



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Pirina modifiyeli bitümlerin yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirliği ve kalıcı deformasyon direnci

The workability and permanent deformation resistance of pirina modified bitumens at high temperatures

Yazar(lar) (Author(s)): Tacettin GEÇKİL¹, Ceren Beyza İNCE², Semih İSİ³

ORCID¹: 0000-0001-8070-6836

ORCID²: 0000-0002-6385-0964

ORCID³: 0000-0001-8068-2635

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Abuşka M., Akgül M. B. ve Altıntaş V., “Yutucu plaka üzerine konik yayların yerleştirildiği güneş enerjili hava kolektörünün bulanık mantık ile modellenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 745-755, (2022).*(*) : *, (*).

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

DOI: 10.2339/politeknik.859144

Pirina Modifiyeli Bitümlerin Yüksek Sıcaklıklardaki İşlenebilirliği ve Kalıcı Deformasyon Direnci

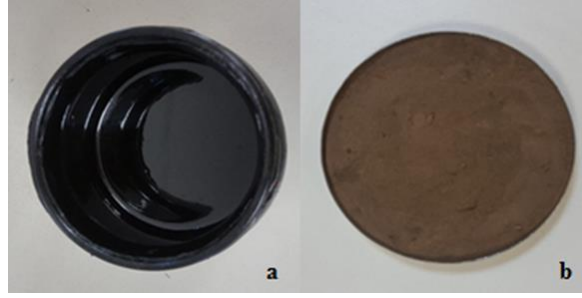
The Workability and Permanent Deformation Resistance of Pirina Modified Bitumens at High Temperatures

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Pirina katkısı, bitümün sertliğini artırdı ve sıcaklık hassasiyetini azalttı./The pirina additive increased the hardness of the bitumen and reduced its temperature sensitivity.
- ❖ Pirina katkısı ile bitümün işlenebilirliği azaldı./The workability of bitumen decreased with the addition of pirina.
- ❖ Bitümün kalıcı deformasyon direnci %15 pirina oranında 6 °C artış göstermiştir./The permanent deformation resistance of bitumen increased 6 °C at the rate of 15% pirina.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Pirinanın bitümün yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirlik ve kalıcı deformasyon direnci üzerindeki etkileri fiziksel, reolojik ve kimyasal testler ile belirlenmiştir./The effects of pirina on the workability and permanent deformation resistance of bitumen at high temperatures were determined by physical, rheological and chemical tests.



Şekil. Bitüm (a) ve Ham pirina (b) / **Figure.** Bitumen (a) and Raw pirina (b)

Amaç (Aim)

Çalışmada ham pirinanın bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirlik ve kalıcı deformasyon direnci üzerindeki etkilerinin tespiti amaçlanmıştır./In the study, it was aimed to determine the effects of raw pirina on the workability and permanent deformation resistance of bituminous binders at high temperatures.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışmada modifiye bitümlerin özellikleri fiziksel, reolojik ve kimyasal karakterizasyon testleri ile belirlenmiştir./In the study, the properties of modified bitumens were determined by physical, rheological and chemical characterization tests.

Özgünlük (Originality)

Ham pirinanın yol kaplamalarında bir modifiyer olarak kullanılabileceği ilk kez bu çalışmada ortaya konmuştur./It was first demonstrated in this study that raw pirina can be used as a modifier in road pavements.

Bulgular (Findings)

Çalışmada, pirina ile bitümün sertleştiği, oksidasyona ve kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığı ancak işlenebilirliğinin azaldığı görülmüştür./In the study, it was observed that bitumen hardened with pirina, its resistance to oxidation and permanent deformations increased, but its workability decreased.

Sonuç (Conclusion)

Pirina katkısı ile bitümlerin işlenebilirliğinin azaldığı ancak kalıcı deformasyon direncinin artış gösterdiği görülmüştür./It was observed that the workability of bitumens decreased with the addition of pirina, but the permanent deformation resistance increased.

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.

Pirina Modifiyeli Bitümlerin Yüksek Sıcaklıklardaki İşlenebilirliği ve Kalıcı Deformasyon Direnci

Araştırma Makalesi / Research Article

Tacettin GEÇKİL, Ceren Beyza İNCE*, Semih İSSİ

Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya İnönü Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 12.01.2021 ; Kabul/Accepted : 11.02.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 22.02.2021)

ÖZ

Bu çalışmada, tarımsal bir atık olan pirina'nın bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirliği ve kalıcı deformasyon direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk olarak saf B 160/220 bitüme ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20 oranlarında pirina eklenecek modifiye bitümler elde edilmiştir. Saf ve modifiye bitümlerin fiziksel karakteristikleri penetrasyon, yumuşama noktası ve duktilite deneyleri ile; yüksek sıcaklıklardaki akışkanlık ve işlenebilirlik özellikleri dönel viskozimetre (RV) deneyi ile; bağlayıcıların kalıcı deformasyon dirençleri dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi ile; kimyasal karakterizasyonları ise taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) analizleri ile belirlenmiştir. Fiziksel ve RV deney sonuçlarına göre, pirina katkısı ile bağlayıcıların sertleşme eğilimi gösterdiği, akışkanlıklarının azaldığı ve buna bağlı olarak işlenebilirlik sıcaklıklarının arttığı görülmüştür. Ayrıca, bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerinin de pirina katkısı ile azaldığı tespit edilmiştir. DSR deney sonuçlarına göre, saf bitümün 58 °C yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyonlara karşı göstermiş olduğu direnç, pirina katkı artışına bağlı olarak özellikle %15 oranında 64°C sıcaklığa yükselmiştir. Kimyasal karakterizasyon sonuçlarına göre, bitüm-pirina karışımının homojen tek fazlı bir yapı oluşturduğu ve ham pirinanın selülozik yapısı sebebiyle karışımın sertleşmesine rağmen elastik bir yapı haline geldiği görülmüştür. Sonuç olarak, pirina katkısı ile bağlayıcıların sertleşerek işlenebilirliklerinin azaldığı ancak yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyon dirençlerinin arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bitüm, pirina, modifiye bitüm, işlenebilirlik, kalıcı deformasyon direnci.

The Workability and Permanent Deformation Resistance of Pirina Modified Bitumens at High Temperatures

ABSTRACT

In this study, the effect of pirina, which is an agricultural waste, on the workability and permanent deformation resistance of bituminous binders at high temperatures were investigated. For this purpose, firstly, modified bitumens were obtained by adding 5, 10, 15 and 20% by weight of pirina to pure B 160/220 bitumen. Physical properties of pure and modified bitumens are determined by penetration, softening point and ductility tests; fluidity and workability properties at high temperatures by the rotational viscometer (RV) test; the permanent deformation resistance of the binders by dynamic shear rheometer (DSR) test; their chemical characterizations were determined by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) analysis. According to the physical and RV test results, it was observed that the binders tended to harden, their viscosity decreased and the workability temperatures increased accordingly. In addition, it has been determined that the temperature sensitivity of the binders decreases with the addition of pirina. According to DSR test results, the resistance of pure bitumen against permanent deformations at 58 °C high temperature increased to 64°C, especially by 15% due to the increase in the additive of pirina. According to the chemical characterization results, it was observed that the bitumen-pirina blend formed a homogeneous single-phase structure and the blend became an elastic structure despite hardening due to the cellulosic structure of the raw pirina. As a result, it was observed that the workability of the binders hardened with the pirina additive, but their resistance to permanent deformation at high temperatures increased.

Keywords: Bitumen, pirina, modified bitumen, workability, permanent deformation resistance.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bitümlü bağlayıcılar, yapıları itibari ile viskoelastik ve termoplastik bir malzeme oldukları için sıcaklık, farklı yükler, yükün şiddeti ve yükleme hızına bağlı olarak farklı davranışlar sergilemektedirler. Bitümlerin bu davranışı, içerisinde ağırlıkça %5-7 oranında buldukları bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamaların

performansını da doğrudan etkilemektedir. BSK kaplamalar farklı trafik ve çevre şartlarına maruz kaldıklarında bünyelerinde zamanla kalıcı deformasyon, düşük sıcaklık ve yorulma çatlakları gibi bozulmalar meydana gelmektedir [1-7]. Bu bozulmaları ortadan kaldırmak amacıyla çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak bitümler modifiye edilmekte ve kaplamaların performansı artırılmaya çalışılmaktadır [2,8]. Bu amaçla polimerler, kauçuk, çeşitli yağlar, filler malzemeler, elyaflar ve çeşitli çözücüler gibi katkıları

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

modifikasyonda kullanılmaktadır [2,8,9]. Ancak son yıllarda araştırmacılar, atık malzemelerin değerlendirilmesi ve çevre kirliliğinin azaltılması konusundaki çalışmalardan yola çıkarak çeşitli atık malzemeleri modifikasyonda kullanmaya başlamışlardır [10-12].

Kullanım ömrünü tamamlamış, yer bertaraf eden ve çevreye zarar veren her türlü malzeme "atık" olarak adlandırılmaktadır. Günlük yaşantımızda beslenmeden ısınmaya hatta barınmaya kadar her türlü zorunlu veya sosyal ihtiyaç sonucunda çeşitli atık malzemeler oluşmaktadır ve bu malzemeler çevreye zarar vermenin yanı sıra büyük yer işgallerine sebep olmaktadır [13,14]. Atık malzeme denilince ilk akla gelen çöpler ve plastikler olsa da, tarım arazilerinden hasat sonrası elde edilen atıklar (zeytin, mısır, ayçiçeği, pamuk, buğday gibi), hayvan yetiştiriciliğinde elde edilen atıklar (gübre gibi), çeşitli sanayi atıkları (metal ve madeni yağ kalıntıları gibi) ve ormanlardan elde edilen odun vb. kalıntıların hepsi birer atık malzemelerdir [15-20].

Bu çalışmada ise, tarımsal bir atık olan ve çevresel kirliliğe sebebiyet veren ham pirinanın modifiye bitümlerin işlenebilirlik ve kalıcı deformasyon direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Pirina, zeytinyağının üretimi sonrasında oluşan bir yan ürün olup çekirdek, kabuk ve posadan meydana gelmektedir. Yapısında yaklaşık %75-80 kuru madde, %35-50 ham selüloz, %5-10 ham protein, %3-5 ham kül ve %8-15 ham yağ bulunmaktadır [21,22]. Dünyada İtalya, İspanya ve Yunanistan sonra 4. büyük zeytin üreticisi olan ülkemizde 91.700.000 adet zeytin ağacı bulunmakta ve 1.800.000 ton zeytin üretimi yapılmaktadır [22,23]. Üretilen bu zeytinlerin yaklaşık %75'i zeytinyağı üretiminde değerlendirilmekte ve

zeytinyağı üretiminden de yaklaşık %35-45 kadar pirina elde edilmektedir. Bu oranlara göre, ülkemizde her yıl yaklaşık 472.500-540.000 ton pirina elde edilmektedir. Elde edilen bu pirinanın az bir kısmı kışın hayvan yeminin zor bulunması sebebiyle kullanılsa da, büyük çoğunluğu atık olarak kalmakta ve çevreye zarar vermektedir [21,22].

Pirina malzemesi kullanılarak yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu malzemenin çoğunlukla gıda, ziraat ve kimya mühendisleri tarafından kullanıldığı [24-26], karayolu mühendisliğinde ise neredeyse hiç kullanılmadığı, yapılan tek bir çalışmada ise yanmış pirinanın bitüm modifikasyonunda kullanılması ile bitümün sertleştiği ve bitümlü karışımın nem direncinin arttığı görülmüştür [27].

Bu çalışmada ise, herhangi bir işleme tabi tutulmadan elde edilen ham pirinanın bitümün özellikleri üzerindeki etkileri penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV ve DSR deneyleri ve SEM ve XRD analiz yöntemleri ile belirlenmiştir. Deneyler sonucunda, ham pirinanın bitümün yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirlik ve kalıcı deformasyon direnci üzerinde etkileri değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

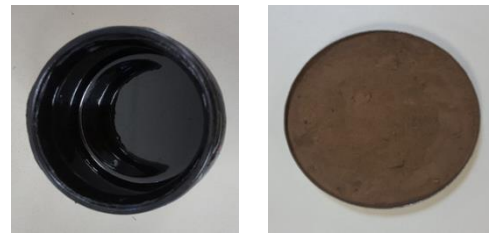
2.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada, bitüm modifikasyonu için bağlayıcı olarak saf B 160/220 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş. (TUPRAŞ)'den temin edilen saf bitümün (Şekil 1a) fiziksel özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Saf bitümün fiziksel özellikleri (Physical properties of pure bitumen)

Özellikler	Standart	Limit	Sonuç
Penetrasyon (0.1mm)	ASTM D5	160-220	163
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	35-43	41,6
Düktilite (cm)	ASTM D113	min. 100	>100
Parlama noktası (°C)	ASTM D92	min. 220	244
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM D70	1,0-1,1	1,038
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-	-0,27
Kütle kaybı	ASTM D2872	maks. 1,0	0,47

Katkı malzemesi olarak kullanılan ve zeytinyağının işleme prosesi sonucunda elde edilen pirina, Kahramanmaraş zeytin fabrikasından temin edilmiştir. Kullanılan ham pirina Şekil 1b'de, genel özellikleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 1. B 160/220 bitüm (a) ve ham pirina (b) (B 160/220 bitumen (a) and raw pirina (b))

Çizelge 2. Ham pirina'nın özellikleri (Properties of raw pirina)

Özellik	Sonuç
Form	Ultra ince amorf toz
Koku	Kokusuz
Çözünürlük (suda)	Çözünmez/Hafifçe çözünür
Çözünürlük (organik çözücü)	Çözünmez/Az çözünür
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,9

2.2. Metot (Method)

2.2.1. Modifiye Bitümlerin Hazırlanması (Preparation of Modified Bitumens)

Çalışmada, modifiye bitümler elde etmek amacıyla ilk olarak saf bitüm 150 °C sıcaklığa kadar ısıtıldı. Daha sonra bitüme ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20 oranlarında pirina eklenerek, 1000 rpm hızında 60 dakika boyunca aynı sıcaklıkta karıştırma işlemi yapıldı ve modifiye bitümler hazırlandı. Elde edilen saf ve modifiye bitümlerin fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite testleriyle; bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirlik özellikleri RV deneyi ile, kalıcı deformasyon dirençleri ise DSR deneyi ile belirlenmiştir.

Çalışmada, saf ve modifiye bitümler sırasıyla B, B+5P, B+10P, B+15P ve B+20P olarak kodlanmıştır.

3. DENEYSSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

3.1. Geleneksel Bitüm Testleri (Conventional Bitumen Tests)

Saf ve pirina katkılı bitümlerin fiziksel özellikleri penetrasyon (ASTM D5), yumuşama noktası (ASTM D36) ve düktilite (ASTM D113) gibi geleneksel testlerle belirlenmiştir. Ayrıca, bitümlerin sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin bir parametresi olarak değerlendirilen penetrasyon indeksi (PI) değerleri de denklem 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(Pen_{25}) - 20 \times SP}{50 \times \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (1)$$

Burada; Pen_{25} , 25 °C'deki penetrasyon, SP ise yumuşama noktası değerini ifade etmektedir. PI değerinin artması, bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin azaldığını ve sertliğinin arttığını göstermektedir. BSK'da, yüksek PI değerine sahip bir bitüm kullanıldığında, karışımların düşük sıcaklıklarda kırılmaya ve yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli hale geldiği değerlendirilmektedir [2].

3.2. Bitümlerin Kısa Süreli Yaşlandırılması (Short-Term Aging Bitumens)

Bitümlerin işlenmesi yani plentte agrega ile karıştırılması ve bu karışımın yola serilmesi sürecinde, yapıları

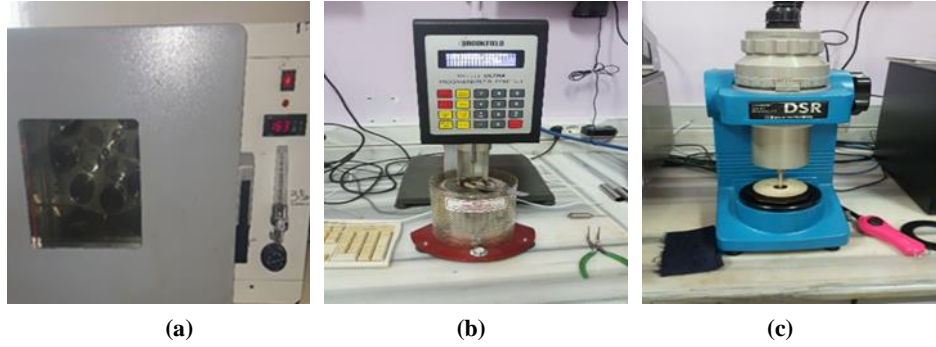
içerisindeki uçucu maddelerin kaybını tespit etmek amacıyla bitümler kısa süreli yaşlanma prosesine tabi tutulur. Bu proses, ASTM D 2872 standardına göre dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) deneyi (Şekil 2a) ile gerçekleştirilmektedir. Deneyde kullanılan 8 adet özel şişenin her birine 35gr'lık bitümlü bağlayıcı numunesi konulur. Bu şişeler, 163 °C sıcaklıktaki etüv içinde dakikada 15 devir yapacak şekilde dönen bir tablaya yerleştirilir ve şişelere 80 dakika boyunca 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava üflenerek numuneler kısa süreli yaşlanmaya tabi tutulur [2,9].

3.3. Dönel Viskozimetre Deneyi (RV) (Rotational Viscosity Test)

Bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki akışkanlık özelliklerinin (işlenebilirlik ve pompalanabilirlik) belirlenmesinde kullanılan RV (Şekil 2b) deneyi, ASTM D 4402 standardına göre gerçekleştirilmektedir. Bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tespiti için, Asfalt Enstitüsü tarafından, RV deneyinin 135 °C ve 165 °C sıcaklıklarda yapılması önerilmektedir. Ancak, bağlayıcıların 135°C'deki viskozite değerlerinin 3000 cP'yi aşmaması istenmektedir. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, 135 °C ve 165 °C sıcaklıklarda belirlenen viskozite değerleri kullanılarak elde edilen viskozite-sıcaklık eğrisi yardımı ile belirlenmektedir. Bu egride, 170 ± 20 ve 280 ± 30 cP viskozite sınırlarına karşılık gelen sıcaklıklar sırasıyla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının belirlenmesi için önerilmektedir [2,28,29].

3.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) (Dynamic Shear Rheometer)

Bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki viskoelastik davranışları DSR deneyi (Şekil 2c) ile belirlenmektedir. ASTM D 7175 standardına göre uygulanan deneyde, bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*) ile faz açısı (δ) değerleri tespit edilerek reolojik özellikleri değerlendirilebilmektedir. G^* değeri, kayma gerilmelerine maruz kalan bağlayıcının deformasyonlara karşı göstermiş olduğu toplam direncin bir ölçüsüdür. δ ise viskoz ve elastik deformasyonlarının bağıl miktarlarının bir göstergesi olarak tanımlanmaktadır. Bu reolojik özellikler yardımıyla, bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyon direnci ($G^*/\sin \delta$) parametresi tespit edilebilmektedir. Deney, orijinal (yaşlandırılmamış) ve RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler üzerinde uygulanmaktadır. Deneyde, orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler 25 mm çapında ve 1000 mikron kalınlıkta hazırlanmaktadır. Superpave şartnamesine göre, $G^*/\sin \delta$ parametresi orijinal bağlayıcılar için en az 1.00 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar için en az 2.2 kPa olarak önerilmektedir [2,28-30]. Yüksek G^* ve düşük δ değere sahip bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğu kabul edilmektedir [2].



Şekil 2. RTFOT (a), RV (b) ve DSR (c) cihazları (RTFOT (a), RV (b) and DSR (c) devices)

3.5. Bağlayıcıların Kimyasal Karakterizasyonu (Chemical Characterization of Binders)

Bitümlü bağlayıcıların kimyasal yapılarında meydana gelen değişimler son yıllarda çeşitli karakterizasyon testleri yardımıyla belirlenmeye başlamıştır. SEM, XRD ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi gibi analizler, bitümlerin karakterizasyonunda sık kullanılan analizlerdir [31-33]. Modifiye bitümlerin yapısındaki faz yapıları, bitüm-katkı malzemesi uyumu SEM görüntüleri yardımıyla belirlenmektedir [31]. Modifiye bitümlerin bünyesindeki kristal fazlarını tanımlamak ve yapısal özelliklerini belirleyebilmek için XRD analizi uygulanmaktadır [32].

4. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

4.1. Geleneksel Test Sonuçları (Conventional Test Results)

Çalışmada, saf ve modifiye bağlayıcıların fiziksel özellikleri, geleneksel bitüm testleri yardımı ile belirlendi. Ayrıca tüm bağlayıcıların PI değerleri de hesaplanarak tüm sonuçlar Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3’de, B 160/220 penetrasyon sınıfı saf bitüme pirina katkısıyla, penetrasyon değerlerinde azalmalar meydana geldiği görülmektedir. Bu azalmalar saf bitüme göre sırasıyla %6,7; %12,9; %26,4 ve %20,2 oranında meydana gelmiştir.

Çizelge 3. Bağlayıcıların geleneksel test sonuçları (Conventional test results of binders)

Denevler	Bağlayıcı türü				
	B	B+5P	B+10P	B+15P	B+20P
Penetrasyon (0.1mm)	163	152	142	120	130
Yumuşama noktası (°C)	41,6	44,3	45,7	46,3	45,4
Düktilite (cm)	125	120	111	107	109
PI	-0,27	0,45	0,66	0,23	0,22
<u>RTFOT sonrası</u>					
Kütle kaybı (%)	0,47	0,26	0,18	0,13	0,10

Katkı oranının artışıyla bağlayıcıların bünyelerinde meydana gelen sertleşmenin doğal bir sonucu olarak, bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri de saf bağlayıcıya kıyasla sırasıyla %6,5; %9,9; %11,3 ve %9,1 oranında artış göstermiştir. Bununla birlikte, yine Çizelge 3’de modifiye bağlayıcıların düktilite değerleri de azalma göstermiş olup bu azalmalar saf bitüme göre sırasıyla %4; %11,2; %14,4 ve %12,8 şeklindedir. Tüm bu sonuçlardaki artış ve azalış oranlarının %15 pirina oranında pik yaptığı, bu orandan sonra değişimlerin azaldığı görülmektedir. %15 oranından sonra, penetrasyon ve düktilitenin artış göstermesi, yumuşama noktası değerinin ise azalması, pirina katkısının özgül ağırlığının bitümün özgül ağırlığına kıyasla daha yüksek olmasından dolayı, pirinanın karışımda dibe çökmesi sonucu meydana geldiği şeklinde değerlendirilmektedir.

Geleneksel test sonuçlarına göre, pirina ilavesiyle bağlayıcıların kıvamında sertleşme meydana geldiği ve

bağlayıcıların daha sert kıvamlı olan B 100/150 penetrasyon sınıfı bitüme dönüştüğü görülmüştür. Bu sebeple, pirina katkılı bağlayıcıların sıcak bölgelerde kalıcı deformasyonlara karşı kullanılabilceğini söylemek mümkündür.

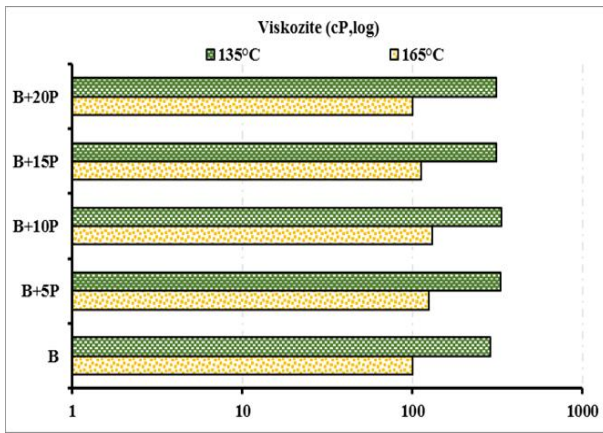
Bağlayıcıların PI değerleri değerlendirildiğinde, pirina katkısıyla bağlayıcıların PI değerlerinin saf bitüme göre artış gösterdiği görülmektedir. PI değerlerinde meydana gelen artış, özellikle %10 pirina oranındaki bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara ve düşük sıcaklık çatlamlarına karşı daha dirençli olacağını göstermektedir [2].

Saf ve pirina katkılı bağlayıcıların bünyesinde meydana gelen uçucu madde kayıplarını tespit etmek amacıyla yapılmış olan RTFOT sonuçlarına göre, oluşan kütle kayıpları şartnamenin öngördüğü sınırın (maks. 1,0) oldukça altında kaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, pirina katkısının bağlayıcıların yaşlanması veya sertleşmesi

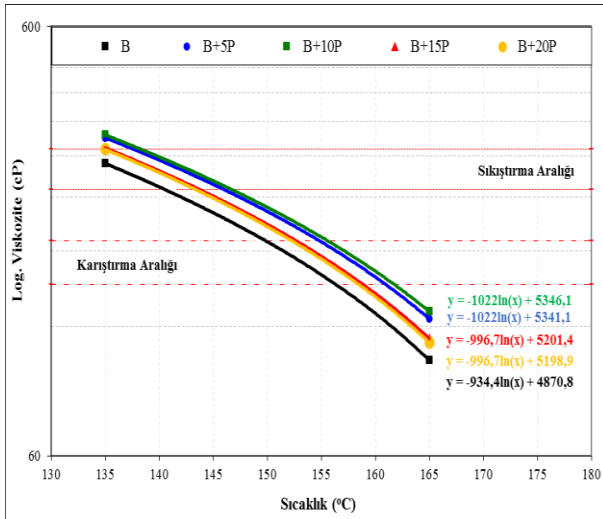
üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmadığı, bağlayıcıları yüksek sıcaklık ve oksidasyona karşı daha dirençli hale getirdiği görülmüştür.

4.2. RV Test Sonuçları (RV Test Results)

Saf ve pirina modifiyeli bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki (135 °C ve 165 °C) viskoziteleri Brookfield DV-III dönel viskozimetre cihazı kullanılarak belirlendi. Bağlayıcıların işlenebilirlik sıcaklıkları olan plentteki karıştırma ve yoldaki serme sıcaklıkları, bu viskozite değerleri kullanılarak oluşturulan sıcaklık-viskozite grafiği yardımı ile tespit edildi. Tüm bağlayıcıların viskozite değerleri Şekil 3’de, sıcaklık-viskozite grafiği Şekil 4’de, ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ise Şekil 5’de verilmiştir.



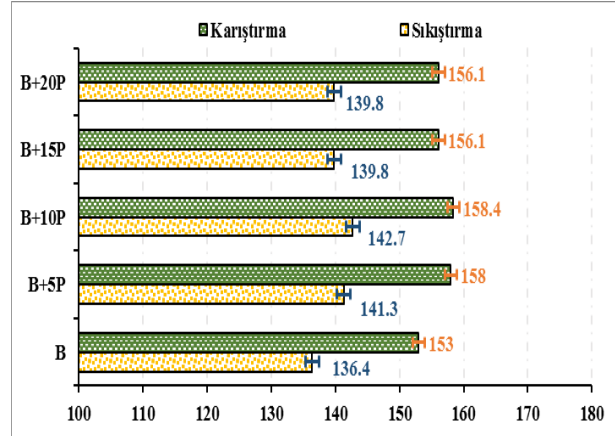
Şekil 3. Bağlayıcıların viskozite değerleri (Viscosity values of binders)



Şekil 4. Bağlayıcıların sıcaklık-viskozite grafiği (Temperature-viscosity graphic of binders)

Şekil 3 ve Şekil 4’de görüldüğü gibi, pirina katkısıyla bağlayıcıların viskozite değerleri (135 °C ve 165 °C) önemli oranda artış göstermiştir. Bu artışlar saf bitüme kıyasla 135 °C’de sırasıyla %14,7; %16,5; %8,7 ve %7,8;

165 °C’de ise %25; %30; %12,5 ve %10 oranlarında meydana gelmiştir.



Şekil 5. Bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları (Average mixing and compacting temperatures of binders)

Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarındaki değişim ise saf bitüme kıyasla sırasıyla karıştırma için %3,3; %3,5; %2 ve %2; sıkıştırma için %3,6; %4,6; %2,5 ve %2,5 oranında meydana gelmiştir. Bu değişimler dikkate alındığında, %15 ve %20 pirina oranlarında artış hızının sabit kaldığı görülmektedir (Şekil 5). Bunun sebebinin bir kısım pirinanın yüksek sıcaklık etkisiyle viskoz hale gelen bitüm içerisinde çökmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu sonuçlara göre, pirina katkısının bağlayıcıların kıvamında sertleşme meydana getirerek yüksek sıcaklıklardaki akışkanlık özelliklerini azalttığı görülmüştür. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının artması, pirina katkılı bağlayıcıların plentteki enerji sarfiyatını arttıracakını göstermektedir. Ancak, bitüm modifikasyonunda sıklıkla kullanılan ve etkinliği kanıtlanmış olan SBS gibi polimer katkıların karıştırma sıcaklıklarının 180 °C’ye kadar ulaştığı [34] ve tarımsal bir atık olan pirina’nın çevreye verdiği zarar göz önüne alındığında bu enerji sarfiyatının göz ardı edilebileceğini söylemek mümkündür.

4.3. Bağlayıcıların Kalıcı Deformasyon Direnci Test Sonuçları (Permanent Deformation Resistance of Binders Test Results)

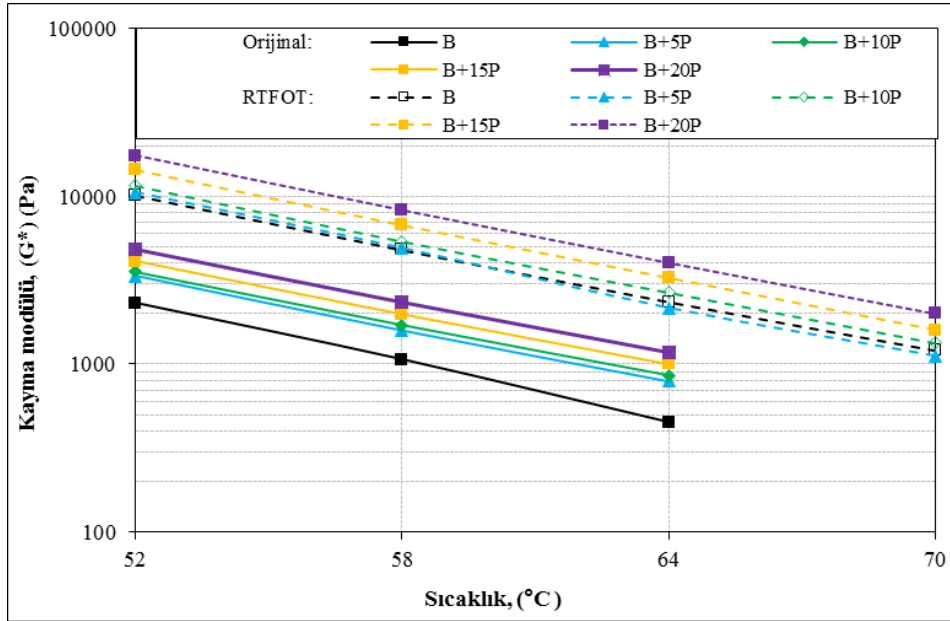
Çalışmada, saf ve pirina katkılı bağlayıcıların, yaşlandırmadan önce ve sonra olmak üzere, yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri DSR deneyi ile belirlendi. Deney, Bohlin DSR-II reometresi kullanılarak ASTM D7175 standardına göre 10 rad/sn frekansında gerilme kontrollü olarak gerçekleştirildi. Bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki performans özelliklerini belirlemek amacıyla, yaşlandırılmamış (orijinal) ve RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler 52-70 °C sıcaklık aralığında deneye tabi tutuldu. Deneyler sonucunda, bağlayıcıların kayma modülü (G^*) ile faz açısı (δ) değerleri belirlenerek yüksek sıcaklıklardaki performansları tespit edildi. Bu amaçla, yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyon direncinin

parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değerleri yardımı ile bitümlerin yüksek sıcaklık performans seviyeleri belirlendi. Saf ve RTFOT kalıntısı bitümlerin tespit edilmiş olan G^* , δ ve $G^*/\sin\delta$ parametrelerinin katkı oranı ve sıcaklığa bağlı

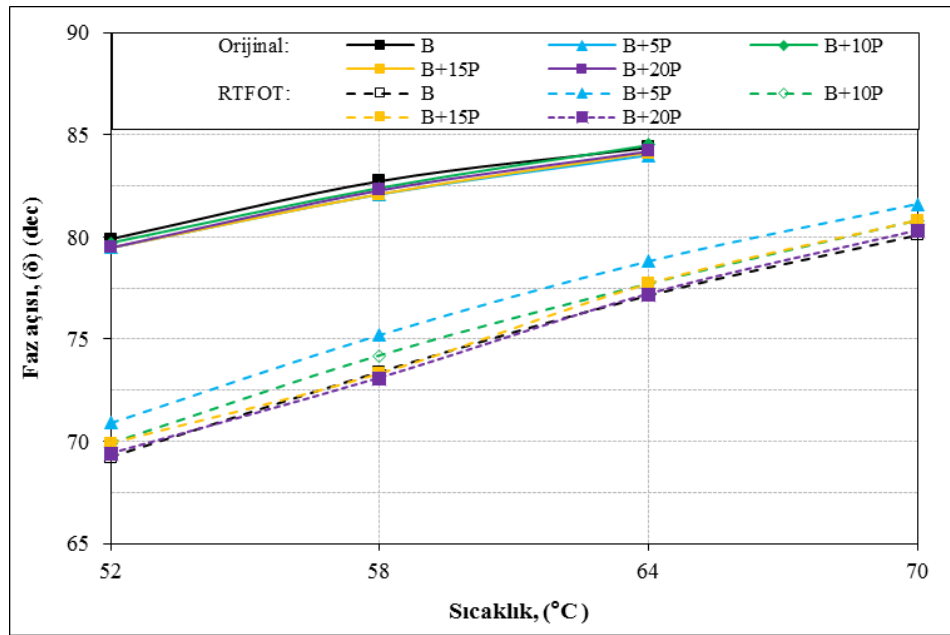
değişimi Çizelge 4'de verilmiştir. Ayrıca bu parametrelerin sıcaklık ile değişimi sırasıyla Şekil 6-8'de verilmiştir.

Çizelge 4. DSR test sonuçları (DSR test results)

Bağlayıcı türü	Sıcaklık (°C)	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	Şartname limitleri (Pa)	Performans Seviyesi (PG)	
B	Orijinal	52	2311	79,89	2347,45	≥ 1000	PG 58-Y
		58	1065	82,74	1073,61		
		64	450	84,39	452,17		
	RTFOT	52	10142	69,22	10847,64	≥ 2200	
		58	4802	73,4	5010,84		
		64	2353	77,15	2413,44		
B+5P	Orijinal	52	3342,4	79,5	3399,3	≥ 1000	PG 58-Y
		58	1586,3	82,1	1601,5		
		64	791,91	84	796,27		
	RTFOT	52	10519	70,9	11131,82	≥ 2200	
		58	4911,4	75,2	5079,94		
		64	2157,51	78,8	2199,4		
B+10P	Orijinal	52	3542,1	79,7	3600,1	≥ 1000	PG 58-Y
		58	1711,2	82,4	1726,4		
		64	857,87	84,5	861,84		
	RTFOT	52	11549	69,9	12298,02	≥ 2200	
		58	5385,3	74,2	5596,76		
		64	2675	77,7	2737,85		
B+15P	Orijinal	52	4114,3	79,5	4184,37	≥ 1000	PG 64-Y
		58	1991	82,1	2010,08		
		64	1006,4	84,1	1011,76		
	RTFOT	52	14465	69,9	15403,14	≥ 2200	
		58	6764	73,31	7061,48		
		64	3275,7	77,7	3352,66		
B+20P	Orijinal	52	4805,1	79,5	4886,93	≥ 1000	PG 64-Y
		58	2335,6	82,3	2356,85		
		64	1177	84,2	1183,06		
	RTFOT	52	17512	69,4	18708,21	≥ 2200	
		58	8281,6	73,1	8655,4		
		64	4024,6	77,2	4127,16		
		70	2000,8	80,3	2029,82		



Şekil 6. Bağlayıcıların G* değerlerinin sıcaklıkla değişimi (Change of G* values of binders with temperature)

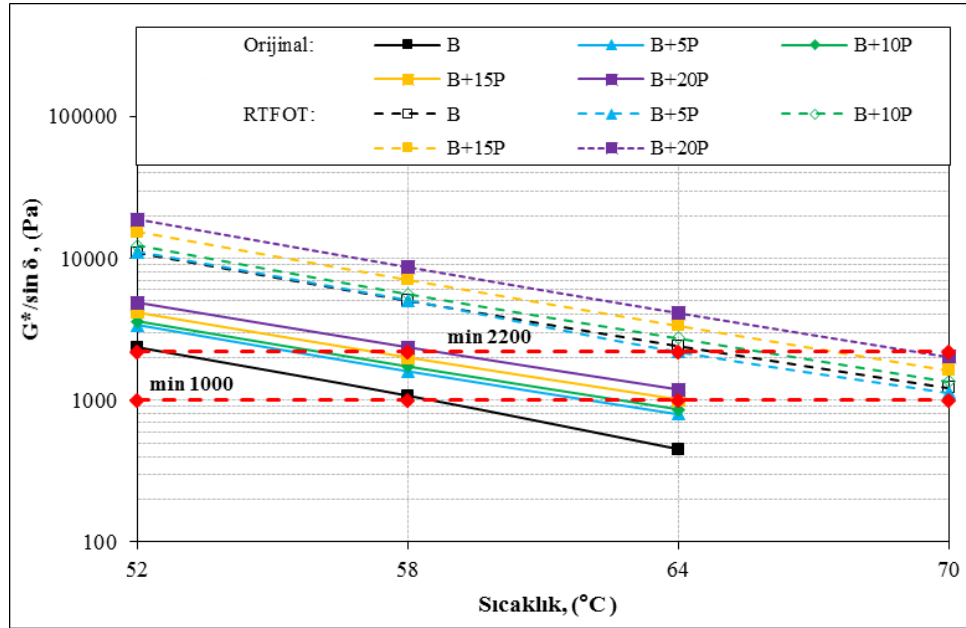


Şekil 7. Bağlayıcıların δ değerlerinin sıcaklıkla değişimi (Change of δ values of binders with temperature)

Şekil 6'de görüldüğü gibi orijinal ve RTFOT ile yaşlanmış bağlayıcıların G* değerleri, artan pirina oranı ile bütün sıcaklıklarda artış göstermiştir. G* değerlerindeki artışlar, bağlayıcıların kayma gerilmelerine karşı toplam deformasyon dirençlerinin arttığını ifade etmektedir. Şekil 7'de bağlayıcıların δ değerleri incelendiğinde ise, artan pirina oranı ile saf bitüme kıyasla fazla bir değişim olmadığı görülmektedir. Bu durum, pirina katkısıyla bağlayıcıların elastik davranışının saf bitüme hemen hemen aynı düzeyde kaldığını göstermektedir.

Şekil 8 incelendiğinde, pirina katkısı ile bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerlerinin aynı sıcaklıktaki saf bitüme kıyasla

arttığı görülmektedir. Bu durum, pirina katkısının bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli hale geldiğini ifade etmektedir. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans dereceleri incelendiğinde, saf ve modifiye bitümlerin sırasıyla 58,7; 62,3; 62,9; 64,05 ve 65,3 °C sıcaklıklara kadar kalıcı deformasyon direnci parametresini sağladığı görülmektedir. Superpave şartname sınırlarına göre bu bağlayıcıların performans seviyeleri sırasıyla PG 58-Y, PG 58-Y, PG 58-Y, PG 64-Y ve PG 64-Y olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. Bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi (Change of $G^*/\sin\delta$ values of binders with temperature)

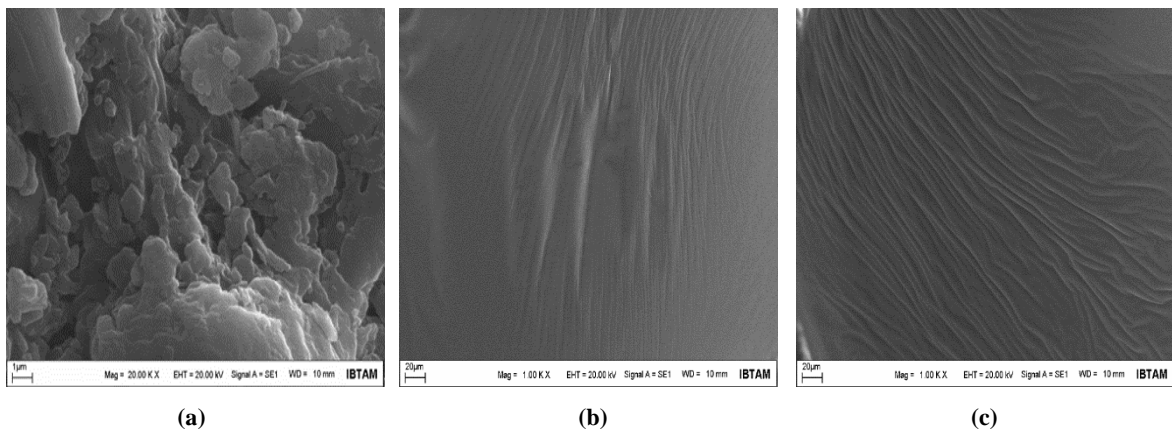
Bu sonuç, pirina kullanımı ile saf bitüme kıyasla kaplamanın 6 °C daha yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olabileceğini göstermektedir.

DSR deney sonuçlarına göre, pirina katkısı ile bağlayıcıların kayma gerilmelerine karşı gösterdiği direncin (G^*) artış göstermesi, modifiye bağlayıcıların kıvamında sertleşme meydana geldiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bağlayıcıların viskoelastik özelliğini ifade eden faz açısı (δ) değerlerinin az da olsa azalması modifiye bağlayıcıların daha elastik kıvama geldiğini ifade etmektedir. Bunun sonucu olarak, pirina katkısı ile bağlayıcıların sertliklerinde artış meydana gelmesine rağmen, elastikiyetlerini kaybetmedikleri ve elastik bir katı gibi davrandıkları, bu sebeple yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı dirençlerinin arttığı ifade edilebilir.

4.4. Bağlayıcıların Karakterizasyon Test Sonuçları (Characterization Test Results of Binders)

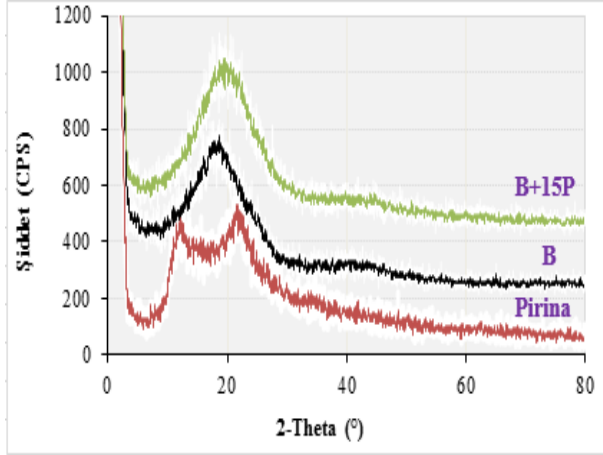
Çalışmada, pirina katkısının bitümlü bağlayıcıların mikroyapısal yapısı üzerindeki etkileri SEM ve XRD analiz testleri ile belirlenmiştir. Pirina katkısının modifiye bağlayıcıların üzerindeki etkisini değerlendirebilmek amacıyla ham pirina, saf bitüm (B) ve kritik bir oran olan %15 pirina katkılı bağlayıcının (B+15P) SEM görüntüleri Şekil 9'da, XRD desenleri ise Şekil 10'da verilmiştir.

Şekil 9a'da ham pirina'nın SEM görüntüsü incelendiğinde, selülozik yapıdaki pirinanın farklı tane boyutlarına ve homojen bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ham pirina, tarımsal bir atık olduğundan yapıda gözeneklilik olmaması beklenen bir sonuçtur.



Şekil 9. Bağlayıcıların SEM görüntüleri, ham pirina (a), B (b), B+15P (c) (SEM images of binders, raw pirina (a), B (b), B+15P (c))

Şekil 9b'de saf bitümün SEM görüntüsü incelendiğinde, saf bitümün tek fazlı homojen bir yapıda olduğu ve az da olsa yapıda büzülmeler olduğu görülmektedir. Şekil 9c'de B+15P bağlayıcının SEM görüntüsü incelendiğinde ise, pirina katkısıyla bağlayıcının yüzeyinde büzülmelerin arttığı, ancak yine de karışımın homojen ve tek fazlı yapısının bozulmadığı görülmektedir.



Şekil 10. Bağlayıcıların XRD desenleri (XRD patterns of binders)

Şekil 10'da ham pirinanın XRD deseni incelendiğinde ise; yarı-kristalin, kristalin ve amorf olmak üzere üç farklı makromoleküler yapıdan oluştuğu görülmektedir. Saf bitümün XRD deseni incelendiğinde, iki makromoleküler yapının mevcut olduğu, bunlardan ilkinin $2\theta \approx 20^\circ$ bandındaki kristalin piki olduğu ve bu pikin bitümün karakteristik piki olduğu görülmektedir. İkinci pik ise $2\theta \approx 40^\circ$ bandındaki geniş ve yayvan pik olan amorf yapıyı göstermektedir. B+15P bağlayıcısına ait XRD deseninde ise, $2\theta \approx 20^\circ$ bandında kristalin pik şiddetinin arttığı ve $2\theta \approx 40^\circ$ bandındaki amorf luğun daha da belirginleştiği görülmektedir. Bu durumda, pirina katkısıyla bağlayıcının yapısının değiştiğini söylemek mümkündür.

Sonuç olarak, bitüm-pirina karışımının homojen tek fazlı bir yapı gibi davrandığı, pirina'nın bitümün sertleşmesi üzerinde etkili olduğu ancak bununla beraber selülozik yapısı sebebiyle aynı zamanda karışımın esnek bir davranış sergilemesine neden olduğu ifade edilebilir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS and RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, pirina'nın katkısının bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirlik ve kalıcı deformasyon direnci üzerindeki etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Geleneksel test sonuçlarına göre, katkı miktarının artışı ile bağlayıcı sertliğinin %15 pirina oranına kadar arttığı ve bitüm sınıfının değiştiği görülmüştür. Bununla birlikte, bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerinin de

azalması, pirina katkılı bitümlerin daha yüksek sıcaklığa sahip iklimlerde kullanılabileceğini ifade etmektedir.

2. RTFOT kütle kaybı sonuçlarına göre, pirina katkısının bağlayıcıların yüksek sıcaklık ve oksidasyon direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

3. RV deney sonuçlarına göre, bağlayıcıların akıcılıkları %10 pirina oranına kadar azalma göstermiş, ancak daha sonra artmaya başlamıştır. Bağlayıcıların akıcılıklarında meydana gelen bu değişimler, işlenebilirlik veya karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarının bu orana kadar artmasına sebep olmuştur.

4. DSR sonuçlarına göre, saf bağlayıcının $58,7^\circ\text{C}$ yüksek sıcaklıkta gösterdiği kalıcı deformasyon direnci pirina katkı artışı ile $65,3^\circ\text{C}$ sıcaklığa kadar yükselmiştir. Superpave şartname limitlerine göre saf ve katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfları sırasıyla PG 58-Y, PG 58-Y, PG 58-Y, PG 64-Y ve PG 64-Y olarak belirlenmiştir. Bu sonuca göre, kritik değişimin %15 pirina katkılı bağlayıcılarda meydana geldiği ve bu oranda bağlayıcı performans sıcaklığının 6°C artarak daha sıcak bölgelerde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu sonucun, pirina katkısı ile bağlayıcıların daha elastik bir katı gibi davranmaları sebebiyle meydana geldiği değerlendirilmektedir.

5. Kimyasal karakterizasyon sonuçlarına göre, selülozik bir yapıda olan pirina katkısının bitüm içerisinde homojen olarak dağıldığı ve bitüm-pirina karışımının tek fazlı bir yapıda olduğu görülmüştür. Bu yapı sebebiyle karışımın sertleşmesine rağmen elastikiyetini koruyabileceğini ifade etmek mümkündür.

6. Sonraki çalışmalarda pirina'nın farklı bitümlerin fiziksel ve reolojik özellikleri ile bitümlü sıcak karışımların özellikleri üzerindeki etkisi bütün yönleriyle araştırılarak bitüm veya karışım modifikasyonunda bir iyileştirici olarak kullanımının araştırılarak literatüre kazandırılması önerilmektedir.

Sonuç olarak, bir tarım atığı olan pirina'nın bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirliğini azalttığı ancak kalıcı deformasyon direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, pirina'nın karayolu mühendisliğinde bir iyileştirici olarak kullanılmasının, tarımsal atıkların çevreye vermiş olduğu zararı azaltacağı ve ekonomiye önemli bir katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi, İÜ-BAP FYL 2016/118 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Çalışmaya ayrıca İnönü Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünden Doç.Dr. Yunus ÖNAL, kimyasal karakterizasyon sonuçlarının yorumlanması konusunda katkılarını sunmuştur. Destek ve katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

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: Deneyle ilgili yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Ceren Beyza İNCE: Sonuçları analiz etmiş ve makaleyi yazmıştır.

Semih İSSİ: Deneyle ilgili yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ahmedzade P., "The investigation and comparison effects of SBS and SBS with new reactive terpolymer on the rheological properties of bitumen", *Construction and Building Materials*, 38: 285-291, (2013).
- Geçkil T. ve Seloğlu M., "Performance properties of asphalt modified with reactive terpolymer", *Construction and Building Materials*, 173: 262-271, (2018).
- Carreau P.J., Bousmina M. and Bonniot F., "The viscoelastic properties of polymer-modified asphalt", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 3 (78): 495-502, (2000).
- Yıldırım Y., "Polymer modified asphalt binders", *Construction and Building Materials*, 21: 66-72, (2007).
- Geçkil T., Önal Y. ve İnce C.B., "Atık PET ile modifiye edilmiş bitümlü sıcak karışımların nem direnci", *Politeknik*, (2021).
- Li X., Ouyang C., Yuan Y., Gao Q., Zheng K and Yan J., "Evaluation of ethylene-acrylic acid copolymer (EAA) modified asphalt: fundamental investigations on mechanical and rheological properties", *Construction and Building Materials*, 90: 44-52, (2015).
- Mouillet V., Farcas F. and Besson S., "Aging by UV radiation of an elastomer modified bitumen", *Fuel*, 87: 2408-2419, (2008).
- Tunç A., "*Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*", Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, (2007).
- 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).
- Ahmedzade P., Fainleib A., Günay T. and Grygoryeva O., "Modification of bitumen by electron beam irradiated recycled low density polyethylene", *Construction and Building Materials*, 69: 1-9, (2014).
- Garcia-Morales M., Partal P., Navarro F.J. and Gallegos C., "Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen", *Fuel*, 85(7-8): 936-943, (2006).
- Ismail Z.Z. and AL-Hashmi E.A., "Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement", *Waste Management*, 28(11): 2041-2047, (2008).
- <http://atiksahasi.com/At%C4%B1k>
- Akyıldız H., Efe H. ve Önen F., "Baraj Yapımında Atık Malzemelerin Kullanımı: Kadıköy Göleti Örneği", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1): 439-445, (2020).
- Gökyay O. ve Özer L.M., "Evsel Katı Atık Toplama ve Taşıma İşkolunda Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Koşullarının Değerlendirilmesi, Ankara-Yenimahalle Örneği", *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(4): 413 - 419, (2020).
- Parlakay O., Çelik A. ve Kızıltuğ T., "Hatay İlinde Tarımsal Üretimden Kaynaklanan Çevre Sorunları ve Çözüm Önerileri", *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(2): 17-26, (2015).
- Kandemir S.Y. ve Açıkcalp E., "Bilecik İli Hayvansal Atıklarının Biyogaz Potansiyellerinin İncelenmesi", *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1): 104-108, (2019).
- Gezer N. ve Işıldar G.Y., "Ankara İlindeki KOBİ'lerde Endüstriyel Atık Yönetimi", *Ankara Üniversitesi SBF Dergisi*, 72(2), 355-375, (2017).
- Kayan A. ve Küçük A., "Plastik Kirliliğin Çevresel Zararları ve Çözüm Önerileri", *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Cilt 22(2): 403-427, (2020).
- Kocabay S., "Balıkesir İli İçin Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17: 234-243, (2019).
- Sansoucy R., "*Olive by-products for animal feed. FAO Animal Production and Health Paper 43*", Rome, Italy, (1985).
- Filya İ., Hanoğlu H., Canbolat Ö. ve Sucu E., "Kurutulmuş Pirinanın Yem Değeri ve Kuzu Besisinde Kullanılma Olanakları Üzerinde Araştırmalar 2. Kuzuların Besi Performansı Üzerine Etkileri", *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(1): 13-23, (2006).
- <https://ticaret.gov.tr/data/5d41e59913b87639ac9e02e8/3acedb62acea083bd15a9f1dfa551bcc.pdf>
- Hocaoğlu S.M., Baştürk İ., Aydoğan C. ve Haksevenler B.H.G., "Türkiye'deki Zeytinyağı İşletmelerinin 3 Fazlıdan 2 Fazlı Üretime Geçiş Durumunda Pirina Tesislerinin Yeterliliğinin CBS Destekli Analizi", *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 32(1), 43-58, (2018).
- Özer S., "Pirina Yağının Fuzel Yağı ile Esterleştirilmesi", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, 4(2): 136-143, (2018).
- Gök O. ve Mesutoğlu Ö.Ç., "Adsorpsiyon Kolon Sisteminde Pirina Kullanılarak Ağır Metal Giderimi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(60): 1000-1009, (2018).
- Kııcı G.Ö. ve Saltan M., "Pirinanın bitüm modifikasyonunda kullanımının araştırılması", *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 12(1): 1-9, (2020).

- [28] McGennis R.B., Shuler S. and Bahia H.U., “Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods”, **Publication FHWA-SA-94-069, Federal Highway Administration**, USA, (1994).
- [29] Zaniwski J.P. and Pumphrey M.E., “Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol”, **Asphalt Technology Program**, West Virginia, USA, (2004).
- [30] Al-Abdul Wahhab H.I., Al-Dubabe I.A., Asi I.M. and Ali M.F., “Performance-based characterization of arab asphalt”, **Building and Environment**, 33(6): 375-383, (1998).
- [31] Mazumder M., Ahmed R., Ali A.W. and Lee S.J., “SEM and ESEM techniques used for analysis of asphalt binder and mixture: A state of the art review”, **Construction and Building Materials**, 186: 313-329, (2018).
- [32] AlHumaidan F.S., Hauser A., Rana M.S., Lababidi H.M.S. and Behbehani M., “Changes in asphaltene structure during thermal cracking of residual oils: XRD study”, **Fuel**, 150: 558-564, (2015).
- [33] Xu T. and Huang X., “Study on combustion mechanism of asphalt binder by using TG-FTIR technique”, **Fuel**, 89(9): 2185-2190, (2010).
- [34] Zhang R., Wang H., Gao J., You Z. and Yang X., “High temperature performance of SBS modified bio-asphalt”, **Construction and Building Materials**, 144: 99-105, (2017).