tayini için yapılmaktadır.

Deney için, hazırlanmış olan numunelerin gerekli ölçü ve ağırlıkları alındıktan sonra, numuneler 60±1 °C sıcaklıktaki su banyosunda 30-40 dakika kadar bekletilir. Bu süre sonunda numuneler sudan çıkarılıp kırma çenesine ortalanacak biçimde yerleştirilir ve numuneye 50±2 mm/dakika hızla yükleme yapılır. Deneyde,

numunenin kırıldığı andaki stabilitesi ve akma değeri kaydedilir. Stabilite, karışımın deformasyona karşı koyabildiği maksimum dayanımı ifade eder. Akma ise maksimum yüke ulaştığı anda numunede meydana gelen düşey deformasyondur. Deney için standart numune yüksekliği 63.5 mm kabul edilir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için ise bağıntı (1) yardımıyla stabilite düzeltme katsayıları hesaplanır [38].

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

Eşitlikteki c; düzeltme katsayısı, h ise numune yüksekliğini göstermektedir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınarak kaydedilir ve bu şekilde değerler belirlenmiş olur [38]. Marshall stabilite deney cihazı Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Marshall stabilite cihazı (Marshall stability device)

Bu deney sonunda ayrıca, BSK’ların sertliğinin ve deformasyona karşı direncinin bir göstergesi olarak kabul edilen Marshall oranı (MQ) değeri de hesaplanabilmektedir. MQ, stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle elde edilmektedir [39].

### 3.2. Kalıcı Marshall Stabilitesi (Retained Marshall Stability) (RMS)

RMS deneyi BSK’ların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek için uygulanan bir deneydir. Deneyde numuneler 60±1 °C sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat bekletilip Marshall deneyine tabi tutulmaktadır. Bu koşullarda bekletilen numunelerin stabilite değerinin normal stabilite değerine oranlanmasıyla RMS değeri belirlenmektedir. RMS değeri yüksek olan karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının da yüksek olması beklenmektedir [40].

### 3.3. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi (Indirect Tensile Strength Test) (ITS)

ITS deneyi, BSK kaplamaların çekme mukavemeti özelliklerinin saptanması ve kaplamalarda sıcaklık ve yorulma nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize etmek için AASHTO T245 veya ASTM D4123 standardına göre yapılan bir deneydir. Bu deney Marshall cihazı kullanılarak dakikada 50mm’lik yük artış hızında gerçekleştirilir. ITS testi, çap düzlemi doğrultusunda düşey olarak yüklenen ve paralel hareket



eden yüklerin sıkıştırması ile silindirik deney numunenin kırılmasını kapsar. Bu sebeple BSK kaplamaların yüzeyinin kırılma özellikleriyle ilgili bir bağlantı da kurulabilir. ITS değerini hesaplamada bağıntı (2) kullanılmaktadır [4].

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

$P_{max}$ : Uygulanmış maksimum yük (kN)

$t$  : Numunenin kalınlığı (mm)

$d$  : Numunenin çapı (mm)

ITS deneyi, genellikle asfalt karışımların kohezyon kuvvetini ve orta sıcaklıklardaki tekerlek izi direncinin önemli bileşenleri olan sertlik ve durabilitesini değerlendirmek için de kullanılmaktadır. Karışımın ITS değeri, asfalt karışımın kohezyon kuvvetine bağlı olarak artar ve bu yüzden bağlayıcının özelliklerinden güçlü bir şekilde etkilenir. Karışım kohezyonunun bir göstergesi olan ITS değeri, karışımın orta sıcaklıklardaki stabilitesini sağlar ve durabilite ve soyulma potansiyelinde olduğu kadar tekerlek izi direnciyle ilişkili olabilir [4].

### 3.4. Nem Hasarı Direnci Deneyi (Moisture Damage Resistance Test)

BSK kaplamaların su ile teması sonucu hasar görmeye karşı gösterdiği direnç nem hassasiyeti olarak ifade edilmektedir. Kaplama bünyesindeki su, asfalt bağlayıcı ve agregalar arasındaki bağı zayıflatarak kaplamaya zarar vermektedir. AASHTO T283 deneyi ile sıcak karışımların nem hassasiyeti belirlenmektedir. Bu deneyde numuneler 'koşullandırılmış' ve 'koşullandırılmamış' olmak üzere iki gruba ayrılır. Koşullandırılmış numunelerde numunenin hava boşluk hacmi bir vakum ile %60-80'i su ile doldurulur. Daha sonra bu numuneler -18°C dondurucuda 16 saat bekletilir. Dondurucudan çıkarılan numuneler 60°C su banyosunda 24 saat bekletilir. Buradan çıkartılan numuneler 25°C'deki su banyosunda 2 saat daha bekletilir. Aynı anda koşullandırılmamış numuneler ise 25°C'deki su banyosuna 2 saat süreyle yerleştirilir. Daha sonra hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış numunelerin dolaylı çekme direnci (ITS) belirlenir. Koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme direnci ( $ITS_{yaş}$ ), koşullandırılmamış numunelerin dolaylı çekme direnci ( $ITS_{kuru}$ ) olarak ifade edilir ve dolaylı çekme direnci oranı (ITSR) değeri bağıntı (3) ile belirlenmektedir [4]. Numunelerin hazırlanması ve deney tabii tutulması Şekil 4'de verilmiştir.

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

ITSR : Dolaylı çekme direnci oranı (%)

$ITS_{yaş}$  : Koşullandırılmış (yaş) numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)

$ITS_{kuru}$  : Koşullandırılmamış (kuru) numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)



Şekil 4. Numunelerin hazırlanması ve deney tabii tutulması (Preparation and testing of samples)

Numunelerin nem hasarı direnci bakımından uygun kabul edilmesi için ITSR değerlerinin %80'den büyük olması önerilmektedir [4].

## 4. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

### 4.1. Marshall Stabilite Deney Sonuçları (Marshall Stability Test Results)

B 70/100 saf bağlayıcı karışım numunesinin optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi için karışımda kullanılacak olan agrega miktarı sabit tutularak, agrega ağırlığının %4 - %4,5 - %5 - %5,5 - %6 - %6,5 oranlarında bitüm eklenerek karışım numuneleri hazırlanmıştır. Tüm numunelerin fiziksel özellikleri belirlendikten sonra, hacim özgül ağırlıkları ( $D_p$ ), boşluk oranları ( $V_h$ ), agregalar arası boşluk oranları ( $VMA$ ) ve bitümlü dolu boşluk oranları ( $V_f$ ) gibi hacimsel özellikleri tespit edilmiştir. Daha sonra numuneler Marshall stabilite cihazına yerleştirilerek, Marshall stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Saf bitüm ile hazırlanmış olan numunelerin belirlenen hacimsel ve mekanik özellikleri Çizelge 7'de verilmiştir.

**Çizelge 7.** B 70/100 saf bitümün optimum bitüm oranının belirlenmesi (Determination of optimum bitumen ratio of B 70/100 pure bitumen)

% Bitüm	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)	VMA(%)	Vf (%)	Stabilite(kg)	Akma(mm)
4	2,347	7,14	15,31	53,68	1354	1,76
4,5	2,381	5,12	14,48	64,63	1398	1,75
5	2,413	3,20	13,75	76,73	1383	2,29
5,5	2,429	1,93	13,61	85,83	1236	2,75
6	2,431	1,20	13,95	91,42	1179	3,43
6,5	2,424	0,84	14,59	94,27	1059	4,16

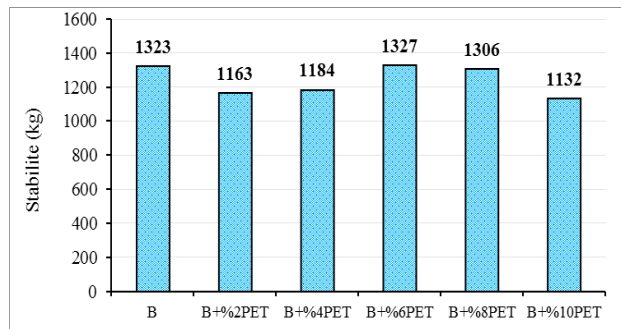
**Çizelge 8.** Kontrol numunesine ait sonuçlar (Results of the control sample)

% Bitüm	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Stabilite(kg)	Akma(mm)
5	2,40	3,91	14,39	72,81	1323	2,44
KTŞ limitleri	-	3-5	14-16	65-75	>900	2-4

Çizelge 7’de elde edilen veriler kullanılarak Dp, stabilite, Vh ve Vf’nin bitüm içeriklerine bağlı değişim grafikleri yardımıyla, Dp’nin maksimum (%6) ve stabilitenin maksimum (%4,5), Vh’in %4 (%4,8) ve Vf’nin %70 (%4,8) olduğu bitüm yüzdelerinin aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm içeriği %5 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu içerikte üç adet kontrol numunesi hazırlanarak elde edilen sonuçların uygunluğu Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar ve şartname limitleri Çizelge 8’de verilmiştir. Kontrol numune sonuçlarının KTŞ asfalt betonu aşınma tabakası için verilmiş olan sınır değerleri sağladığı görülmüştür.

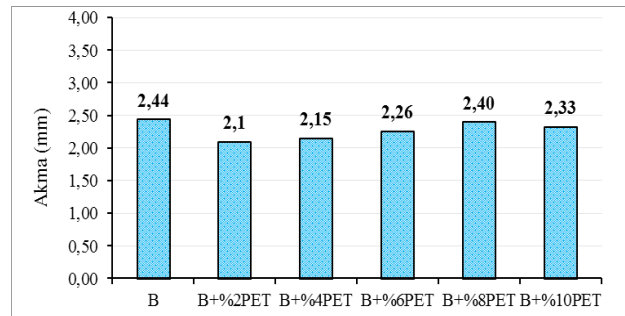
Belirlenen obi oranı (%5) kullanılarak saf ve PET katkıli karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan modifiye karışımların saf karışımlarla kıyaslanabilmesi için bu oran sabit tutulmuştur.

Saf ve PET katkıli karışım numunelerinin Marshall stabilite ve akma deney sonuçları sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir.



**Şekil 5.** Saf ve PET katkıli karışım numunelerinin Marshall Stabilite değerleri (Marshall stability values of pure and PET additive samples)

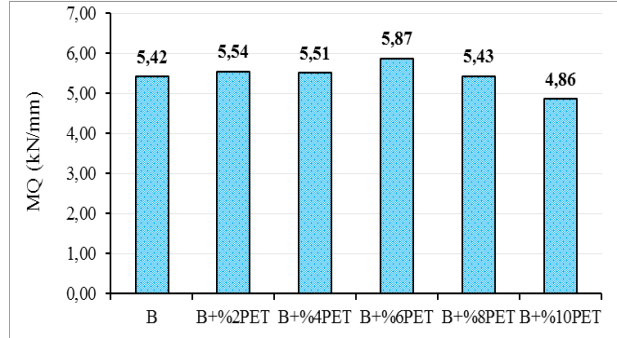
Şekil 5 incelendiğinde, PET katkı artışıyla başlangıçta karışım numunelerinin stabilite değerlerinde azalma olurken özellikle %6 PET ve %8 PET oranlarında saf karışım numunesi ile yaklaşık aynı değerde olduğu ancak PET katkı oranının artışıyla tekrar düşmeye başladığı görülmektedir. Bu durumda PET katkısının karışımların stabilite değerleri, dolayısıyla kaplamaların kalıcı deformasyon direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını ifade etmek mümkündür. Ancak %6 PET katkıli karışımların az da olsa karışımın stabilite değerini artırması olumlu bir etki olarak değerlendirilebilir.



**Şekil 6.** Saf ve PET katkıli karışım numunelerinin akma değerleri (Flow values of pure and PET additive samples)

Şekil 6 incelendiğinde, PET modifiyeli karışımların akma değerleri, saf karışıma göre, çok az miktarda azalma göstermesine rağmen hemen hemen aynı düzeyde olduğu kabul edilebilir. Akma değeri, kaplamanın trafik yükleri altındaki davranışını (plastiklik veya esneklik özelliğini) belirleyen bir değerdir. PET katkısıyla akma miktarının aynı düzeyde kalması, kaplamanın kırılma anındaki davranışının fazla değişmediğini göstermektedir.

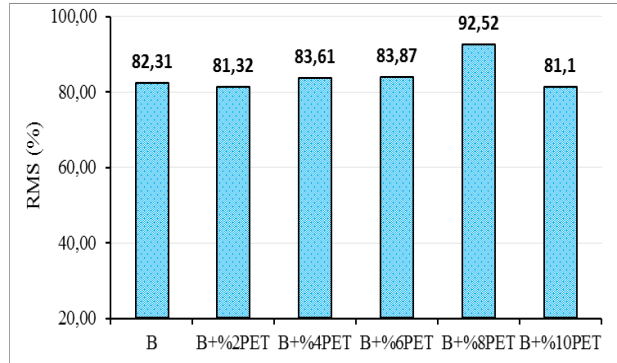
Çalışmada ayrıca saf ve modifiye karışımların Marshall stabilite ve akma değerleri kullanılarak Marshall oranı (MQ) değerleri de hesaplanmış ve sonuçları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Saf ve PET katkıli karışım numunelerinin MQ değerleri (MQ values of pure and PET additive samples)

Şekil 7 incelendiğinde, karışımlardaki PET yüzdesinin artmasıyla, saf karışım numunesine göre MQ değerlerinde sırasıyla %2,2; %1,7; %8,3 ve %0,2 artış, %10 azalma tespit edilmiştir. Saf karışım ile kıyaslandığında en yüksek artışın %6 PET katkıli numunelerde meydana geldiği dolayısıyla kayma gerilmelerine karşı en dirençli karışımların %6 PET katkıli karışımlar olduğu görülmektedir.

Çalışmada atık PET'in sıcak karışımların nem hasarı direnci üzerindeki etkilerini tespit etmek amacıyla saf ve PET katkıli karışım numunelerinin kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS) değerleri de belirlenerek Şekil 8'de verilmiştir.



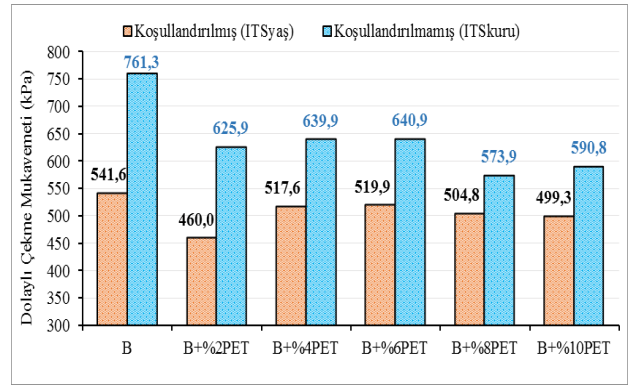
Şekil 8. Saf ve PET katkıli karışım numunelerinin RMS değerleri (RMS values of pure and PET additive samples)

Şekil 8 incelendiğinde, PET katkı oranının artışıyla karışımların, saf karışım numunesine göre, RMS değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Saf karışım numunesine göre bu değişimler sırasıyla, %1,3 azalma, %1,5; %1,9; %12,4 artış ve %1,5 azalma olarak gerçekleşmiştir. Saf ve PET katkıli numunelerin RMS değerlerinin %80'nin üzerinde olması bütün karışımların nem hasarı direnci bakımından uygun olduğunu ancak en yüksek nem hasarı direncinin %8 PET katkıli karışımlarda meydana geldiği görülmektedir. PET katkısıyla RMS değerinin artış göstermesi, PET'in

agrega ve asfalt bağlayıcı arasındaki adezyon kuvveti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve bu sebeple nem hasarı direncinde ciddi bir artışa sebep olduğunu göstermektedir.

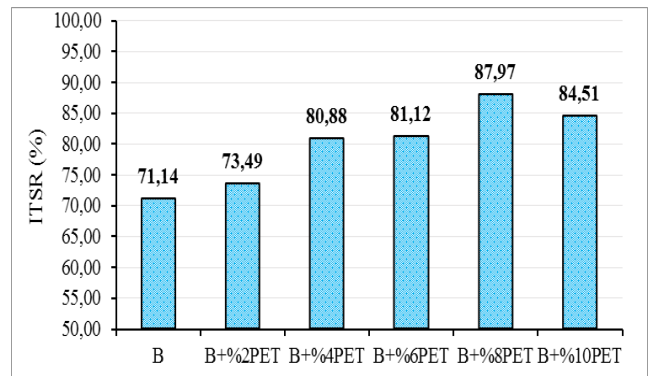
#### 4.2. ITS ve Nem Hasarı Direnci Deney Sonuçları (ITS and Moisture Damage Resistance Test Results)

Atık PET'in sıcak karışımların nem hasarı direnci üzerindeki etkilerini tespit etmek amacıyla hazırlanmış olan koşullandırılmamış ve koşullandırılmış saf ve PET katkıli karışım numuneleri ITS deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin belirlenen ITS değerleri Şekil 9'da, elde edilen ITSR değerleri ise Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. Saf ve PET katkıli karışımların ITS değerleri (ITS values of pure and PET additives)

Şekil 9 incelendiğinde, karışımlarda PET katkı oranı artışıyla, saf bitümlü karışım numunelerine göre, koşullandırılmış (ITS<sub>yag</sub>) karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemet değerleri sırasıyla %15,1; %4,5; %4,1; %6,8 ve %7,9 azalma, koşullandırılmamış (ITS<sub>kuru</sub>) karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemet değerleri sırasıyla %17,8; %16; %15,9; %24,6 ve %23 azalma göstermiştir. Karışımlarda PET katkı oranının artışıyla hem yaş hem de kuru numunelerin ITS değerlerinin azalması, kaplamaların trafik yükü altında meydana gelen çekme gerilmelerine karşı direncinin azaldığını göstermektedir.



Şekil 10. Karışımların ITSR değerleri (ITSR values of mixtures)

Ancak, Şekil 10'da ITSR oranları incelendiğinde, saf karışım numunelerine göre, PET katkı oranı artışıyla modifiye karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) değerleri sırasıyla %3,3; %13,7; %14; %23,7 ve %18,8 artış göstermiştir. En yüksek ITSR değeri %8 PET katkılı modifiye karışımlarda görülmüştür. Modifiye karışımların ITSR değerlerinin %80'in üzerinde olması, karışımların nem hasarına karşı direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca PET katkı kullanımı ile hazırlanan modifiye karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar RMS sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde PET katkısının karışımların nem hasarı direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu, özellikle %8 PET oranının karışımların adezyon ve kohezyon yeteneği üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ifade etmek mümkündür.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, atık PET'in BSK kaplamaların nem hasarı direnci üzerindeki etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Saf ve PET modifiyeli bağlayıcıların XRD ve SEM kimyasal analiz sonuçları değerlendirildiğinde, PET'in TEO kimyasal katkısı etkisiyle bitüm ile kimyasal bir bağ kurduğu veya etkileşime girdiği ve oluşan bitüm+TEO+PET karışımının homojen tek fazlı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.
2. Karışımların Marshall Stabilite deney sonuçları değerlendirildiğinde, PET katkısının karışımların stabilitesi üzerinde önemli bir değişim göstermediği, dolayısıyla kaplamaların direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.
3. Karışımların MQ oranları değerlendirildiğinde, en yüksek MQ değerinin %6 PET katkılı karışımda olduğu, dolayısıyla PET katkısıyla karışımların kayma gerilmelerine karşı direnci üzerinde etkili olduğu görülmüştür.
4. Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS) deney sonuçları değerlendirildiğinde, PET katkısıyla karışımların nem hasarına karşı direncinin büyük oranda arttığı, en yüksek RMS değerinin %8 PET katkılı karışımda olduğu görülmüştür.
5. ITS ve AASHTO T283 deney sonuçları değerlendirildiğinde ise en yüksek ITSR değerinin %8 PET katkılı karışımda görüldüğü ve PET katkısının karışımların adezyon ve kohezyonu üzerinde olumlu bir etki oluşturarak kaplamaların nem hasarı direncini önemli ölçüde geliştirdiği görülmüştür.

Sonuç olarak, atık PET katkısının TEO ile birlikte kullanılmasının oluşan kimyasal bağ sebebiyle modifiye bitüm içerisinde homojen tek fazlı bir yapıya sahip olduğunu, elde edilen PET katkılı modifiye bitümlerin sıcak karışımlarda kullanılması durumunda kaplamaların

nem hasarı direnci üzerinde ciddi bir artışa sebep olduğunu ifade etmek mümkündür. Bu olumlu etkisinin yanında atık PET'in yol mühendisliğinde kullanılmasının ülke ekonomisine bir katkı sağlayabileceği ayrıca atık PET kaynaklı çevre zararı ve kirliliğinin ortadan kaldırılabilceği düşünülmektedir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi, **İÜ-BAP FYL 2016/118** numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Tacettin GEÇKİL:** Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

**Yunus ÖNAL:** Sonuçları analiz etmiştir. / Analyzed the results.

**Ceren Beyza İNCE:** Deneyleri yapmış ve makaleyi yazmıştır.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Saltan M. ve Uysal F., "Vermikülitin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğinin Marshall Stabilite Deney Yöntemi ile Araştırılması", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1): 253-257, (2018).
- [2] Geçkil T., Önal Y. ve İnce C.B., "Atık Polietilen Tereftalat (PET) ile Modifiye Edilmiş Saf Bitümün Fiziksel, Morfolojik ve Isıl Özellikleri", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(1): 157-166, (2020).
- [3] Furtana B., Yalçın E., Kök B.V. ve Yılmaz M., "EVA Bazlı Reçine Modifiyeli Bitümlü Karışımların Mekanik Özellikler Bakımından SBS Modifikasyonu ile Karşılaştırılması", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2): 497-506, (2019).
- [4] Geçkil T., "Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması", *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2008).
- [5] Yılmaz M., Kök B.V. and Yamaç Ö.E., "Determination of Rheological Properties of Polymer and Natural Asphalts Modified Binders After Storage Stability Test", *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 33: 157-165, (2015).
- [6] Tunç A., "*Esnik Kaplama Malzemeleri El Kitabı*", Asil Yayın Dağıtım, İstanbul, (2004).
- [7] Bağdatlı M. E. C. ve Yıldırım M. Ş., "Karayolu Üstyapılarındaki Bozulmaların Bakım Maliyetlerine

- Etkisi”, *Neveşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1): 102-111, (2017).
- [8] Kök B.V., “Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması”, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [9] Kandhal P. S., “Field and laboratory investigation of stripping in asphalt pavements: State of the art report”, *Transportation Research Record*, 1454: 36-47, (1994).
- [10] Collins R., “Status report on the use of hydrated lime in asphaltic concrete mixtures in Georgia”, Georgia DOT, *Materials and Research*, (1988).
- [11] Aschenbrenner T. and Far N., “Influence of compaction temperature and anti-stripping treatment on the results from the Hamburg Wheel-Tracking device. Final Report”, Rpt CDOT-DTDR- 94-9, *Colorado Department of Transportation*, (1994).
- [12] Kim O.X., Bell C.A. and Hicks R.G., “The effect of moisture on the performance of asphalt mixtures”, *ASTM STP-899*, (1995).
- [13] Ahmedzade P., Alataş T. ve Geçkil T., “Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı”, *İMO Teknik Dergi*, 297: 4493-4507, (2008).
- [14] Yamaç Ö.E., “Stiren-Butadien-Stiren ve Gilsonit’in Birlikte Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri”, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [15] Shukla S.R. and Harad A.M., “Aminolysis of polyethylene terephthalate waste”, *Polymer Degradation and Stability*, 91(8): 1850-1854, (2006).
- [16] Evlen H., Özdemir, M.A. ve Çalışkan, A., “Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1031-1037, (2019).
- [17] Navarro R., Ferrandiz S., Lopez J. and Segui V.J., “The influence of polyethylene in the mechanical recycling of Polyethylene Terephthalate” *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1): 110-116, (2008).
- [18] Tayyar E. ve Üstün S., “Geri Kazanılmış Pet’in Kullanımı”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1): 53-62, (2009).
- [19] Gültekin Toroslu A., “Geri dönüşümlü Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS) plastik malzemesinin kalıplama parametrelerine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 1-6, (2020).
- [20] Siddiqui M.N., “Conversion of hazardous plastic wastes into useful chemical products” *Journal of Hazardous Materials*, 167: 728-735, (2009).
- [21] Li Y., White D.J. and Peyton R.L., “Composite material from fly ash and post-consumer PET”, *Resources, Conservation and Recycling*, 24(2): 87-93, (1998).
- [22] Hassani A., Ganjidoust H. and Maghanaki A.A., “Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement” *Waste Management & Research*, 23: 322-327, (2005).
- [23] Leng Z., Sreeram A., Padhan R.K. and Tan Z., “Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP)”, *Journal of Cleaner Production*, 196: 615-625, (2018).
- [24] Modarres A. and Hamed H., “Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes”, *Materials and Design*, 61: 8–15, (2014).
- [25] Ahmadinia E., Zargar M., Karim M., Abdelaziz M. and Shafiqh P., “Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt”, *Materials and Design*, 32(10): 4844–4849, (2011).
- [26] Moghaddam T.B., Soltani M. and Karim M.R., “Experimental characterization of rutting performance of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads”, *Construction and Building Materials*, 65: 487-494, (2014).
- [27] Hoxha M., “The Effects of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) on Asphalt Concrete”, *Master Thesis*, Zirve University, Natural and Applied Sciences, (2014).
- [28] İnternet:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532032023X>
- [29] Silva J., Lucena L., Rodrigues J., Carvalho M. and Costa D., “Use of Micronized Polyethylene Terephthalate (Pet) Waste in Asphalt Binder”, *Petroleum Science and Technology*, 33(15-16): 1508-1515, (2015).
- [30] El-Naga I., and Ragab M., “Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures”, *Construction and Building Materials*, 219: 81–90, (2019).
- [31] Ameri M., and Nasr D., “Properties of asphalt modified with devulcanized polyethylene terephthalate”, *Petroleum Science and Technology*, 34(16): 1424-1430, (2016).
- [32] Abdul Rahman W.M.N.W., and Abdul Wahab A.F., “Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt”, *Procedia Engineering*, 53: 124-128, (2013).
- [33] Moghaddam T., Karim M. and Syammaun T., “Dynamic properties of stonemastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles”, *Construction and Building Materials*, 34: 236–242, (2012).
- [34] Yaşmun E., “Pet Lifi Katkılı Bitüm Kaplamaların Bazı Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
- [35] Ahmadinia E., Zargar M., Karim M.R., Abdelaziz M. and Ahmadinia E., “Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt”, *Construction and Building Materials*, 36: 984-989, (2012).
- [36] Bulak E., “Atık Polietilen Tereftalat (PET) ‘ın Aminolizi ve Aminoliz Ürünlerinin Karakterizasyonu”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011).
- [37] Geçkil T., “Physical, Chemical, Microstructural and Rheological Properties of Reactive Terpolymer-Modified Bitumen”, *Materials*, 12(6): 921, (2019).
- [38] Yalçın E., “Filler Olarak Kireç Kullanımının Modifiye Bitümlerle Hazırlanan Karışımların Performansına Etkisinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014).
- [39] Whiteoak D., “*Shell Bitüm El Kitabı*”, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, (2004).
- [40] Zoorob S.E. and Suparma L.B., “Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt)”, *Cement & Concrete Composites*, 22: 233-242, (2000)