

## Geri Dönüştürülmüş Atık Polipropilenin Bitümlü Bağlayıcılarda Kullanılması

Perviz AHMEDZADE<sup>1</sup>  
Alexander FAINLEIB<sup>2</sup>  
Taylan GÜNAY<sup>3</sup>  
Olga GRIGORYEVA<sup>4</sup>

### ÖZ

Atık polimerler ekonomik malzemeler olmalarına karşın karayolları gibi geniş bir uygulama alanında katkı malzemesi olarak değerlendirilmeleri durumunda, bitümlü bağlayıcılarla kimyasal etkileşime girmemekte dolayısıyla esnek üstyapı içerisinde kullanımları sınırlı hale gelmektedir.

Çalışma kapsamında, geri dönüştürülmüş polipropilen (PP<sub>R</sub>), gamma ışınması ile radyasyona tabi tutularak polimer üzerinde yeniden kimyasal bağ oluşturabilecek serbest radikaller meydana getirilmiştir. Ağırlıkça %1, %3, %5, %7 ve %9 katkı oranlarında hazırlanan modifiye bitümler üzerinde FT-IR spektroskopisi, floresan mikroskobu, geleneksel test yöntemleri, kısa ve uzun vadeli yaşlandırma işlemleri, dönel viskozite, dinamik kayma reometresi ve kirleş eğme reometresi deneyleri yapılarak katkının bitüm içerisinde kullanımı kimyasal ve fiziksel yöntemlerle incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bitüm, geri dönüştürülmüş polipropilen, gamma ışınması, modifikasyon.

### ABSTRACT

#### Usage of Recycled Postconsumer Polypropylene in Bituminous Binder

Although waste polymers are economical materials, they are limited, in the case of a wide usage in highway application due to no chemical interaction between them and bituminous binders.

In this work, recycled polypropylene was exposed to gamma irradiation to form free radical on the polymer surface. Five different samples of modified bitumen were prepared with the modifier content, wt. 1, 3, 5, 7 and 9% and binders were investigated in term of chemical

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 18.08.2014 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2016 gününe kadar tartışmaya açıktır.

1 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - perviz.ahmedzade@ege.edu.tr

2 Ulusal Bilimler Akademisi, Makromoleküler Kimya Enstitüsü, Kiev, Ukrayna - fainleib@i.ua

3 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - taylan.gunay@ege.edu.tr

4 Ulusal Bilimler Akademisi, Makromoleküler Kimya Enstitüsü, Kiev, Ukrayna - grigoryevaolga@i.ua

and physical properties by means of FT-IR spectroscopy, florescent microscope, conventional tests, short and long term aging procedures, rotational viscosity, dynamic shear and bending beam rheometer tests.

**Keywords:** Bitumen, recycled polypropylene, gamma irradiation, modification.

## 1. GİRİŞ

Bitüm, ağırlıklı olarak alifatik, aromatik ve naftenik hidrokarbonları içeren, ham petrolün damıtılması yoluyla veya doğal olarak elde edilen bir malzemedir [1]. Mühendislik alanında, esnek üstyapı olarak inşa edilen karayollarında ve havaalanlarının kalkış pistlerinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan bitüm, termoplastik ve viskoelastik özelliktedir. Termoplastiklik, sıcaklık artışıyla birlikte malzemenin katı faz yapıdan viskoz sıvı davranışa geçmesini ifade ederken, viskoelastite bitümlü bağlayıcıda yük altında meydana gelen deformasyonun bir kısmının geri dönmesini (elastikiyet), buna karşın oluşan deformasyonun belli bir oranda kalıcı olacağını belirtmektedir. Bitümlü malzemelere ait bu iki özellik sıcak hava koşulları ve ağır taşıt trafiği altında esnek üstyapılarda tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonların oluşmasına neden olmaktadır [2,3,4]. Dolayısıyla, bitümün çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak, düşük ve yüksek sıcaklık performansının artırılması, bitüme elastikiyet özelliğinin kazandırılarak kalıcı deformasyonun azaltılması sağlanmaktadır. Bitüm içerisinde kullanılan katkı malzemelerinin başında polimer malzemeler gelmektedir. Yapılan çeşitli çalışmalarda polimerlerin bitüm içerisinde kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Stiren-butadien-stiren (SBS), etilen-vinil-asetat (EVA) ve Elvaloy® vb. polimerlerin katkı malzemesi olarak kullanılmasıyla esnek üstyapı üzerinde meydana gelen bozulmaların azaltıldığı tespit edilmiştir [5,6,7]. Polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinil klorür (PVC), polistiren (PS) ve etilen vinil asetat (EVA) gibi termoplastik malzemeler bitüm modifikasyonunda denenmiş ve normal servis sıcaklığında bitümün sertliğini ve viskozitesini arttırdıkları belirlenmiştir [8,9,10]. Yaşlandırılmış PP katkılı bitümler ile yapılan diğer bir çalışmada, PP katkısıyla bitümün uzun vadeli yaşlanma süresinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, aynı çalışmada, PP katkısı ile BSK'larda kalıcı deformasyon, yorulma ve çatlak oluşumlarının azaltılabileceği ifade edilmiştir [11].

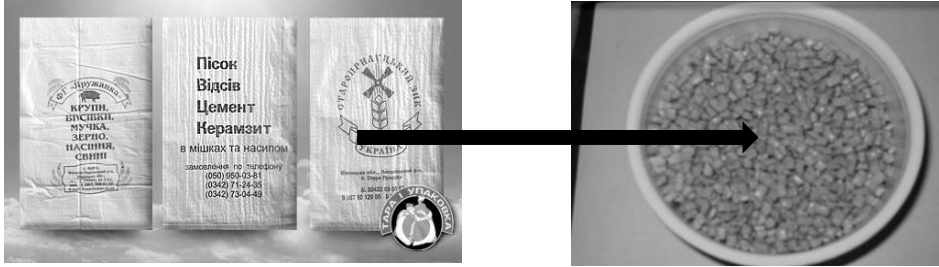
Ancak, uygulamada SBS, EVA gibi yaygın olarak kullanılan polimerler yol esnek üstyapısının inşasına önemli ek maliyetler getirmekte, ayrıca, polimer imalatındaki meydana gelen artış, çevresel sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle, çevresel faktörlerle birlikte düşük maliyete sahip atık ve gerideönüştürülmüş polimerlerin bitüm içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılması son yıllarda araştırmalara sıklıkla konu olmaktadır [12]. Ancak, gerideönüştürülmüş polimerler herhangi bir işlem görmeden bitüm içerisinde katkı malzemesi olarak kullanıldıklarında bitüm ile polimer arasında kimyasal bağ kurulamamaktadır [13]. Bu nedenle, çalışmada gerideönüştürülmüş polipropilenlere (PP<sub>R</sub>) gamma ışınması yöntemiyle yüzey aktifleştirilmesi işlemi yapılarak bu polimer üzerinde kimyasal bağ oluşturabilecek serbest radikaller elde edilmiş ve elde edilen gerideönüştürülmüş gamma yüzey aktivasyonlu polipropilen ( $\gamma$ -PP<sub>R</sub>) katkının bitüm içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği çeşitli kimyasal ve fiziksel yöntemlerle araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında gamma ışımaya tabi tutulan geri dönüştürülmüş atık polipropilenin ( $\gamma$ -PP<sub>R</sub>) yüzey aktivasyonu sonrası bağ yapısında meydana gelen değişim Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ile incelenmiştir.  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkıli bitümlerin morfolojisi ve bitüm ile  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> polimeri arasındaki etkileşim floresan mikroskopu yardımıyla incelenmiştir. Bu çalışmaların ardından geleneksel test yöntemleri sayesinde saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkıli bitümlerin penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, penetrasyon indeksi (PI) gibi fiziksel özellikleri tayin edilmiştir. Fiziksel test yöntemlerinin ardından bağlayıcılar ince film halinde ısıtma etüvü (RTFOT) ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyleri ile yaşlandırılmıştır. Ayrıca, saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkıli bitümlerin dönel viskozite (RV) cihazı yardımıyla viskoziteleri belirlenmiş, dinamik kayma reometresi (DSR) ve giriş eğme reometresi (BBR) cihazlarıyla PG sınıfları tespit edilmiş ve bu sayede  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının saf bitümün performansına olan etkisi incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Kullanılan Malzemeler

Çalışmada 160/220 penetrasyona sahip bitüm kullanılmıştır. Bu bitüme ait fiziksel özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Geri dönüştürülmüş atık polipropilen (PP<sub>R</sub>), Ukrayna’da bulunan Rokšana firmasından temin edilmiştir. Ürün, beyaz renkteki un çuvarlarının geri dönüştürülmesi ile elde edilmiştir. Geri dönüştürme işlemleri öncesi polimer malzemeler yıkanmakta, yüzey kurutma işlemlerinin ardından endüstriyel kullanıma uygun biçimde ufalanmakta ve granüller şeklinde elde edilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Geri dönüştürülmüş atık PP

Tablo 1. Bitümün fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	160-220
Penetrasyon (25 °C; 0.1mm)	ASTM D5	195,5
Yumuşama noktası ( °C)	ASTM D36	38,7
Düktilite (25 °C; cm)	ASTM D113	103
Penetrasyon indeksi ( PI )	-	-0,73
Özgül ağırlık (25 °C; gr/cm3)	ASTM D70	1,03

Granül şeklinde elde edilen PP<sub>R</sub> laboratuvar ortamında öğütülerek deneylerde kullanılmıştır. PP<sub>R</sub>'nin erime sıcaklığı 150-155°C aralığında, çekme dayanımı 30 MPa, özgül ağırlığı 0,88'dir. PP<sub>R</sub> polimeri asit, baz ve organik solventlere dayanıklıdır.

## **2.2. Gamma Işıması Yöntemi**

Bitüm ve PP<sub>R</sub> polimer malzeme arasında kimyasal bağların kurulması amacıyla PP<sub>R</sub> polimeri, gamma ışınları yöntemi ile radyasyona maruz bırakılmıştır. Gamma ışınları günümüzde besin işleme teknikleri, kanser tedavisi, sterilizasyon işlemleri gibi çok farklı alanlarda kullanılmaktadır [14]. Gamma ışınları, yüksek frekanslı elektromanyetik bir ışımadır. Atom çekirdeğinin, enerji seviyelerindeki farklılıkların elektromanyetik ışıma ile yayılması ile ortaya çıkmaktadır. Işıma yüksüz olduğu için elektrik ve elektromanyetik alanda sapma göstermezler. Gamma ışınları, nüfuz ettiği yüzey üzerindeki kimyasal bağ yapısını değiştirebilmektedir. Bu sayede, PP<sub>R</sub> polimer yüzeyinde serbest radikaller meydana gelmekte ve bitüm ile polimer arasında kimyasal bağların kurulması sağlanmaktadır. Çalışmada, elektron hızlandırıcıya sahip radyasyon kaynağıyla PP<sub>R</sub> polimerler 20 kGy doz gamma ışınlarına tabi tutulmuştur. Radyasyon işleminin ardından dozimetre cihazı yardımıyla uygulanan radyasyonun miktarı tekrar kontrol edilmiştir.

## **2.3. Numunelerin Hazırlanması**

Granül halinde olan  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> öğütücü makine kullanılarak öncelikle ufalanmış ve bu parçalar 0,6 mm elekten geçirilmiştir. 160-220 penetreye sahip bitüm 163°C'ye ayarlı etüv ile 90 dakika süreyle ısıtılarak tamamen sıvı hale getirilmiştir. Sıcaklık kayıpları en aza indirilerek karıştırıcıya konan bitüm dakikada 500 devir hızıyla karıştırılırken toz haline getirilen katkı malzemesi belli aralıklarla bitüme ağırlıkça %1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarında ilave edilmiştir. 15 dakika süren katkı ilave işleminin ardından karıştırıcı 500 dev/dak hızından 1300 dev/dak hıza yükseltirilerek elde edilen modifiye bitüm 45 dakika daha karıştırılmıştır. Çeşitli ışınlama yöntemleriyle  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> yüzeylerinde oluşturulan serbest radikallerin, iyonların ve fonksiyonel grupların bitüm ile kimyasal reaksiyona girmesini ve kuvvetli bağların oluşmasını sağlamak amacıyla karıştırıcıdan alınan modifiye bitüm 60 dakika süreyle 163°C sıcaklıktaki etüvde bekletilerek deneylerde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Çalışmada kullanılan saf ve modifiye bitümler aşağıda verilen şekilde kodlandırılmıştır;

Saf bitüm – “B”;

Saf bitüm + %1  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> – “B-1- $\gamma$ -PP<sub>R</sub>”;

Saf bitüm + %3  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> – “B-3- $\gamma$ -PP<sub>R</sub>”;

Saf bitüm + %5  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> – “B-5- $\gamma$ -PP<sub>R</sub>”;

Saf bitüm + %7  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> – “B-7- $\gamma$ -PP<sub>R</sub>”;

Saf bitüm + %9  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> – “B-9- $\gamma$ -PP<sub>R</sub>”;

### **3. DENEYSEL PROGRAM**

#### **3.1. Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)**

Kızılötesi spektroskopisi, organik bileşiklerin moleküler bağ karakterizasyonunun belirlenmesi amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemle katı, sıvı veya gaz halindeki organik bileşiklerin arasındaki bağların türü, özellikleri, bağlanma yerleri vb. saptanabilmektedir. Moleküller, kendilerine ait bir frekansta titreşmekte, cihaz tarafından gönderilen kızılötesi ışın, bu titreşim tarafından soğurulmaktadır. Soğurulmanın şekline göre bağ karakterizasyonuna dair bilgi edinilmektedir. Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisinde ışın şiddeti, zamanın fonksiyonu olarak ele alınmaktadır. [15,16]. Çalışmada, FT-IR spektroskopilerinin elde edilmesinde Bruker Tensor 27 DTGS cihazı kullanılmıştır. Gamma radyasyonunun, PP<sub>R</sub> üzerindeki etkisinin belirlenmesi için FT-IR spektroskopisi, gamma radyasyon işlemi öncesi ve sonrasında gerçekleştirilmiştir.

#### **3.2. Bitüm Morfolojisi**

Katkı malzemesi olarak kullanılan polimerin bitüm içerisinde dağılımının incelenmesi modifikasyonun hangi mertebede gerçekleştiğinin anlaşılması açısından önem arz etmektedir. Çalışmada  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> polimerin bitüm içerisindeki dağılımı, boyutlanması ve polimer bitüm fazının gözlemlenmesi floresan mikroskobu yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Floresan mikroskobu ile yapılan morfoloji çalışması 40W gücünde halojen lambalı ve 4x, 40 ve 100X yakınlaştırma özellikli mercekler ve BZ-01 özellikte lense sahip Leica marka mikroskop ile en fazla katkı miktarına sahip B-9- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> bağlayıcısı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yüzey görüntüleri kamera içi ve odak uzaklığı büyütme çarpanlarına bağlı olarak 200X büyütme oranında gerçekleştirilmiştir.

#### **3.3. Geleneksel Test Yöntemleri**

Çalışma kapsamında, hem orijinal hem de RTFOT cihazıyla yaşlandırılan bağlayıcılar üzerinde geleneksel test yöntemleri olarak da adlandırılan fiziksel deneyler yapılmıştır. Deney sonucunda,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının bitümün yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite ve yaşlandırma sonrası kütle kaybı değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri kullanılarak bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetini ifade eden penetrasyon indeksi (PI) değerleri her bağlayıcı türü için ayrı ayrı hesaplanmıştır [1].

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

Burada Pen<sub>25</sub>, 25 °C sıcaklıkta yapılan penetrasyon değerini, SP ise yumuşama noktası değerini göstermektedir.

### **3.4. Dönel İnce Film Haline Isıtma Etüvü Deneyi**

Saf ve modifiye katkılı bağlayıcıların depolaması, taşınması gibi servis öncesi süreçte meydana gelen (kısa vadeli) yaşlanma davranışının incelenmesi için dönel ince film halinde ısıtma etüvü (RTFOT) deneyi yapılmıştır. Deney ASTM D2872 standardında verilen prosedüre uygun şekilde yapılarak deney sonrasında meydana gelen kütle kaybı miktarı ölçülmüştür [17]. Ayrıca, RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler dinamik kayma reometresi (DSR) cihazında ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneylerinde de kullanılmıştır.

### **3.5. Basınçlı Yaşlandırma Kabı Deneyi**

PAV deneyi, kaplama servis ömrünün ilk 5–10 yılı boyunca bitümlü bağlayıcıda meydana gelen uzun süreli yaşlanmayı temsil etmektedir. Çalışma kapsamında, RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkılı bağlayıcılar ASTM D6521 standardına uygun olarak PAV cihazıyla uzun vadeli yaşlandırılmıştır [18]. Çalışmada PAV yaşlandırılmış bağlayıcılarla BBR deneyleri gerçekleştirilmiştir.

### **3.6. Dönel Viskozite Deneyi**

Dönel viskozite deneyi, bağlayıcının kıvamlılığının ölçülmesiyle sıcak karışım tesisinde ne derece işlenebilirlik ve pompalanabilirliğe sahip olduğunu tespiti ve bitümlü sıcak karışımların (BSK) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların viskozitesinin ölçüm yöntemi, ASTM D 4402 standardında açıklanmıştır. Viskozite deneyleri, genel olarak iki farklı sıcaklıkta (135 °C ve 165 °C) gerçekleştirilerek logaritmik viskozite-sıcaklık eğrileri elde edilmekte, bu eğriler sayesinde BSK için uygun karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları hesaplanmaktadır [19,20]. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının bulunmasında Microsoft Excel 2010 programı kullanılmış, bu programda bahsedilen viskozite-sıcaklık eğrileri çizilmiş ve program yardımıyla bulunan eğrilerin logaritmik denklemleri kullanılarak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında literatürde kullanılan sıcaklık değerlerine bağlı kalınarak, Brookfield DV-II+Pro Extra Dönel Viskozimetre cihazı yardımıyla 135 ve 165 °C’de iki ayrı viskozite deneyi saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> modifiye bitümlere uygulanmış, her bir bitümün viskozite değerleri, viskozite indeksleri, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları bulunmuştur.

### **3.7. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi**

DSR deneyi, kaplama ömrünün ilk dönemleri için yüksek servis sıcaklıklarında tekerlek izi oluşumuna karşı bağlayıcının direncini değerlendirmek amacıyla Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) tarafından geliştirilmiştir. Ayrıca, cihaz yardımıyla bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfları (PG-X) da belirlenmektedir. Performans sınıflarının tayin edilmesinde hem orijinal hem de RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. DSR deneyi ile bitümlü bağlayıcının viskoelastik özellikleri, uygulanan salınım (sinüsoidal) yüklemelere karşı bağlayıcı davranışının değerlendirilmesi sonucunda belirlenmektedir [21].

Çalışmada 1000 mikron (1 mm) kalınlıkta ve 25 mm çapında bağlayıcı numuneler üzerinde 52, 58, 64, 70, 76 ve 82°C sıcaklıkta DSR performans deneyleri yapılmıştır. Deneyler, orijinal numuneler için 120 Pa, yaşlandırılmış numuneler için 220 Pa gerilme uygulanarak 10 rad/sn frekansta, standartlara uygun bir biçimde gerçekleştirilmiştir [22]. Gerilme ve meydana gelen deformasyon arasındaki ilişki kullanılarak kompleks kayma modülü ( $G^*$ ), faz açısı ( $\delta$ ) ve tekerlek izi ( $G^*/\sin \delta$ ) değerleri hesaplanmakta, aynı zamanda bu değerler şartname sınırları ile kontrol edilmektedir. Şartname kriterlerine göre tekerlek izi değerinin orijinal numuneler için en az 1,0 kPa, yaşlandırılmış numuneler içinse 2,20 kPa olması gerekmektedir. Çalışma kapsamında DSR deneyleri Anton Paar SmartPave Plus Dinamik Kayma Reometresi cihazı yardımıyla yapılmıştır. Yazılım yardımıyla, yüksek sıcaklık PG sınıflarının tespit edilmesinin yanı sıra, bağlayıcının şartname limitlerini sağlayamadıkları (yenilme sıcaklıkları) sıcaklık değerleri de ayrıca hesaplanmıştır.

### 3.8. Kiriş Eğme Reometresi Deneyi

BBR deneyi, esnek üstyapıda oluşan düşük sıcaklık koşulları altında yüke bağlı olmayan, bağlayıcının sıcaklık büzülmesi davranışıyla meydana gelen termal çatlak oluşumunun tespit edilmesi için SHRP tarafından geliştirilmiştir. BBR deneyi, bağlayıcının düşük sıcaklık performans sınıfının belirlenmesinde (PG-Y) kullanılmaktadır. Deney, belirli bir sıcaklıkta ve sabit yük altında, bağlayıcının sünme veya defleksiyon gibi reolojik özelliklerinin ölçülmesine dayanmaktadır. Bu sayede kaplamanın esnek davranış gösterebileceği en düşük sıcaklık değeri belirlenebilmektedir BBR cihazı bilgisayar kontrollü olup, deney esnasında uygulanan 980 mN'luk yükün etkisiyle kiriş şeklindeki numunede meydana gelen defleksiyon, zamana bağlı olarak bilgisayar tarafından grafik halinde çizilir. Deney süresi olan 240 saniye sonunda deney yükü otomatik olarak kalkar ve yazılım tarafından altmışıncı saniyedeki sünme sertliği ve sünme oranı hesaplanmaktadır. Superpave şartnamesine göre sünme sertliğinin 300 MPa'dan az olması gerekirken, sünme oranı ( $m$ -değer) en az 0,3 olmalıdır [23].

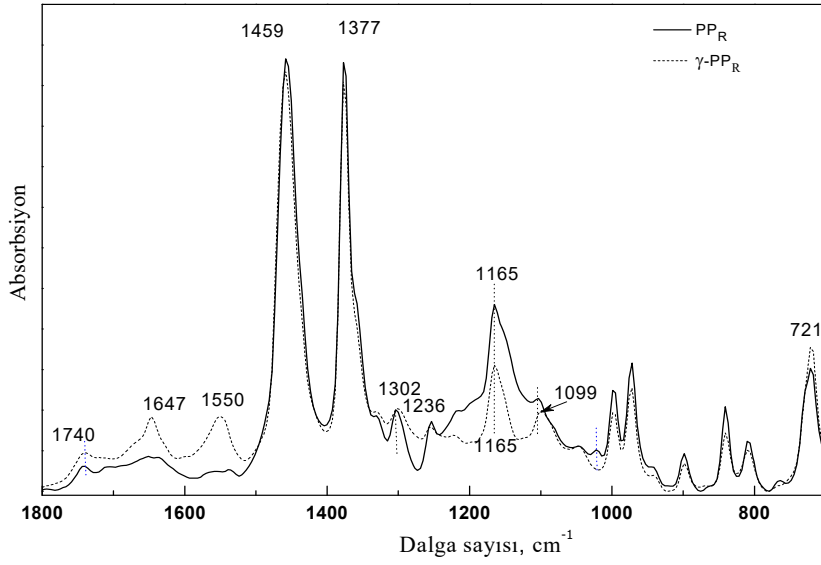
BBR deneyleri, ATS Kiriş Eğme Reometresi yardımıyla ASTM D6648-08 standartlarına uygun şekilde [24], PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılarak, -6, 12, 18 °C 'de (performans sınıfı olarak sırasıyla PG X-16, X-22, X-28'e denk gelen sıcaklık değerlerinde) gerçekleştirilmiştir. Şartname limitlerini sağlayan bağlayıcılar için yeniden BBR numuneleri hazırlanarak bir alt deney sıcaklığına geçilirken, şartname limitlerini sağlanmayan numuneler için deney sonlandırılmıştır. Aynı zamanda her bağlayıcının şartname limitlerini sağlayamadıkları sıcaklık değerleri (yenilme sıcaklıkları) hesaplanmıştır.

## 4. DENEY SONUÇLARI

### 4.1. FT-IR Spektroskopi Sonuçları

Gamma radyasyonu öncesi ve sonrasında  $PP_R$  polimeri üzerinde yapılan FT-IR spektroskopileri Şekil 2'de bir arada verilmiştir.  $\nu \approx 715$  cm<sup>-1</sup> bant seviyesinin başlangıç değeri olarak kullanıldığı FT-IR spektroskopisinde, radyasyon işlemi sonrası  $\nu \approx 721, 1165, 1302, 1377, 1459$  cm<sup>-1</sup> absorpsiyon piklerinde ve C=O bağının karakteristik titreşim bandı olan 1740 cm<sup>-1</sup> pikinde belirgin bir değişiklik meydana gelmemesine karşın,  $\nu \approx 1099$ ,

1550 ve 1647  $\text{cm}^{-1}$  noktalarında yeni piklerin ortaya çıktığı 1236  $\text{cm}^{-1}$  pikinde de düşüş meydana geldiği görülmektedir. Bu pik seviyelerinde gerçekleşen değişiklikler gamma ışınmasında kullanılan yüksek enerjinin makro-moleküler seviyede doymamış bağ zincirlerini kırarak serbest radikaller oluşturduğuna işaret etmektedir. Oluşan serbest radikaller kısa süre sonra C=C gibi çift bağlı yapılara dönüşebilmektedir. Bu sonuç, gamma ışınmasıyla  $\text{PP}_R$  polimeri üzerinde yapılan yüzey aktivasyon işleminin, polimerin kimyasal yapısını değiştirdiğini, bitüm ile bağ kurabilecek bir yapının oluştuğunu ifade etmektedir.



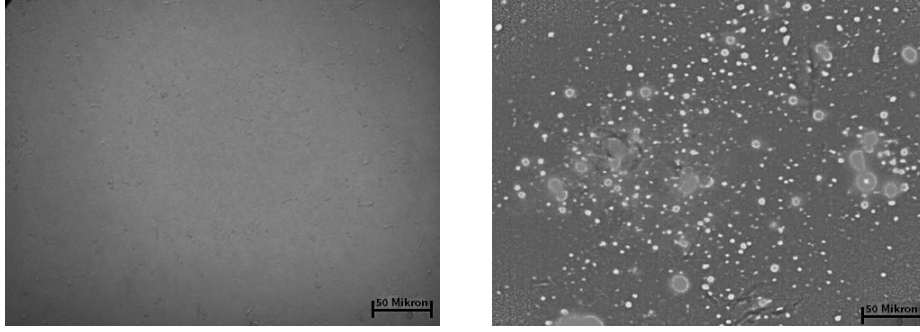
Şekil 2. Gamma radyasyonu öncesi ve sonrasında  $\text{PP}_R$ 'ye ait FT-IR spektroskopisi

#### 4.2. Morfolojik Çalışmalar

Floresan mikroskopu yardımıyla elde edilen saf ve B-9- $\gamma\text{-PP}_R$  katkılı bitümlerin 200X büyütmeye sahip yüzey görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Saf bitümün yüzey görüntüsü Şekil 3.a'da (solda), B-9- $\gamma\text{-PP}_R$  katkılı bitüm ise Şekil 3.b'de (sağda) görülmektedir. Şekillerde koyu fon bitümü, açık renkli parçacıklar ise  $\gamma\text{-PP}_R$  polimer katkısını göstermektedir. Yüzey görüntüleri incelendiğinde,  $\gamma\text{-PP}_R$  katkılı bitümün genellikle 10 mikron çapın altında küçük parçacıklardan oluşan bir yapıda olduğu belirlenmiştir. Polimer katkının ilave işlemlerinden önce 0,6 mm elekten elendiği göz önünde bulundurulduğunda, 0-0,6 mm boyut aralığındaki polimer parçacıkların bazılarının (nispeten küçük boyutlularının) bitüm içerisinde eridiği, bazılarının (nispeten büyük boyutlularının) ise ufak parçacıklar şeklinde bitüm içinde dağıldığı anlaşılmaktadır. Ancak, bu dağılımın literatürde ve uygulamalarda yoğun biçimde kullanılan SBS polimerinin, bitüm içerisindeki bazı bileşenleri soğurarak (absorbe ederek) şişmesi ve bunun sonucunda polimer katkılı bitümün iki ayrı faz biçiminde (baskın polimer fazı ve bitüm) davranmasından farklı olduğu gözlemlenmiştir [25]. Bununla birlikte,  $\gamma\text{-PP}_R$  polimerinin bitüm içerisinde parçacıklı



yapının olmasının dışında parçacıkların arasında eriyik hale bitüm ile karıştığı ve yeni bir bitüm polimer fazı oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, bitüm ile polimerlerin temas noktalarında çok ince şekilde polimerlerin etrafını saran üçüncü bir fazın varlığı tespit edilmiştir. Bu üçüncü fazın, gamma radyasyonu ile polimer üzerinde oluşturulan ve FT-IR spektroskopisi ile tespit edilen serbest radikallerin bitüm ile polimer arasında kimyasal etkileşim meydana getirmesiyle ortaya çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 3.a ve 3.b. Saf ve B-9- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> bağlayıcıların floresan mikroskop görüntüleri (büyütme oranı 200X)

#### 4.3. Orijinal ve Yaşlandırılmış Bağlayıcıların Geleneksel Deneysel Sonuçları

Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkıli bitümlere ait geleneksel deney sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 2’de, bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri kullanılarak hesaplanan ve bağlayıcının ısı hassasiyetini gösteren penetrasyon indeksi, kısa vadeli yaşlanma etkilerinin gözlemlenmesi amacıyla hesaplanan kütle kaybı değeri, yumuşama noktası değişimi ve kalan penetrasyon değerleri de bulunmaktadır.

Orijinal bağlayıcılara ait penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları incelendiğinde  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının artmasıyla birlikte sürekli olarak penetrasyon değerlerinin azaldığı bununla birlikte yumuşama noktası değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bitüm kıvamlılığının tayininde kullanılan bu iki deneyden elde edilen veriler, bağlayıcının  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısıyla birlikte sertleştiğini göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, bağlayıcı  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> polimer katkısıyla daha rijit hale gelmektedir. Meydana gelen sertleşme, yüksek sıcaklık koşulları altında bağlayıcıların bozulmalara karşı daha dirençli olacağını göstermektedir. Katkı oranının artmasıyla birlikte bağlayıcının penetrasyon indeksinin arttığı, dolayısıyla bağlayıcıların  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısıyla ısıya daha az duyarlı hale geldiği belirlenmiştir. Bu sonuç,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının, bitümün daha geniş bir sıcaklık aralığında kullanılmasını sağladığını göstermektedir. Düktilite sonuçlarına göre,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının bitüm içerisindeki kullanım miktarının artmasıyla bitümün kopmadan uzama yeteneğinin azaldığı tespit edilmiştir.

Yapılan RTFO deneyiyle bağlayıcılarda meydana gelen kütle kaybı değerlerinin  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının artmasıyla birlikte azaldığı gözlemlenmiştir. Yüzey görüntülerinde tespit edilen

## Gerideönüştürülmüş Atık Polipropilenin Bitümlü Bağlayıcılarda Kullanılması

bitüm-polimer fazının ağısı bir yapı oluşturarak bitümün yapısındaki aromatiklerin buharlaşmasının engellenmesiyle birlikte kütle kaybı miktarlarının azaldığı düşünülmektedir. Yaşlandırma sonrası yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri incelendiğinde, saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkıli bağlayıcıların kalan penetrasyon değerlerinin bağlayıcılardan beklenen değerlerin (yaşlanma sonrası en az %40 oranında penetrasyon değerinin kalması) üzerinde olduğu görülmektedir. Bezer şekilde, yumuşama noktası değerlerinde de genel olarak yaşlandırma sonrası 2-7 °C aralığında hafif artışların olduğu tespit edilmiştir. Bu iki sonuç,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> bağlayıcılarda kısa vadeli yaşlandırma sonrasında aşırı sertleşmelerin meydana gelmediğini ortaya koymaktadır [26].

Tablo 2. Saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkıli bağlayıcıların fiziksel deney sonuçları

Özellikler	Bağlayıcı türü					
	B	1- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	3- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	5- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	7- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	9- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>
Penetrasyon (0.1mm)	195,5	169,2	111,2	101,7	76,2	70,8
Yumuşama Noktası (°C)	38,7	40,2	42,0	45,0	53,0	55,3
Düktilite (cm)	103	82	80	75	74	68
Penetrasyon indeksi (PI)	-0,73	-0,69	-1,50	-0,77	0,61	0,92
Yaşlanma sonrası						
Kütle Değişimi (%)	0,76	0,71	0,66	0,55	0,52	0,49
Penetrasyon (0.1mm)	102	122	71,4	66,4	40,2	42,1
Kalan Penetrasyon (0.1mm) (%)	52,0	72,0	64,2	65,3	52,8	76,1
Yumuşama Noktası (°C)	41,5	44,0	48,2	48,3	53,0	59,5
Yumuşama Noktasındaki Değişim (°C)	-2,8	-3,8	-6,2	-3,3	0,0	-4,2

### 4.4. Dönel Viskozite Deney Sonuçları

135°C ve 165 °C'de gerçekleştirilen, dönel viskozite deney sonuçlarından elde edilen viskozite değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Buna göre, her iki sıcaklık değerinde de, katkı miktarının artmasıyla birlikte bağlayıcıların viskozite değerlerinin sürekli olarak arttığı görülmektedir. Viskozite değerlerindeki artış, bağlayıcının  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> polimer katkısıyla daha kıvamlı hale geldiğini gösterirken aynı zamanda bu sonuç, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleriyle tespit edilen  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının sertleştirme etkisini doğrular niteliktedir.

Tablo 3'de ayrıca, viskozite değerleri yardımıyla hesaplanan 135°C ve 165°C'deki viskozite indisleri ve bu bağlayıcılarla hazırlanacak olan bitümlü sıcak karışımların (BSK) tavsiye edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da verilmiştir. Katkı miktarının artmasıyla birlikte viskozite değerlerinde meydana gelen artışlar vizkozite indislerini de etkilemektedir. Buna göre, B-9- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> bağlayıcının viskozitesi, saf bitüme göre 135°C'de

3.07, 165°C’de ise 2.94 kat daha büyüktür. Saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkıli bağlayıcılarla hazırlanacak BSK’ların karıştırma ve sıcaklıklarının katkı oranının artmasıyla birlikte arttığı tespit edilmiştir. Buna göre,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkıli bağlayıcılarla hazırlanacak BSK’ların yaklaşık olarak karıştırma sıcaklığı 170 °C’yi, sıkıştırma sıcaklığı ise 155 °C’yi aşmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 3. Saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkıli bağlayıcıların dönel viskozite deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifye}} / \eta_{\text{saf}}$		Sıcaklık Aralıkları (°C)	
	135°C	165°C	135°C	165°C	Karıştırma	Sıkıştırma
B	202.5	65.5	1	1	135-142	122-128
B-1- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	282.5	85	1.40	1.30	149-153	139-143
B-3- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	432.5	105	2.14	1.60	154-159	143-148
B-5- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	455	95	2.25	1.45	157-168	150-153
B-7- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	475	120	2.35	1.83	164-168	157-161
B-9- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	622	192.5	3.07	2.94	167-171	151-154

#### 4.5. Dinamik Kayma Reometresi Deney (DSR) Sonuçları

Saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkıli bitümlerin yüksek sıcaklık PG sınıfları (PG-X) DSR cihazı yardımıyla tespit edilmiş, bu değerler Tablo 4’de, bitümlü bağlayıcılara ilişkin diğer kompleks kayma modülü ( $G^*$ ), faz açısı ( $\delta$ ) ve tekerlek izi ( $G^*/\sin\delta$ ) parametreleri ile bir arada verilmiştir.  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkı miktarının artmasıyla birlikte aynı sıcaklıktaki  $G^*$  ve  $G^*/\sin\delta$  değerlerinin arttığı, dolayısıyla bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıflarının yükseldiği görülmektedir. Buna göre, B-1- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> ve B-3- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> bağlayıcılarının PG sınıfı saf bitümün PG 52-Y’den bir üst sınıf olan PG 58-Y olarak tespit edilmiştir. Katkı miktarının artmasıyla birlikte yüksek sıcaklık PG sınıfları da artmaktadır. Buna göre, B-5- $\gamma$ -PP<sub>R</sub>, B-7- $\gamma$ -PP<sub>R</sub>, B-9- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> bağlayıcılarının performans sınıfları sırasıyla PG 64-Y, PG 70-Y PG 82-Y olarak bulunmuştur. Bu sonuç, bitümün  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısıyla birlikte yüksek sıcaklık bölgelerinde kullanım aralığının arttığını ortaya koymaktadır. Yüksek sıcaklık PG sınıflarından elde edilen sonuca göre, saf bitümün, 52 °C kaplama sıcaklığında kalıcı deformasyona (tekerlek izine) karşı gösterdiği direncin eşdeğerini B-9- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> bağlayıcısı 82 °C’de göstermektedir.

Faz açısı ( $\delta$ ), bitümün kesme kuvvetine karşı gösterdiği viskoelastik davranışı ifade etmekte ve bu davranışın zamana bağlı olarak değişimi de hesaplamaya katıldığı için çoğu kez kompleks kayma modülünden daha hassas bir parametre olarak kabul görmektedir [5].  $\delta$  değerlerin 90°’ye ulaşması bağlayıcının tam viskoz davranış gösterdiğini ifade ederken,  $\delta$  değerinin düşük olması, bağlayıcıda yük altında meydana gelecek deformasyonun elastik bileşenin olduğunu, diğer bir ifadeyle deformasyonun bir kısmının geri döneceğini belirtmektedir. Saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkıli bağlayıcıların  $\delta$  değerleri incelendiğinde, saf bitümün 58°C’de  $\delta$  değerinin 88,2°’ye ulaştığı, bağlayıcının bu sıcaklık noktasında neredeyse tam viskoz deformasyona uğradığını göstermektedir.

Geri Dönüştürülmüş Atık Polipropilenin Bitümlü Bağlayıcılarda Kullanılması

Tablo 4. Saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkılı bitümlerin dinamik kayma reometresi deney sonuçları

Bağlayıcı		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	$\delta$ (°)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Limit Değerler (kPa)	Sınıf
B	Orijinal	46	4.64	86.6	4.65	≥1.00	PG 52-Y
		52	1.85	87.4	1.85		
		58	0.766	88.2	0.767		
	Yaşlandırılmış	52	3.06	87.1	3.07	≥2.20	
		58	1.39	87.2	1.39		
		58	3.16	85.2	3.17		
B-1- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	Orijinal	58	1.09	85.9	1.09	≥1.00	PG 58-Y
		64	0.673	86.7	0.67		
		64	1.19	86.2	1.19		
	Yaşlandırılmış	52	4.61	84.4	4.63	≥2.2	
		58	2.25	85.9	2.26		
		64	1.19	86.2	1.19		
B-3- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	Orijinal	52	4.94	80.7	5.01	≥1.00	PG 58-Y
		58	2.38	81.8	2.40		
		64	1.24	81.6	1.25		
		70	0.705	80.7	0.71		
	Yaşlandırılmış	52	8.64	82.6	8.71	≥2.20	
		58	3.73	84.4	3.75		
B-5- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	Orijinal	52	5.80	83.2	5.84	≥1.00	PG 64-Y
		58	2.76	84.1	2.77		
		64	1.41	83.0	1.42		
		70	0.801	81.5	0.81		
	Yaşlandırılmış	52	14.0	80.2	14.21	≥2.20	
		58	6.23	81.6	6.30		
B-7- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	Orijinal	64	2.98	82.0	3.01	≥1.00	PG 70-Y
		70	1.58	80.8	1.60		
		52	7.63	83.8	7.67		
		58	3.42	84.3	3.44		
		64	1.69	84.4	1.70		
	76	0.717	83.1	0.72			
Yaşlandırılmış	52	30.7	69.1	32.86	≥2.20		
	58	15.2	66.9	16.52			
	64	8.61	62.3	9.72			
	70	5.69	57.4	6.75			
	76	4.15	53.9	5.14			
B-9- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	Orijinal	82	3.08	53.8	3.82	≥1.00	PG 82-Y
		52	16.3	73.8	16.97		
		58	9.18	72.5	9.63		
		64	5.97	70.2	6.35		
		70	4.18	68.2	4.50		
	76	3.02	65.9	3.31			
Yaşlandırılmış	82	2.45	65.3	2.70	≥2.20		
	52	45.7	67.9	49.32			
	58	22.6	64.9	24.96			
	64	13.2	59.0	15.40			
	70	8.79	53.9	10.88			
76	6.45	51.4	8.25				
82	5.29	50.8	6.83				

Ancak,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının bitüm içerisinde kullanım oranının artmasıyla birlikte, genel olarak  $\delta$  değerlerinin de düştüğü dolayısıyla bağlayıcının daha yüksek sıcaklık mertebelerinde dahi daha elastik bir yapıda olduğu görülmektedir. Sonuç olarak,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının bitümün yüksek sıcaklık bölgesinde kullanım aralığını arttırdığı, kalıcı deformasyonu önemli ölçüde azalttığı ve bitümün elastik yapısını artırıcı etkisinin olduğu ortaya konmuştur.

#### 4.6. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

BBR deneyi sonucunda elde edilen bağlayıcıların sünme sertliği ve sünme oranı ( $m$ -değer) parametreleri Tablo 5’de verilmiştir. Tablo 5’de ayrıca, bu parametreler ile hesaplanan bağlayıcıların düşük sıcaklık performans sınıfları da bulunmaktadır. Üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilen BBR deney sonuçlarına göre,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının bitüm içerisindeki kullanım oranının artmasıyla birlikte sünme sertliğinin arttığı görülmektedir. Bu sonuç, penetrasyon ve yumuşama noktası ve RV deneylerinde gözlemlenen  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısıyla meydana gelen sertleşme davranışını doğrulamaktadır. Ancak, BBR deneyinde tespit edilen sünme sertliğindeki artışların çok yüksek mertebelerde olmadığı, şartname limiti olan 300 MPa’yı geçmediği görülmektedir. Tablo 5’de verilen bağlayıcılara ait  $m$ -değerleri incelendiğinde genel olarak katkı miktarının artmasıyla birlikte bu parametrenin azaldığı,  $m$ -değerlerinde meydana gelen bu azalmaların düşük sıcaklık PG sınıflarını da etkilediği ayrıca görülmektedir. Buna göre, saf bağlayıcının düşük sıcaklık performans sınıfı olan PG X-22, B-5- $\gamma$ -PP<sub>R</sub>, B-7- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> ve B-9- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> bağlayıcıları için bir sınıf azalmış ve PG X-16 olarak belirlenmiştir.

Tablo 5. Saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkılı bitümlerin kiriş eğme reometresi sonuçları

Bağlayıcı Türü	Sünme Sertliği (MPa)			$m$ -değer			Düşük Sıcaklık PG Sınıfı
	-16 °C	-22 °C	-28 °C	-16 °C	-22 °C	-28 °C	
B	42,13	99,50	199,05	0,479	0,432	0,432	PG X-22
B-1- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	81,65	156,76	223,77	0,333	0,322	0,322	PG X-22
B-3- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	79,34	159,29	235,10	0,338	0,308	0,308	PG X-22
B-5- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	88,26	181,45	-	0,326	0,297	0,297	PG X-16
B-7- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	96,59	175,53	-	0,314	0,294	0,294	PG X-16
B-9- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	110,17	189,56	-	0,309	-	-	PG X-16

#### 4.7. Bağlayıcıların Yüksek ve Düşük Sıcaklık Performanslarının Değerlendirilmesi

DSR deneyleriyle %1 gibi düşük modifikasyon seviyelerinden itibaren (B-1- $\gamma$ -PP<sub>R</sub>) bağlayıcı içerisindeki katkı oranının artmasıyla birlikte yüksek sıcaklık PG sınıflarında belirgin artışların meydana geldiği, bununla birlikte BBR deney sonuçlarına göre B-5- $\gamma$ -PP<sub>R</sub>, B-7- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> ve B-9- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> (yüksek katkı oranlarında) bağlayıcıların düşük sıcaklık PG

sınıflarında, bir sınıf azalma olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının bitüm üzerindeki etkisinin daha detaylı olarak incelenmesi için, her bağlayıcının ayrı ayrı şartname limitlerine yenildikleri yüksek ve düşük sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Tablo 6'da, saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkılı bağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklık yenilme sıcaklık noktaları, yüksek ve düşük sıcaklık değişimleri ve bağlayıcıların performans sınıfları bir arada verilmiştir. Buna göre, yüksek sıcaklık değişiminin değerlerinde meydana gelen artışların düşük sıcaklık değerlerindeki azalmaların çok üzerinde olduğu görülmektedir. Örneğin B-7- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> bağlayıcının yüksek sıcaklığı değişimi saf bitüme göre 19,0 °C iken düşük sıcaklıkta meydana gelen azalma 7,58 °C'dir. Bu sonuç, B-7- $\gamma$ -PP<sub>R</sub> bağlayıcının saf bitüme göre yaklaşık 12 °C daha geniş aralıkta kullanılabilmesi anlamına gelmektedir. Performans değerleri bir arada değerlendirildiğinde,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısıyla birlikte bağlayıcının kullanım alanlarının, yüksek sıcaklık bölgeleri için daha uygun hale geldiği, çok soğuk iklimli bölgeler için bağlayıcının kullanımının sınır olduğu, genel olarak  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkılı bitümlerin sıcaklık değişiminin çok fazla olduğu bölgelerde kullanılabileceği düşünülmektedir.

*Tablo 6. Saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkılı bağlayıcılara ait performans değerleri*

Bağlayıcı Türü	Yüksek Sıcaklık Yenilme Noktası (°C)	Düşük Sıcaklık Yenilme Noktası (°C)	Yüksek Sıcaklık Değişimi (°C)	Düşük Sıcaklık Değişimi (°C)	Performans Sınıfı (PG)
B	54,3	-27,78	-	-	PG 52-28
B-1- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	59,7	-25,22	5,4	-2,56	PG 58-22
B-3- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	62,8	-23,65	8,5	-4,13	PG 58-22
B-5- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	65,5	-21,38	11,2	-6,4	PG 64-16
B-7- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	73,3	-20,20	19,0	-7,58	PG 70-16
B-9- $\gamma$ -PP <sub>R</sub>	82	-18,57	27,7	-9,21	PG 82-16

## 5. SONUÇLAR

Saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkılı bağlayıcılar üzerinde gerçekleştirilen kimyasal ve fiziksel deney programıyla  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkılı bağlayıcıların bitüm içerisinde kullanılabilirliği incelenmiştir. Normal şartlarda bitümle kimyasal etkileşime girmeyen atık PP'nin yüzeyinde, çalışma kapsamında gerçekleştirilen gamma ışıması işlemi sonrasında bitümle bağ kurabilecek serbest radikallerin oluştuğu tespit edilmiştir. Bitüm ile  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> arasındaki bu kimyasal etkileşim floresan ışıklı optik mikroskop yardımıyla incelenmiş, elde edilen yüzey görüntüsünde  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının bitüm içerisinde iyi dağılım gösterdiği ve bitümle etkileşim içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

Geleneksel test yöntemleri sonucunda  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının bitümlü bağlayıcının rijitliğini arttırırken ısı hassasiyetini ve duktilitesini azalttığı belirlenmiştir. Isı hassasiyetinde

meydana gelen azalma, bağlayıcının sıcaklık koşullarından daha az etkileneceği anlamına gelmektedir. RTFOT cihazıyla yapılan yaşlandırma işlemi sonrasında saf ve  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkılı bağlayıcı türlerinde aşırı sertleşmelerin meydana gelmediği, ayrıca,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının yaşlanma etkilerini azalttığı ortaya konmuştur.

RV deney sonuçlarına göre, bitümün  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> modifikasyonu ile viskozite değerleri katkı miktarının artmasıyla birlikte sürekli olarak arttığı tespit edilmiştir. Yüksek modifikasyon seviyelerinde viskozite değerleri saf bitümün 3 katı seviyesine ulaşmaktadır.

DSR ve BBR cihazlarıyla gerçekleştirilen performans testlerinden elde edilen verilere göre,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının artmasıyla birlikte bağlayıcıların yüksek sıcaklık PG sınıflarının önemli derecede arttığı, buna karşın düşük sıcaklık sınıflarının ise yüksek modifikasyon seviyelerinde azaldığı tespit edilmiştir. Ancak, genel olarak hem düşük hem yüksek  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> modifikasyonlu bağlayıcının kullanım sıcaklık aralığının saf bitüme göre genişlediği görülmektedir.

Bu sonuç,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının, hem yüksek sıcak bölgelerinde (tekerlek izi bozulmalarına karşı), hem de yıl içinde sıcaklık farkının yüksek olduğu bölgelerde kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlara göre,  $\gamma$ -PP<sub>R</sub> katkısının yüksek penetrasyonlu bitümlerle kullanılmasının daha uygun olduğu, bu bitümlerin rijitliğinin artırılmasıyla sıcak hava koşullarına uygun hale geleceği düşünülmektedir.

### **Teşekkür**

Bu çalışma, Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü (İzmir Türkiye) ve Ukrayna Ulusal Bilimler Akademisi (NASU, Kiev, Ukrayna) kurumlarının beraber yürütmekte oldukları ve TÜBİTAK tarafından desteklenen 110M400 Nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

### **Kaynaklar**

- [1] Read, J., ve Whiteoak, D., The Shell Bitumen Handbook (5th ed). Thomas Telford, London, UK., 2003.
- [2] Gershkoff, D. R., Carswell, J., Nicholls, J. C., Rheological Properties of Polymer-Modified Binders for Use in Rolled Asphalt Wearing Course. Crowthorne: Transport Research Laboratory, Thomas Telford, London, UK., 1999.
- [3] Isacson, U., Lu, X. H., Laboratory Investigation of Polymer Modified Bitumens", Journal of the Association of Asphalt Paving Technology, Cilt 68, 35-63, 1999.
- [4] Perez-Lepe, A., Martinez-Boza, F. J., Gallegos, C., Gonzalez, O., Munoz, M. E., ve Santamaria, A., Influence of the Processing Conditions on the Rheological Behaviour of Polymer-modified Bitumen, Fuel, Cilt 82, No 11, 1339-1348, 2003.
- [5] Airey, G. D., Rheological Evaluation of Ethylene Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens, Construction and Building Materials, Cilt 16 No 8, 473-487, 2002.

- [6] Lu, X., Isacson, U., Rheological Characterization of Styrene-Butadiene-Styrene Copolymer Modified Bitumens, *Construction and Building Materials*, Cilt 11, No 1, 23-32, 1997.
- [7] 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*, Cilt 38, Ocak, 285-29, 2013.
- [8] Nekhoroshev V.P., Nekhorosheva A.V., Popov E.A., Gossen L.P., Influence of the Products of Chemical Modification of Atactic Polypropylene on Properties of Bitumen Binders, *Russ. J. Appl. Chem.*, 74(8), 1368-1373, 2001,.
- [9] Morrison G.R., Lee J.K., Hesp S.A.M., Chlorinated Polyolefins for Asphalt Binder Modification, *Applied Polymer Science*, 54, 231-240, 1994.
- [10] Yousefi A.A., Polyethylene Dispersions in Bitumen: The Effects of the Polymer Structural Parameters, *Applied Polymer Science*, 90, 3183-3190, 2003.
- [11] Ai A., Yi-Qiu T., Long-Term Aging of Polypropylene Asphalt Paving Mixtures 26th Annual Southern African Transport Conference, 7, 761-767, 2007.
- [12] Garcia-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martinez-Boza, F., Mackley, M. R., ve Gallegos, C., The Rheology of Recycled EVA/LDPE Modified Bitumen, *Rheologica Acta*, Cilt 43, No 5, 482-490, 2004.
- [13] Gad, Y. H., Magida, M. M. ve El-Nahas, H. H., Effect of Ionizing Irradiation on the Thermal Blend of Waste Low Density Polyethylene/Ethylene Vinyl Acetate/Bitumen for Some Industrial Applications, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Cilt 16 No 6, 1019-1024, 2010.
- [14] Fintzou, A. T., Kontominas M.G., Badeka, A.V., Stahl M. R, Riganakos K. A, Effect Of Electron-Beam And Gamma-Irradiation on Physicochemical And Mechanical Properties of Polypropylene Syringes as a Function of Irradiation Dose: Study Under Vacuum, *Radiation Physics and Chemistry*, Cilt 76 No 7, 1147-1155, 2007.
- [15] Craver, C.,D., *Desk Book of Infrared Spectra*, Coblentz Society, Kirkwood, Mo., 1977.
- [16] Colthup N.B., Daly L.H., Wiberley S.G., *Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy*, 2<sup>nd</sup> ed., Academic Press, New York, 1975.
- [17] ASTM D2872-12e1 Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)
- [18] ASTM D6521-08 Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)
- [19] Bahia, H.U., Anderson, D.A., Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters: Background and Comparison with Conventional Properties, *Transportation Research Record*, 1488, TRB, National Research Council, Washington DC, 1995.



- [20] Zaniwski, J.P., Pumphrey, M.E., Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, Asphalt Technology Program, West Virginia University, Morgantown, 2004.
- [21] McGennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U., Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington, USA 1994.
- [22] ASTM D7175-08 Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.
- [23] Kennedy T.W., Huber G.A., Harrigan E.T., Cominsky R.J., Hughes C.S., Quintus H.V. and Moulthrop J.S., Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410, National Research Council, Washington DC, USA., 1994.
- [24] ASTM D6648-08 Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)
- [25] Sengoz, B., Giray I., Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods, Journal of Hazardous Materials 150.2, 424-432, 2008.
- [26] Güngör, A. G., Sağlık, A., Orhan, F., Öztürk, E. A., Polimer Modifiye Bitümlerin Superpave Performans Sınıflarının Belirlenmesi, 5.Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 2009.

