

ÖĞÜTÜLMÜŞ ARAÇ LASTİĞİNİN VE PİROLİZ İŞLEMİNDEN SONRA OLUŞAN KARBON SİYAHININ BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

*Taner ALATAŞ **
*Mehmet YILMAZ **
*Baha Vural KÖK **
*Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU **
*Mustafa AKPOLAT **
*Özge ERDOĞAN YAMAÇ **
*Erkut YALÇIN **

Alınma: 08.08.2017; düzeltme: 28.12.2017; kabul:26.03.2018

Öz: Bu çalışmada iki farklı boyutta (No.40 elek üstü ve altı) öğütülmüş araç lastiği (CR) ve öğütülmüş araç lastiğinin pirolizinden elde edilen karbon siyahı bitüm modifikasyonunda 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) kullanılmıştır. Saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetinin göstergesi olan penetrasyon indeksi (PI) değerleri belirlenmiştir. Penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyleri sonucunda bitüm modifikasyonunda kullanılan CR miktarı arttıkça penetrasyon değerlerinin düzenli olarak azaldığı, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin düzenli olarak arttığı belirlenmiştir. Bu durum CR kullanımının bitümün rijitliğini artırdığını göstermektedir. CR boyutu değerlendirildiğinde malzeme boyutunun bu üç deney üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. PI değerlerinden saf bitümlü bağlayıcıya kıyasla No.40 elek altı %5 CR kullanılan modifiye bitüm dışındaki tüm modifiye bitümlerin sıcaklığa karşı hassasiyetinin daha az olduğu belirlenmiştir. DSR deneyleri sonucunda CR içeriği arttıkça bağlayıcıların tekerlek izine karşı dayanım parametrelerinin ve elastikiyetlerinin arttığı belirlenmiştir. Öğütülmüş CR'nin pirolize tabi tutulmasından elde edilen karbon siyahının bitüm modifikasyonunda kullanılması CR'nin etkinliğini azaltmış özellikle No.40 altı boyuttaki CR'nin karbon siyahı saf bitümün özelliklerini iyileştirme özelliği göstermemiştir.

Anahtar Kelimeler: Öğütülmüş araç lastiği, Piroliz, Karbon siyahı, Bitüm, Modifikasyon

Effects of Crumb Rubber and Carbon Black Obtained from Pyrolysis of Crumb Rubber on the Rheological Properties of Bituminous Binders

Abstract: In this study, two different sizes (smaller and larger sizes of No.40 sieve) of crumb rubber (CR) and the carbon black, which was acquired as a result of the pyrolysis of crumb rubber, were employed in the bitumen modification with 3 different rates (5%, 10% and 15%). Penetration, softening point, rotational viscometer and dynamic shear rheometer (DSR) tests were carried out on both pure and modified binders. Additionally, penetration index (PI) values, which is an indicator of binders against thermal sensitivity, were determined. As a result of penetration, softening point and viscosity tests, it was observed that with the increase of CR used in the bitumen modification, the penetration values decreased,

* Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ
İletişim Yazarı: Taner ALATAŞ (talatas@firat.edu.tr)

and softening points and viscosity values increased regularly. This condition indicates that the stiffness of the bitumen increases with CR utilization. In the evaluation of the sizes of CR, it was determined that the sizes of the materials had no considerable effect on these three tests. In the PI values, it was concluded that thermal sensitivities were lower compared to pure bitumen, except in the 5% CR with smaller sizes of No.40. As a result of the DSR test, it was concluded that with the increase of CR content, the parameters of binders in the resistance against rutting and their elasticity were increased. The utilization of carbon blacks, which obtained from the pyrolysis of CR, in the bitumen modification reduced the effectiveness of CR and especially the carbon black from smaller sizes of No.40 CR demonstrated no improvement in the properties of pure bitumen.

Keywords: Crumb rubber, Pyrolysis, Carbon Black, Bitumen, Modification

1. GİRİŞ

Bitüm fiyatlarının yüksekliği ile bakım ve onarım maliyetleri, yüksek kaliteli esnek üstyapı üretimini zorunlu hale getirmektedir (Cooper, 2008). Bu durum, araştırmacıları malzeme fiyatlarını azaltacak ve en yüksek faydayı sağlayacak çözüm yöntemleri geliştirmeye yönlendirmektedir. Malzeme özelliklerini iyileştirecek ilave katkıları kullanmak ilk yapım maliyetini arttırmasına rağmen, üstyapının servis ömrü boyunca harcanan toplam maliyet dikkate alındığında ekonomik açıdan fayda sağlamaktadır (Kök ve diğ., 2015).

Karayolu üstyapılarında kullanılan katkılar doğrudan plentte karışıma ilave edilebildiği gibi bitüme de ilave edilebilmektedir (Ilıcalı, 2001). Malzemenin homojenliği ve üretilen ürünün özelliklerinin tespit edilebilirliğinin kolaylığı açısından bitümün modifiye edilmesi daha sık kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde en sık kullanılan malzemeler polimerlerdir (Isacsson ve Lu, 1995). Yapılan çeşitli çalışmalarda bitüm modifikasyonunda polimer kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların (BSK) kalıcı deformasyona, düşük sıcaklık çatlaklarına, nem hasarına ve yorulma çatlaklarına karşı dayanımlarının önemli oranda arttığı belirlenmiştir (Cong ve diğ., 2017; Topal, 2010; Vlachovicova ve diğ., 2007; Hao ve diğ., 2017; Tığdemir ve Kalyoncuoğlu, 2017; Hamed, 2017).

Yük ve yolcu taşımacılığının yaklaşık %90 oranında karayolu ile yapıldığı ülkemizde, milyonlarca atık lastik oluşmaktadır (Çolak, 2010). Ömrünü tamamlamış lastikler yakılmakta, çöplüklere bırakılmakta, bariyer, taban malzemesi ve granül olarak kullanılmaktadır (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011). Atık lastikler yaklaşık olarak %70 oranında kauçuk içermektedir. Kauçuk, bitüm katkı maddesi olarak kullanıldığında özellikle kalıcı deformasyona karşı dayanım açısından fayda sağlamaktadır. Bu nedenle pahalı katkı maddelerini kullanmak yerine atık bir malzeme olan atık lastik kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Yapılan çeşitli çalışmalarda atık lastiğin BSK'ların kalıcı deformasyona, yorulma çatlaklarına ve nem hasarına karşı dayanımı önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir (Gibreil ve Feng, 2017; Wayne ve Magdy, 2006; Arabani ve diğ., 2010; Silvrano ve diğ., 2005).

Atık malzemelerden ticari değeri olan ürünler elde etmek için kullanılan bir yöntem olan pirolizde, oksijensiz ortamda malzemelerin kimyasal yapısı değiştirilmektedir. Sonuçta sıvı ürün olarak yakıt olarak kullanılabilen pirolitik yağ, katı ürün olarak ise karbon siyahı oluşmaktadır (Milli Eğitim Bakanlığı, 2011). Böylece atık lastikten ekonomik değeri çok yüksek olan pirolitik yağ elde edilmektedir.

Bu çalışmada hem öğütülmüş araç lastiği (CR) hem de CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahı bitümlü bağlayıcılarla katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Böylece hem atık lastiğin hem de atık lastiğin kimyasal işlem görmesinden sonra oluşan karbon siyahının bitümün fiziksel özellikleri ve reolojisine etkisi değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada saf bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen PG 52-28 (B 160/220) sınıfı bitüm kullanılmıştır. Öğütülmüş araç lastiği (CR), Samsun Akın Rejenere Kauçuk

firmasından temin edilmiştir. CR, No.40 (0.425 mm) elekten elenerek iki farklı boyuta ayrılmıştır. Çalışmada hem öğütülmüş araç lastiği hem de öğütülmüş araç lastiğinin piroliz işlemine tutulmasıyla ortaya çıkan katı ürün olan karbon siyahı (KS) bitüm modifikasyonunda katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Piroliz işlemi, No.40 üstü ve No.40'tan geçen malzemeler ayrı ayrı 600°C sıcaklıkta kimyasal reaksiyon sonuçlanana kadar oksijensiz ortamda bekletilmiştir. Pirolizden çıkan buhar yoğunlaştırılarak pirolitik yağ elde edilmiştir. Piroliz sonrası katı ürün olan karbon siyahı ise bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Çalışmada, hem CR hem de KS iki farklı boyutta (No.40 üstü ve altı) ve 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) kullanılarak toplam 12 farklı kombinasyonda oluşturulan modifiye bitümler deneylere tabi tutulmuştur. Modifiye bitüm hazırlanmasında saf bitüm ile belirtilen oranda CR veya KS 180°C sıcaklıkta 30 dk süresince 3000 devir/dakika hızda karıştırılmıştır. Çalışmada kullanılan modifiye bitümlerin açıklamaları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan modifiye bitümlerin kısaltmalarının açıklamaları

	Atık araç lastiği (CR) oranı			Karbon siyahı (KS) oranı		
	%5	%10	%15	%5	%10	%15
No. 40 elek üstü	CR%5EÜ	CR%10EÜ	CR%15EÜ	KS%5EÜ	KS%10EÜ	KS%15EÜ
No. 40 elek altı	CR%5EA	CR%10EA	CR%15EA	KS%5EA	KS%10EA	KS%15EA

2.1. Penetrasyon Deneyi

TS 118 EN 1426 standardına uygun olarak yapılan penetrasyon deneyi, asfalt çimentosunun sertlik veya kıvamını belirlemek amacıyla yapılmaktadır (TS 118 EN 1426, 2002). Penetrasyon; standart bir iğnenin belirli yük altında, belirli bir süre içinde, belirli sıcaklıktaki bağlayıcıya dikey doğrultuda batma uzunluğudur (Şekil 1). Penetrasyon birimi 0.01 cm'dir. Penetrasyon deneyinde bitümlü bağlayıcılarda numuneye 25°C sıcaklıkta 5 saniye süre ile 100 gr'lık bir yük uygulanmaktadır.

Penetrasyon deneyinde numune EN 58'e göre alınır ve yumuşama noktası sıcaklığını geçmeyecek kadar ısıtılıp, numune kabına aktarılır. Numuneler 5-30°C ortam sıcaklığı olan bir yerde 60-90 dakika süresince soğumaya bırakılır. Daha sonra numune kapları aktarma kabının içine konularak sabit sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilir ve 1-1.5 saat bekletilir.



Şekil 1:

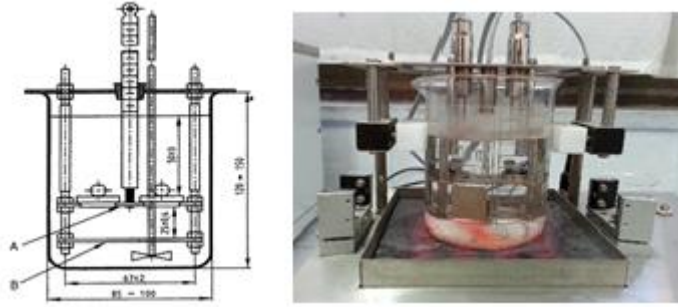
Penetrasyon deney aleti

İçinde numune kabı bulunan aktarma kabı penetrasyon cihazının tablası üzerine konulur. İstenilen ağırlık ile yüklenmiş iğne numune yüzeyine temas edecek şekilde ayarlanır. Numune üzerinde kabın kenarına ve birbirine 1 cm'den daha yakın olmayan noktalardan en az 3 deneme yapılmalıdır. Kabul edilebilir ölçümlerin aritmetik ortalaması en yakın tam sayıya yuvarlatılır ve bu değer penetrasyon değeri olarak kabul edilir.

2.2. Yumuşama Noktası Deneyi

TS 120 EN 1427 standardına göre yapılan yumuşama noktası deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık dayanımlarını ölçmek için yapılan bir deneydir (TS 120 EN 1427, 2002). Yumuşama noktası; bir su banyosu içine yerleştirilmiş, üzerinde bir bilye bulunan, standart halka içerisindeki bitümlü maddenin belli bir hızla ısıtılmasıyla, yumuşayan malzemenin tabana değdiği anda termometreden okunan sıcaklıktır. Deney düzeneği Şekil 2'de görülmektedir.

Deneyden önce bitüm numunesi ısıtılarak standart halka içine halkanın üst seviyesini geçecek şekilde dökülür ve 1 saat süre ile soğutulur. Halka üzerinden taşan bitüm, ısıtılmış spatula yardımıyla kesilip atılır.



Şekil 2:
Yumuşama noktası deney düzeneği

Cam kaba 5°C sıcaklığa sahip saf su konur ve içinde numune bulunan halka suyun içine sarkıtılır. Daha sonra bilye su dolu beher içine konulur. Su banyosunun sıcaklığı 15 dakika süreyle 5°C'de sabit tutulur. Sonra bilye, uygun bir maşa yardımıyla halka içindeki numunenin tam ortasına yerleştirilir. Su sıcaklığı dakikada 5°C artacak şekilde beher ısıtılmaya başlanır. Sıcaklığın artması ile yumuşayan malzemenin banyonun tabanına değdiği anda termometreden okunan sıcaklık yumuşama noktası olarak kaydedilir (TS 120 EN 1427, 2002).

2.3. Bitümlü Bağlayıcıların Sıcaklığa Duyarlılıkları

Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılığını tespit etmek amacıyla Penetrasyon İndeksi (PI) kullanılmaktadır. Penetrasyon İndeksi, standart penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak belirlenmektedir (Formül 1-2). Formüldeki P_{25} , bitümün 25°C'deki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktasını göstermektedir. Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılıkları arttıkça PI değerleri azalmaktadır. Penetrasyon İndeksi'nin -2'den küçük olması bitümün sıcaklığa çok duyarlı olduğunu, +2'den büyük olması ise sıcaklığa karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir (Ullidtz, 1987).

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (1)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (2)$$

2.4. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

ASTM D 4402 standardına göre yapılan dönel viskozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalama ve karıştırma

sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Deneyde, bağlayıcı içerisinde 20 rpm hızla dönen bir milin, dönmeye karşı gösterdiği direnç ile viskozite değerleri elde edilmektedir (Şekil 3). Orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C'deki viskozite değerlerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Mcgennis ve diğ., 1995).

Deney için bağlayıcıdan yaklaşık olarak 30 gr. numune alınmakta ve sıcaklığı 150°C'den daha düşük olan etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilmektedir. Bu malzemeden yaklaşık olarak 11 gr. numune bölmesine doldurulmakta, numune bölmesi sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilmektedir. Numune 15 dakika sabit sıcaklıkta bekletildikten sonra deney yapılmaktadır. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten itibaren üç adet okuma yapılmakta ve bu üç değerın ortalamasından bağlayıcının viskozitesi elde edilmektedir.

Bitümlü sıcak karışımların (BSK) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla viskozite değerleri kullanılmaktadır. Bu amaçla 135°C ve 165°C sıcaklıklarda RV deneyi uygulanmaktadır. Çizilen sıcaklık-viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmektedir. BSK'ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının $0,170 \pm 20$ Pa.s, sıkıştırılmasında ise $0,280 \pm 30$ Pa.s viskozite değerine sahip olması istenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Mcgennis ve diğ., 1995). Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır.



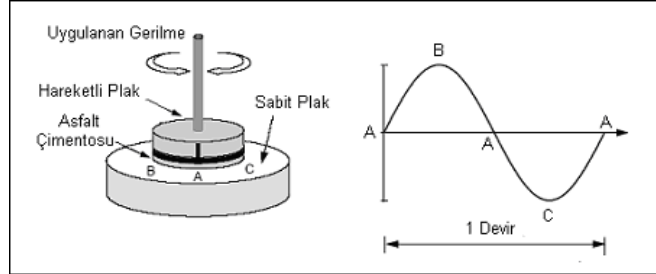
Şekil 3:
Brookfield viskozite aleti

2.5. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi ile Bağlayıcıların Tekerlek İzi Dayanımlarının Belirlenmesi

Superpave üstyapı tasarım sistemi dahilinde kullanılan dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi bağlayıcıların tekerlek izi ve yorulma dayanımını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bağlayıcıların tekerlek izi dayanım parametrelerinin belirlenmesinde işlem görmemiş ve dönülme ince film halinde ısıtma testi (RTFOT) yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken yorulma parametrelerinin belirlenmesinde basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır.

DSR deneyinde bağlayıcılar sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına yerleştirilmekte ve numuneye sinüsoidal gerilmeler uygulanmaktadır (Şekil 4). Deney süresince hareketli üst plak A noktasından B noktasına gitmekte, geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deneyde 10 devir yapılmaktadır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 10 radyan/saniye'dir

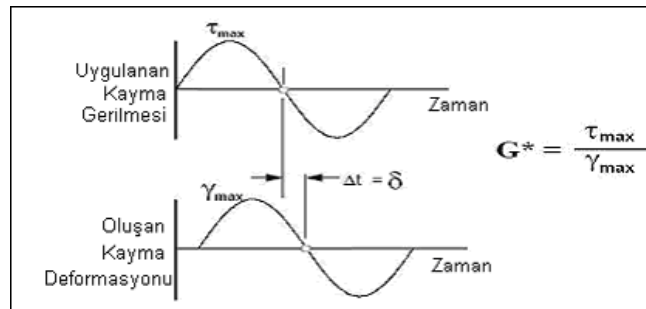
(1,59 devir/saniye). Uygulanan kayma gerilmeleri ve oluşan kayma deformasyonları kullanılarak kompleks kayma modülü (G^*) ile faz açısı (δ) belirlenmektedir. G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bitümün gösterdiği toplam direncin göstergesidir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).



Şekil 4:
DSR deneyinin yapılış şekli ve bağlayıcıya uygulan gerilme yönleri
(Zaniewski ve Pumphrey, 2004)

Faz açısı (δ) ise uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır (Şekil 5) (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; McGennis ve diğ., 1995). Asfalt çimentosunun viskoelastik yapısından ötürü numuneye uygulanan gerilmeler ilk etapta numune tarafından karşılanmakta belirli bir süreden sonra kayma deformasyonları meydana gelmektedir. Uygulanan kayma gerilmesi, oluşan kayma deformasyonu ve faz açısı kullanılarak bağlayıcıların viskoelastik yapısı değerlendirilmektedir. Faz açısının 0° olması numunenin elastik davranış gösterdiğini, 90° olması ise viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Bitümlü bağlayıcılar viskoelastik özellik gösterdiğinden normal şartlarda faz açısı 0 ile 90° arasında değişmektedir. Faz açısının düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir.

Dinamik kayma reometresi deneyi gerilme veya deformasyon kontrollü olarak yapılabilir. Bitümlü bağlayıcının tekerlek izi dayanımı belirlemek amacıyla yapılan DSR deneyinin gerilme kontrollü yapılması halinde işlem görmemiş bağlayıcılara 120 Pa, RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılara ise 220 Pa sabit gerilme uygulanmaktadır. Tekerek izi dayanımı belirlemek amacıyla işlem görmemiş ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneylerinde 25 mm'lik plaklar ve 1 mm numune kalınlığı kullanılmaktadır. Deney sonucunda belirlenen kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değeri tespit edilmektedir. İşlem görmemiş bağlayıcılar için $G^*/\sin\delta$ değerinin minimum 1.000 Pa, RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise $G^*/\sin\delta$ değerinin minimum 2.200 Pa olması gerekmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; McGennis ve diğ., 1995).



Şekil 5:
Kayma gerilmesi ve deformasyonları kullanarak faz açısının belirlenmesi
(Zaniewski ve Pumphrey, 2004; McGennis ve diğ., 1995)

3. BULGULAR

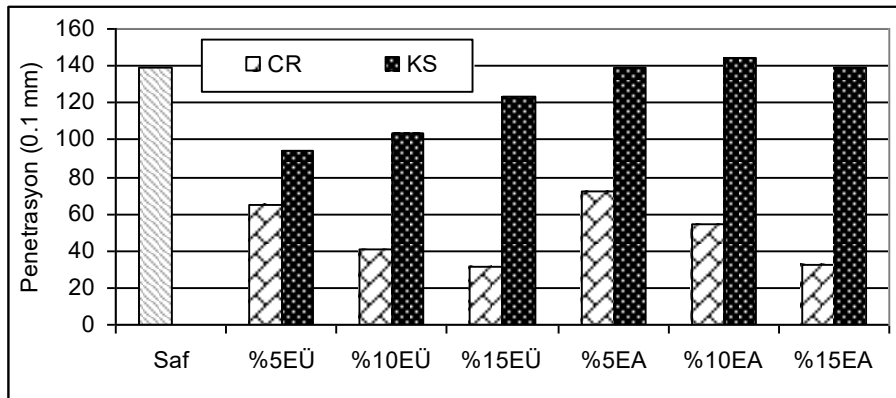
Çalışmada saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viksozimetre ve dinamik kayma reometresi deneyleri uygulanarak katkı türü ve oranının bitümün reolojisi üzerindeki etkisi değerlendirilmiş, ayrıca penetrasyon indeksi değerleri belirlenerek katkıların bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyeti üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

3.1. Penetrasyon Deney Sonuçları

Saf ve modifiye bağlayıcılara uygulanan penetrasyon deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere piroliz öncesinde ilave edilen öğütülmüş atık araç lastiği bağlayıcıların penetrasyonunu önemli derecede azaltmıştır. No.40 üstü boyuttaki CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahı penetrasyon değerini azaltmasına rağmen No.40'tan küçük boyuttaki CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahının ilave edildiği bağlayıcılar saf bağlayıcıyla benzer penetrasyon değerine sahip olmuştur.

Pirolize tabi tutulmamış öğütülmüş araç lastiği modifiyeli bitümlü bağlayıcılar dikkate alındığında hem No.40'tan büyük hem de küçük boyuttaki CR kullanılması penetrasyon değerlerini azaltmış dolayısıyla bağlayıcıların sertliğini arttırmıştır. CR içeriği arttıkça penetrasyon değeri azalmış, bağlayıcıların sertliği artmıştır. No.40 üstü öğütülmüş araç lastiğinden %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılması durumunda penetrasyon değeri saf bağlayıcıya göre sırasıyla 2,15 ; 3,41 ve 4,47 kat azalmıştır. No.40'tan daha küçük boyuta sahip öğütülmüş araç lastiği içeren modifiye bitümlerin penetrasyon değeri saf bağlayıcıya göre sırasıyla 1,93 ; 2,56 ve 4,27 kat azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan penetrasyon değerleri üzerinde No.40'tan daha büyük boyuttaki öğütülmüş araç lastiğinin bitüm modifikasyonunda kullanılmasının daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

Öğütülmüş araç lastiğinin pirolizinden elde edilen karbon siyahının bitüm modifikasyonunda kullanılması değerlendirildiğinde No.40 üstü CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahından %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılması ile penetrasyon değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla 1,47 ; 1,33 ve 1,12 kat azalmıştır. No.40 üstü CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahının kullanıldığı modifiye bitümlerin penetrasyon değerleri dikkate alındığında katkı maddesi arttıkça penetrasyon değerlerinin arttığı dolayısıyla bağlayıcıların rijitliklerinin azaldığı belirlenmiştir. No.40 altı boyuttaki CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahının bitüm modifikasyonunda kullanılması ile saf bağlayıcıyla benzer penetrasyon değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç, No.40 altı boyuttaki CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahının bitüm modifikasyonunda kullanılmasının penetrasyon değerleri üzerinde etkisinin olmadığını göstermektedir. Piroliz işlemi dikkate alındığında bitüm modifikasyonunda CR karbon siyahı kullanımının katkının etkinliğini azalttığı söylenebilmektedir.

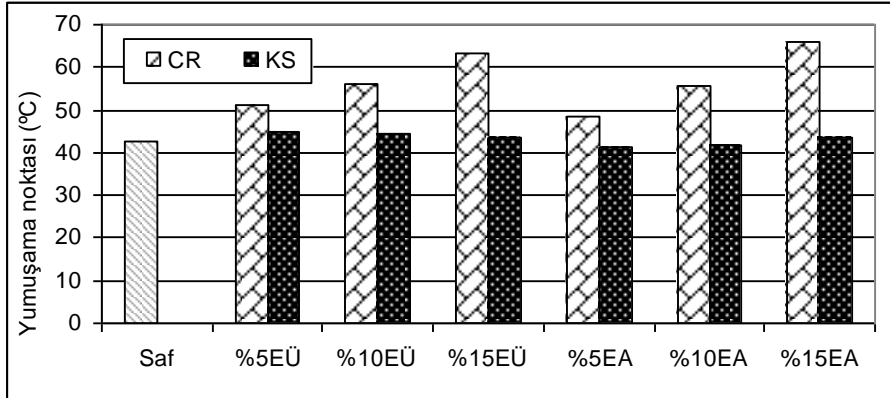


Şekil 6:

Saf ve modifiye bitümlerin penetrasyon değerleri

3.2. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Saf ve modifiye bitümlere uygulanan yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 7’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere piroliz işlemine tabi tutulmamış öğütülmüş araç lastiğinin bitüm modifikasyonunda kullanılması ile yumuşama noktası değerlerinin saf bağlayıcıya göre önemli oranda artmasını sağlamıştır. No.40 üstü boyuta sahip öğütülmüş araç lastiğinin bitüm modifikasyonunda %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılması ile yumuşama noktası değeri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %19,4 ; %30,9 ve %48,0 oranlarında artmıştır. No.40’tan küçük boyuta sahip öğütülmüş araç lastiklerinin %5, %10 ve %15 oranlarında bitüm modifikasyonunda kullanılması ile yumuşama noktası değerleri saf bağlayıcıya göre %13,3 ; %30,0 ve %54,5 oranlarında artmıştır. Elde edilen sonuçlardan No.40 üstü boyutta CR’den %5 ve %10 kullanılmasının, No.40 altı boyuttan ise %15 kullanılmasının daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Öğütülmüş araç lastiklerinin pirolize tabi tutulması sonucu elde edilen karbon siyahlarının bitüm modifikasyonunda kullanılması, bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası üzerinde herhangi bir etki göstermemiştir. Karbon siyahının bitüm modifikasyonunda kullanılması durumunda saf bağlayıcıya göre en büyük fark No.40 üstü boyuta sahip CR’nin pirolizinden elde edilen karbon siyahının bitüm modifikasyonunda %5 kullanılması durumunda (%4,9 artış) meydana gelmiştir. No.40’tan daha küçük boyuta sahip CR’nin pirolizinden elde edilen karbon siyahından bitüm modifikasyonunda %5 ve %10 oranlarında kullanılması durumundan yumuşama noktası değerleri saf bağlayıcıya göre %3,3 ve %2,0 daha düşük çıkmıştır. Bu durum CR karbon siyahının bitüm modifikasyonunda kullanılmasının bağlayıcıyı yumuşatma etkisine neden olabileceğini göstermektedir.

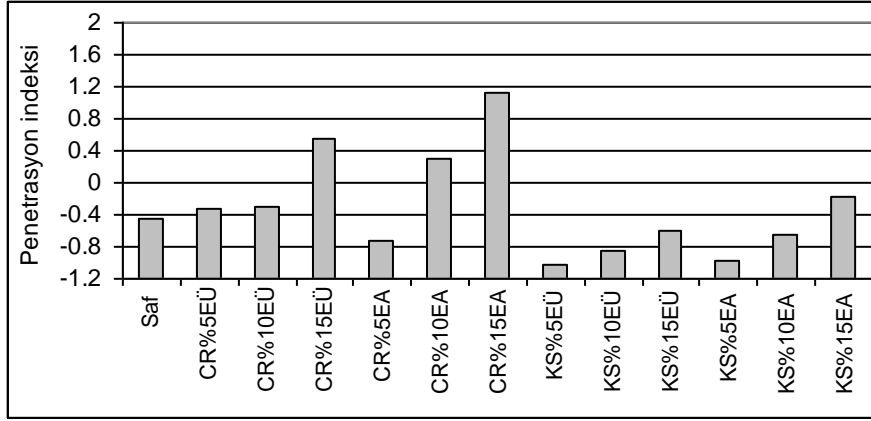


Şekil 7:

Saf ve modifiye bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları

3.3. Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Sıcaklığa Karşı Hassasiyetlerinin Değerlendirilmesi

Çalışmada, penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak bağlayıcıların penetrasyon indeksi değerleri belirlenmiştir. Bağlayıcıların penetrasyon indeksi deney sonuçları Şekil 8’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere pirolize tabi tutulmayan öğütülmüş atık lastik içeren modifiye bitümler dikkate alındığında hem No.40’tan büyük hem de küçük boyutta CR içeren modifiye bitümlerde katkı içeriği arttıkça PI değerlerinin arttığı dolayısıyla bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetinin azaldığı belirlenmiştir. Saf bağlayıcıyla kıyaslandığında No.40 altı %5 CR modifiyeli bitüm dışında bütün modifiye bitümlerin PI değerlerinin saf bağlayıcıdan daha yüksek olduğu dolayısıyla saf bağlayıcıya göre sıcaklığa karşı hassasiyetin iyileştiği tespit edilmiştir.



Şekil 8:

Saf ve modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksi değerleri

Öğütülmüş araç lastiğinin piroliz işlemine tabi tutulmasından elde edilen siyah karbonların bitüm modifikasyonunda kullanılması durumunda No.40 altı CR siyah karbonlarından %15 oranında kullanılan modifiye bitüm dışındaki tüm bağlayıcıların PI değerlerinin saf bağlayıcıya göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum belirtilen bağlayıcı dışında bütün karbon siyahı içeren modifiye bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin saf bağlayıcıdan daha fazla olacağını, yüksek ve düşük sıcaklıklardan daha fazla etkileneceğini göstermektedir. Bunun yanı sıra hem No.40 üstü hem de altı CR'lerin karbon siyahlarının kullanıldığı modifiye bitümlerde katkı içeriği arttıkça PI değerleri artmıştır.

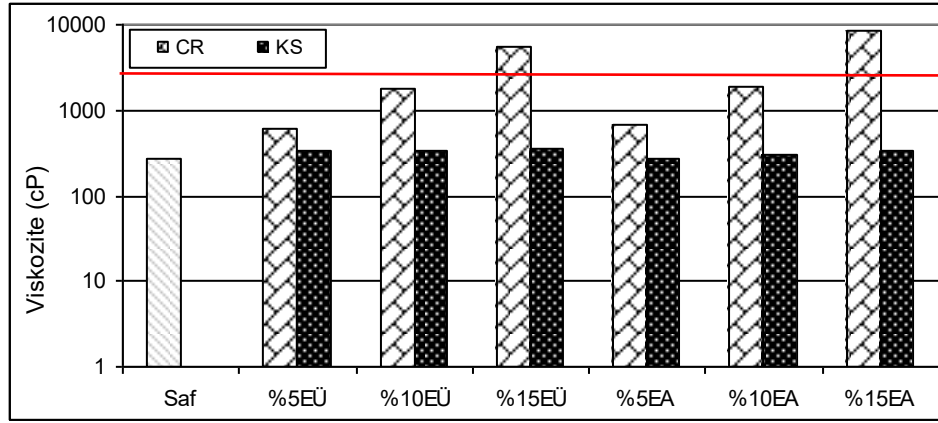
3.4. Viskozite Deney Sonuçları

Çalışmada saf ve modifiye bitümler üzerinde dönel viskozimetre deneyi 135 ve 165°C sıcaklıklarda uygulanmıştır. Viskozite deney sonuçları Şekil 9 ve Şekil 10'da görülmektedir.

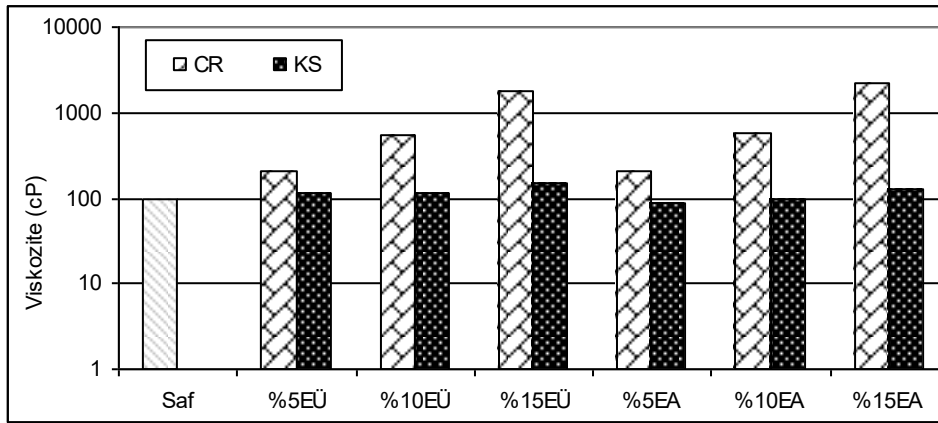
Şekil 9 ve Şekil 10'da görüldüğü üzere piroliz işlemine tabi tutulmamış öğütülmüş araç lastiklerinin bitüm modifikasyonunda kullanılması ile viskozite değerleri önemli oranda artarken karbon siyahlarının bitüm modifikasyonunda kullanılması hem 135°C hem de 165°C sıcaklıkta viskozite değerlerini önemli oranda arttırmamıştır.

No.40 üzeri öğütülmüş atık lastiğin bitüm modifikasyonunda %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılması ile viskozite değeri saf bağlayıcıya göre 2,2; 6,7 ve 19,3 kat, No.40'tan küçük boyuta sahip öğütülmüş atık lastik kullanılması durumunda ise 2,5; 6,8 ve 30,9 kat daha yüksek sonuçlar vermiştir. 165°C sıcaklıkta ise No.40 üzeri CR'den %5, %10 ve %15 kullanılması ile viskozite değeri saf bağlayıcıya göre 2,1; 5,3 ve 17,8 kat artarken, No.40 altında kalan CR'nin kullanılması ile viskozite değerlerinin 2,1; 5,9 ve 22,1 kat arttığı belirlenmiştir. Superpave yöntemine göre işlenebilirlik açısından 135°C sıcaklıkta bağlayıcıların viskozitelerinin maksimum 3000 cP olması gerekmektedir. Elde edilen sonuçlardan No.40 üstü ve No.40 altı boyutta CR'dan %15 kullanılması durumunda işlenebilirlik açısından modifiye bitümler uygun değildir. Dolayısıyla kullanılacak maksimum CR oranının %10 olduğu belirlenmiştir.

CR'nin piroliz işlemine tabi tutulmasından sonra elde edilen karbon siyahının bitüm modifikasyonunda kullanılması ile elde edilen modifiye bitümlerin viskozite değerlerinin hem 135°C hem de 165°C'de saf bağlayıcıya benzer olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle CR siyah karbonunun bağlayıcıların viskoziteleri üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadıkları söylenebilmektedir.



Şekil 9:
135°C sıcaklıkta bağlayıcıların viskozite değerleri



Şekil 10:
165°C sıcaklıkta bağlayıcıların viskozite değerleri

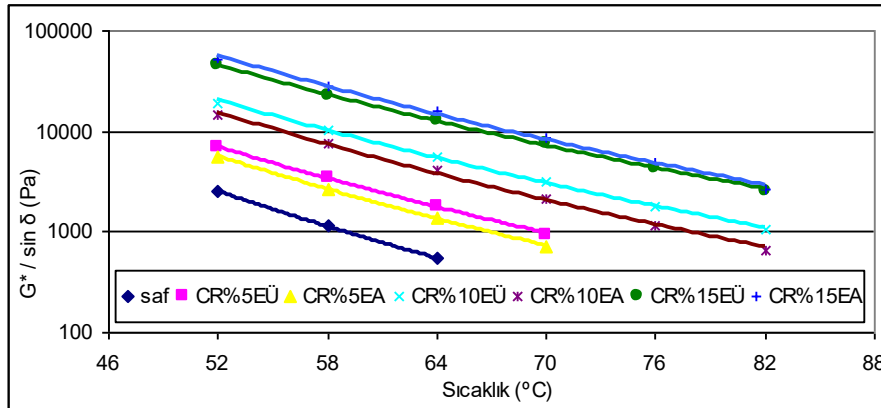
Saf ve modifiye bitümlerin agregayla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Tablo 2’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere öğütülmüş araç lastiği kullanılması ile viskozite değerlerindeki artışa bağlı olarak bitümlü bağlayıcıların agregayla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları artmış dolayısıyla modifiye bitümlerin daha yüksek sıcaklıklara ve enerjiye ihtiyaç duydukları tespit edilmiştir. No.40 üstü malzemenin pirolizi sonrasında elde edilen karbon siyahının bitüm modifikasyonunda kullanılması durumunda karıştırma sıcaklığında en fazla 13°C, sıkıştırma sıcaklığında ise en fazla 10°C artış meydana gelmiştir.

Tablo 2. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Bağlayıcı türü	Karıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	Sıkıştırma sıcaklığı aralığı (°C)
Saf	144,8-151,7	130,4-136,7
%5 CR No.40 Üstü	167,0-173,6	153,4-159,4
%10 CR No.40 Üstü	191,1-196,9	179,2-184,4
%15 CR No.40 Üstü	227,6-234,0	214,3-220,1
%5 CR No.40 Altı	169,7-175,8	157,2-162,7
%10 CR No.40 Altı	193,1-199,2	180,5-186,1
%15 CR No.40 Altı	221,2-226,5	210,3-215,1
%5 KS No.40 Üstü	151,9-158,3	138,6-144,5
%10 KS No.40 Üstü	151,9-158,3	138,6-144,5
%15 KS No.40 Üstü	158,0-166,4	140,5-148,2
%5 KS No.40 Altı	145,3-151,6	132,5-138,1
%10 KS No.40 Altı	146,8-153,4	133,2-139,2
%15 KS No.40 Altı	154,4-161,8	139,1-145,8

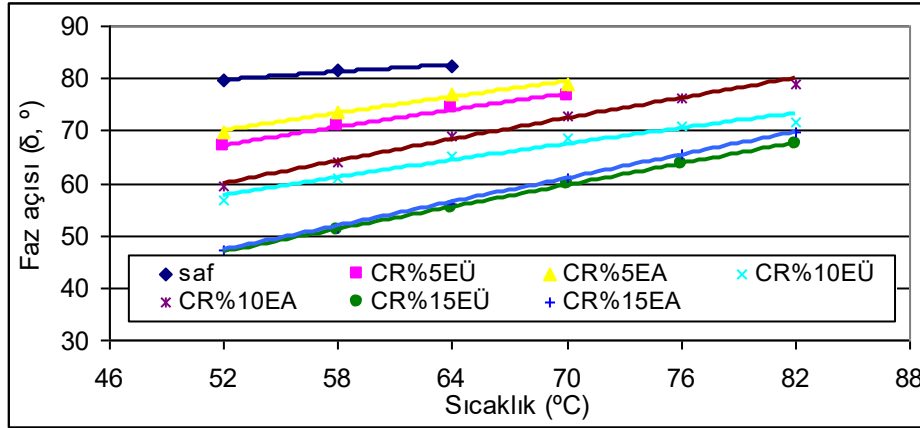
3.5. Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları

Çalışmada öncelikle bitüm ağırlığına %5, %10 ve %15 öğütülmüş araç lastiği içeren modifiye bitümlerin DSR deney sonuçları değerlendirilmiştir. Öğütülmüş atık lastikler, No.40 elekte elenmiş ve elek üstünde kalan ve elekten geçen malzeme ayrı ayrı katkı maddesi olarak kullanılmıştır. İki farklı boyutta (No.40 üstü ve altı) ve 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) öğütülmüş araç lastiği içeren 6 farklı modifiye bitüme ve saf bağlayıcıya uygulanan DSR deneyleri sonucunda elde edilen $G^*/\sin \delta$ – sıcaklık ve faz açısı – sıcaklık grafikleri Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmiştir.

**Şekil 11:**

Saf ve CR modifiye bitümlerin $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 11’de görüldüğü üzere sıcaklığın artması ile bütün bağlayıcılarda tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) azalmıştır. Katkı kullanımı ile bu değer arttığı belirlenmiştir. Superpave yöntemine göre performans seviyesi yüksek sıcaklık değerleri dikkate alındığında (orijinal bağlayıcılar için $G^*/\sin \delta$ min 1000 Pa. sınırı) saf bağlayıcının performans seviyesinin PG 58 olduğu, %5 CR içeren (No.40 üstü ve altı) modifiye bitümlerin PG 70 olduğu, No.40 altı %10 CR içeren modifiye bitümün PG 76 olduğu, No.40 üstü %10 CR içeren modifiye bitümün PG 82 olduğu belirlenmiştir. %15 CR içeren modifiye bitümlerin (No.40 üstü ve altı) $G^*/\sin \delta$ değeri bütün sıcaklıklarda modifiye bitümler arasında en yüksek çıkmış olmakla birlikte 82°C sıcaklıkta dahi çok yüksek (yaklaşık 2600 Pa) olduğundan performans seviyesi değeri belirlenememiştir. %5 ve %10 CR içeriklerinde No.40 üstü malzeme kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. %5 CR içeren modifiye bitümlerde 58°C sıcaklıkta No.40 üstü malzeme kullanılan numunelerin $G^*/\sin \delta$ değerlerinin No.40 altı CR kullanılan modifiye bitümlere göre %28,2 , 64°C sıcaklıkta ise %32,0 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. %10 CR modifiyeli bitümlerde 58°C ve 64°C sıcaklıklarda No.40 üstü CR içeren modifiye bitümlerin $G^*/\sin \delta$ değerlerinin No.40 altı CR içeren modifiye bitümlere göre 30,2 ve 40,6 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. %15 CR içeren modifiye bitümlerde ise diğer iki oranın tersine No.40 altı malzemenin kullanıldığı numunelerin $G^*/\sin \delta$ değerlerinin daha yüksek olmasına rağmen No.40 altı ve üstü CR ile hazırlanan modifiye bitümlerin $G^*/\sin \delta$ değerlerinin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir.

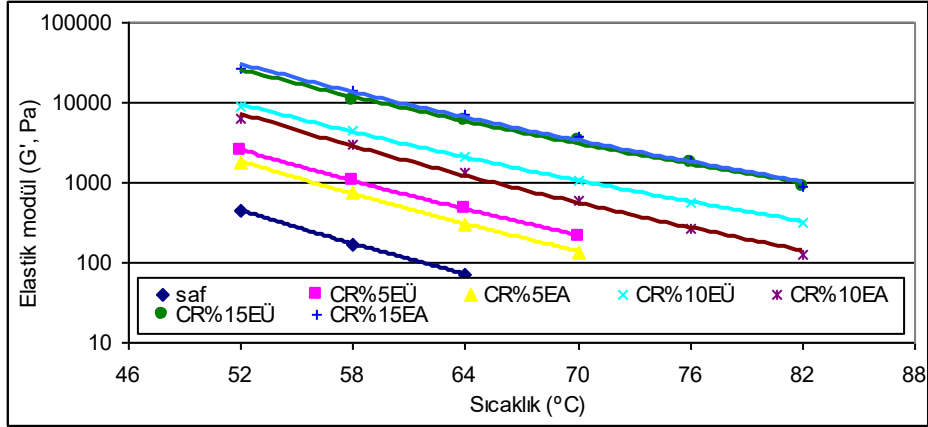


Şekil 12:

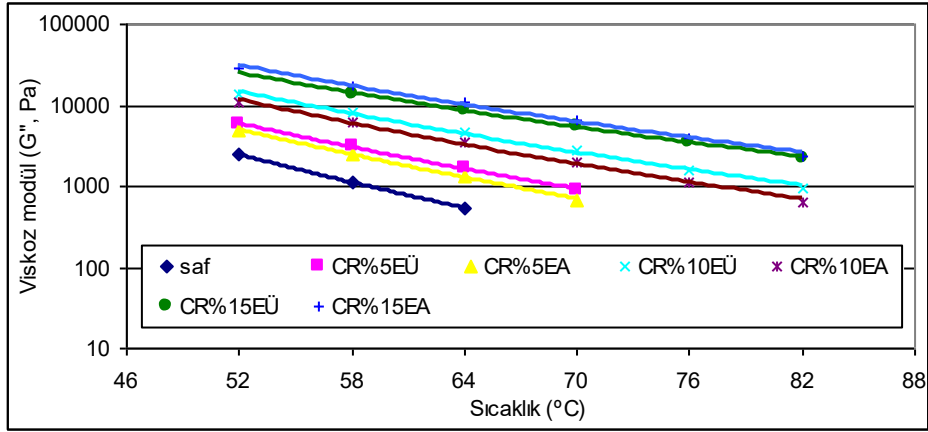
Saf ve CR modifiye bitümlerin faz açısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 12’de görülen faz açısı değerleri dikkate alındığında CR içeriği arttıkça faz açısı değerlerinin azaldığı, sıcaklık arttıkça ise faz açısı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Tekerlek izi parametresinde olduğu gibi faz açısı değerlerinde de %5 ve %10 CR modifiyeli bitümlerde No.40 üstü CR ile modifiye edilen modifiye bitümlerin faz açısının daha düşük olduğu dolayısıyla daha elastik davranış sergilediği, %15 CR içeren modifiye bitümlerde ise No.40 üstü ve No.40 altı boyuttaki CR ile hazırlanan modifiye bitümlerin benzer elastik özellik gösterdiği belirlenmiştir. Saf ve modifiye bitümlerin elastik ve viskoz modüllerinin sıcaklıkla değişimleri Şekil 13 ve Şekil 14’te verilmiştir.

Şekil 13 ve Şekil 14’te görülen elastik ve viskoz modüller dikkate alındığında elde edilen sonuçların faz açısı ve tekerlek izi ile benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle elastik modülde %15 CR içeren modifiye bitümlerde yüksek sıcaklıklarda No.40 üstü malzemelerin No.40 altı malzemelere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

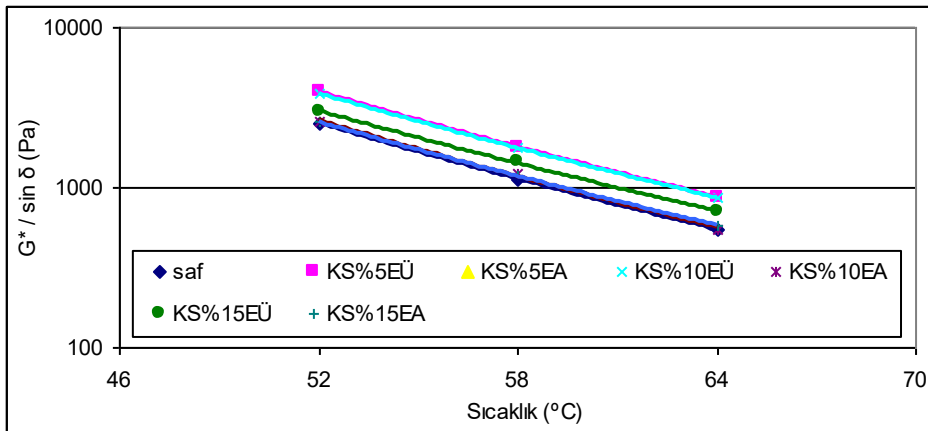


Şekil 13:
Saf ve CR modifiye bağlayıcıların elastik modüllerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 14:
Saf ve CR modifiye bağlayıcıların viskoz modüllerinin sıcaklıkla değişimi

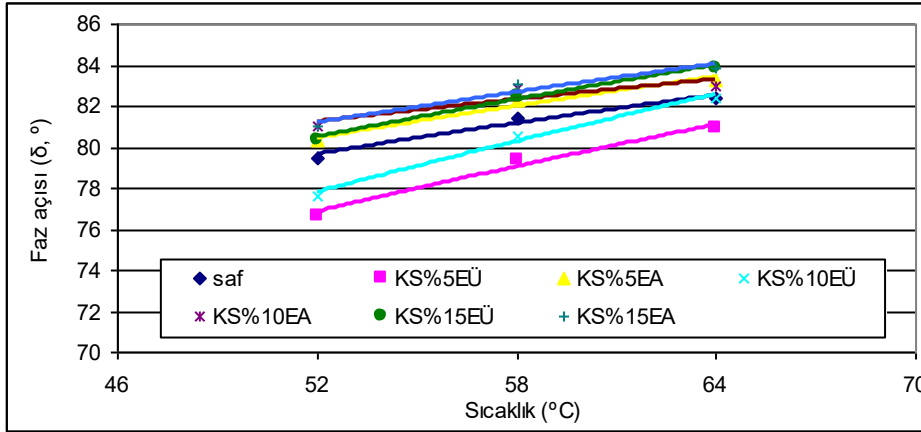
Öğütülmüş araç lastiğinin pirolizinden elde edilen karbon siyahının bitüm modifikasyonunda kullanılması ile ilgili tekerlek izi parametresi – sıcaklık ve faz açısı – sıcaklık grafikleri Şekil 15 ve Şekil 16’da verilmiştir. Karbon siyahı içeren modifiye bitümlerde de piroliz öncesinde olduğu gibi katkı maddelerinden %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılmıştır.



Şekil 15:
KS içeren modifiye bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 15'te görüldüğü üzere saf bağlayıcı ile No.40 altı CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahından %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılan modifiye bitümlerin tekerlek izi parametreleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu durumdan yola çıkaran No.40 boyutundan daha küçük öğütülmüş araç lastiğinin pirolizinden elde edilen karbon siyahının tekerlek izi parametresi bakımından olumlu bir etkisinin olmadığı söylenebilmektedir. Bütün sıcaklıklarda en iyi sonucu No.40 üstü CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahının %5 ve %10 oranlarında kullanıldığı modifiye bitümler göstermiştir. %5, %10 ve %15 oranlarında karbon siyahı içeren modifiye bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin saf bitüme göre 58°C sıcaklıkta sırasıyla %58,4 ; %55,5 ve %26,3 oranlarında 64°C sıcaklıkta ise %60,7 ; %58,4 ve %29,9 oranlarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra her ne kadar No.40 üstü CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahı ile tekerlek izi parametresinin arttığı söylene de bütün bağlayıcıların Superpave performans sınıfı yüksek sıcaklık seviyelerinin aynı olduğu (PG 58) belirlenmiştir.

Öğütülmüş araç lastiklerinin bitüm modifikasyonunda kullanılma yöntemleri dikkate alındığında CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahının bitüm modifikasyonunda kullanılması ile CR etkinliğini kaybetmiştir. Özellikle No.40'tan daha küçük boyutta ki CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahı, bitüm modifikasyonunda tekerlek izi parametresi bakımından herhangi bir fayda sağlamamıştır. Elde edilen sonuçlardan piroliz öncesi ve sonrası CR kullanılmasının etkisi değerlendirildiğinde en büyük fark No.40 üstü %15 CR içeren modifiye bitümlerde (64°C sıcaklıkta 27 kat azalma) meydana gelmiştir.

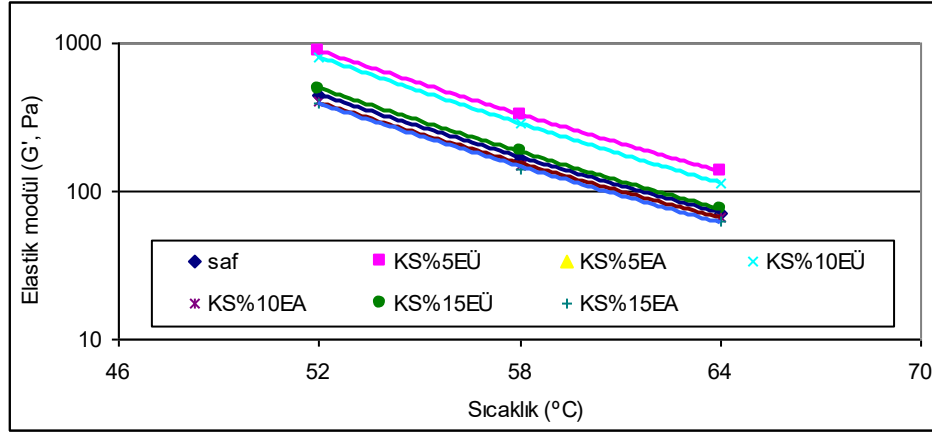


Şekil 16:
KS içeren modifiye bitümlerin faz açılarının sıcaklıkla değişimi

Şekil 16'da görüldüğü üzere faz açısı en düşük dolayısıyla elastikiyeti en yüksek olan bağlayıcı No.40 üstü CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahının %5 oranında kullanıldığı modifiye bitüm olmuştur. Saf bağlayıcıyla kıyaslandığında sadece No.40 üstü CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahının %5 ve %10 oranlarında kullanıldığı modifiye bitümlerin saf bitüme göre daha düşük faz açısına sahip olduğu dolayısıyla bu bağlayıcıların daha elastik davranış sergilediği belirlenmiştir. Saf ve karbon siyahı içeren modifiye bağlayıcıların elastik ve viskoz modüllerinin sıcaklıkla değişimleri Şekil 17 ve Şekil 18'te verilmiştir.

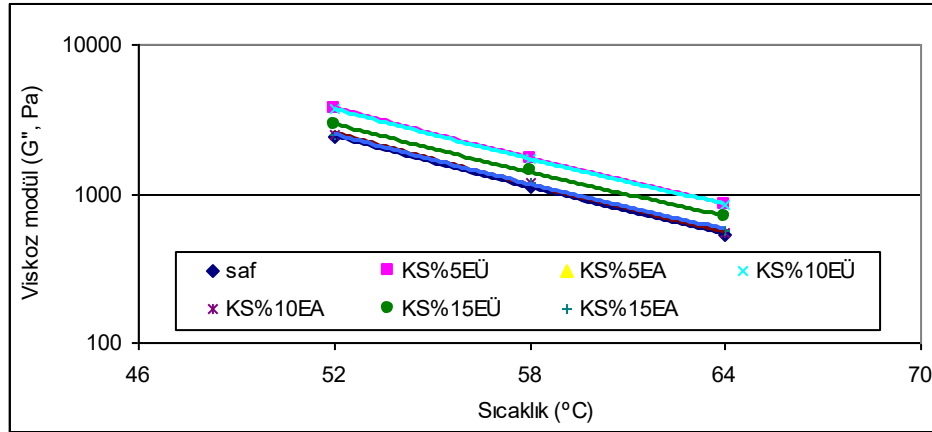
Şekil 17 ve Şekil 18'de görüldüğü üzere önceki grafiklerde olduğu gibi sadece No.40 üstü boyuttaki CR'nin pirolizinden elde edilen karbon siyahından %5 ve %10 oranında kullanılmasıyla hazırlanan modifiye bitümlerin diğer bağlayıcılara kıyasla önemli oranda farklı olduğu fakat piroliz işlemine tabi tutulmamış numunelere kıyasla modül değerlerinin piroliz sonrasında önemli oranda azaldığı tespit edilmiştir.

DSR deney sonuçlarından piroliz öncesinde CR kullanılması ile hem tekerlek izi dayanımının hem de elastik davranışın önemli oranda iyileştiği fakat piroliz sonrası elde edilen CR karbon siyahları dikkate alındığında sadece No.40'tan daha büyük boyuta sahip CR'nin pirolizinden elde edilen siyah karbonlardan %5 ve %10 oranlarında kullanılması durumunda saf bağlayıcıya göre tekerlek izi dayanımı ve elastik davranış açısından daha üstün modifiye bitümler elde edilebileceği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra piroliz edilmiş malzemelerin bitüm modifikasyonunda kullanılmasının hem tekerlek izi dayanımını hem de elastik davranışı olumsuz etkilediği belirlenmiştir.



Şekil 17:

Saf ve KS içeren modifiye bağlayıcıların elastik modüllerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 18:

Saf ve KS içeren modifiye bağlayıcıların viskoz modüllerinin sıcaklıkla değişimi

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada çevre açısından büyük bir sorun ve tehlike arz eden atık araç lastiklerinden fayda elde etmek ve çevreye zarar vermeden bertaraf etmek düşüncesiyle bu malzemelerin karayolu sektöründe bitüm katkı maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla temin edilen öğütülmüş araç lastiği, No.40 (0.425 mm) elekten elenerek iki farklı boyuta ayrılmıştır. Öncelikli olarak iki farklı boyutta (No.40 elek üstü ve altı) öğütülmüş araç lastiği (CR) 3 farklı oranda (bitüm ağırlığına %5, %10 ve %15) bitüme ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmış, saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri uygulanarak CR'nin bitümlü

bağlayıcıların reolojik özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca CR'nin bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyeti üzerinde etkisi penetrasyon indeksi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Atık lastikten ticari değeri olan bir ürün elde etmek amacıyla CR piroliz işlemine tabi tutulmuş ve pirolitik yağ ve karbon siyahı elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında piroliz sonrası elde edilen bir ürün olan ve ticari değeri düşük olan karbon siyahı bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Karbon siyahı, iki farklı boyutta CR'den (No.40 elek üstü ve altı) elde edilmiştir. CR siyahı karbonu bitüm ağırlığınca üç farklı oranda (%5, %10 ve %15) kullanılmış, bu modifiye bağlayıcılar üzerinde de aynı deney yöntemleri uygulanmıştır.

Penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyleri sonucunda bitüm modifikasyonunda kullanılan CR miktarı arttıkça penetrasyon değerlerinin düzenli olarak azaldığı, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin düzenli olarak arttığı belirlenmiştir. Viskozite deney sonuçlarından %15 oranında CR kullanılması durumunda işlenebilirlik açısından sınır değer (maksimum 3000 cP) aşıldığı tespit edilmiştir. Bu durum CR kullanımının bitümün rijitliğini arttırdığını göstermektedir. CR boyutu değerlendirildiğinde malzeme boyutunun bu üç deney üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. PI değerlerinden saf bağlayıcıya kıyasla No.40 elek altı %5 CR kullanılan modifiye bitüm dışındaki tüm modifiye bitümlerin sıcaklığa karşı hassasiyetinin daha az olduğu belirlenmiştir. DSR deneyleri sonucunda CR içeriği arttıkça bağlayıcıların tekerlek izine karşı dayanım parametrelerinin ve elastikiyetlerinin arttığı belirlenmiştir. Öğütülmüş CR'nin pirolize tabi tutulmasından elde edilen siyah karbonların bitüm modifikasyonunda kullanılması, CR'nin etkinliğini azaltmış özellikle No.40 altı boyuttaki CR'nin karbon siyahı saf bitümün özelliklerini iyileştirme özelliği göstermemiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, MF.15.32 numaralı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) performans projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, desteklerinden ötürü FÜBAP'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR

1. Arabani, M., Mirabdolazimi, S.M. ve Sasani, A.R. (2010) The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 24 (6), 1060-1068, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.011.
2. Cooper, S.B. (2008) Characterization of HMA mixtures containing high recycled asphalt pavement content with crumb rubber additives, Master of Science Thesis, The Department of Civil and Environmental Engineering, B.S.C.E. Louisiana State University, 111p, Louisiana.
3. Cong L., Peng, J., Guo, Z., ve Wang, Q. (2017) Evaluating of fatigue cracking in asphalt mixtures based on surface energy, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (3), doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001465.
4. Çolak, H. (2010) Öğütülmüş araç lastiğinin bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 90s, Elazığ.
5. Gibreil, H.A.A. ve Feng, C.P. (2017) Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 142, 101-108, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.062.
6. Hamedi, G.H. (2017) Effects of polymeric coating the aggregate surface on reducing moisture sensitivity of asphalt mixtures, *International Journal of Civil Engineering*, doi.org/10.1007/s40999-017-0263-y.

7. Hao, J., Cao, P., Liu, Z., Wang, Z. ve Xia, S. (2017) Developing of a SBS polymer modified bitumen to avoid low temperature cracks in the asphalt facing of a reservoir in a harsh climate region, *Construction and Building Materials*, 150, 105-113, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.200.
8. Ilıcalı, M. (2001) *Asfalt ve Uygulamaları*, İSFALT Bilimsel Yayınları, No: 1, İstanbul, 280s.
9. Isacson, U., ve Lu, X. (1995) Testing and appraisal of polymer modified road bitumens-state of the art, *Materials and Structure*, 28, 139-159.
10. Kök, B.V., Yılmaz, M. Ve Şağbaşı, L. (2015) Effect of hot mixture modification on overall cost of the pavement, *The 2015 WEI International Academic Conference Proceedings*, May 18-20, Prague, Czech Republic.
11. McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W. ve Solaimanian, M. (1995) *Background of Superpave asphalt mixture design and analysis*, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-SA-95-003, Washington, DC., 172p.
12. Milli Eğitim Bakanlığı (2011) *Atık Lastikler, Aile ve Tüketici Hizmetleri*, 36s.
13. Silvrano, A., Dantas, N., Márcio M.F., Luiz Guilherme, R.M., Paulo, P. ve Jorge, C.P. (2005) The use of crumb rubber in asphalt mixtures using the dry process, *International Symposium on Pavement Recycling*, March 14-16, São Paulo, Brasil.
14. Tığdemir, M. ve Kalyoncuoğlu, F. (2017) Fatigue life prediction of the modified asphalt mixtures with ANFIS modeling, *Scientia Iranica Transaction A Civil Engineering*, 24 (1), 72-81, DOI: 10.24200/SCI.2017.2378.
15. Topal, A. (2010) Evaluation of the properties and microstructure of plastomeric polymer modified bitumens, *Fuel Processing Technology*, 91 (1), 45-51, doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.08.007.
16. TS 118 EN 1426, (2002) *Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar - İğne Batma Derinliği Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
17. TS 120 EN 1427, (2002) *Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar - Yumuşama Noktası Tayini - Halka ve Bilye Metodu*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
18. Ullidtz, P. (1987) *Pavement analysis*, Elsevier, Amsterdam, 318s.
19. Vlachovicova, Z., Wkumbura, C., Stastana, J. ve Zanzotto, L. (2007) Creep characteristics of asphalt modified by radial styrene-butadiene-styrene copolymer, *Construction and Building Materials*, 21, 567-577, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.006.
20. Wayne, J. ve Magdy, A. (2006) *Crumb rubber in performance-graded asphalt binder*, University of Nebraska - Lincoln, North Dakota State University, 160p.
21. Zaniwski, J.P. ve Pumphrey, M.E. (2004) *Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol*, Asphalt Technology Program, Morgantown, West Virginia, 107p.

