

Manyetik Aktif Karbon ile Modifiye Edilmiş Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Bahadır YILMAZ^{1*}

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye

*¹ bahadir.yilmaz@btu.edu.tr

(Geliş/Received: 21/01/2021;

Kabul/Accepted: 01/04/2021)

Öz: Bu çalışmada, manyetik aktif karbon (MAK) ile modifiye edilmiş saf bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. Çalışma kapsamında B 160/220 penetrasyon sınıfına sahip bitümlü bağlayıcıya %5,%10,%15 ve %20 oranlarında MAK ilave edilerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış ve saf bağlayıcılara, geleneksel bağlayıcı deneyleri, dinamik kayma reometresi (DSR) ve dönel viskozimetre (RV) deneyleri uygulanmıştır. DSR deneyi, yükleme hızları ve deney sıcaklıkları değiştirilerek gerçekleştirilmiş ve bitümlü bağlayıcıların farklı şartlar altında kompleks kayma modülü (G*) değerleri ve faz açılarındaki değişimler incelenerek tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımları değerlendirilmiştir. Test sonuçlarına göre katkı oranının artması ile birlikte modifiye bitümlerin penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası değerlerinin arttığı, reolojik özelliklerin iyileştiği ve buna bağlı olarak yüksek sıcaklık performansının geliştiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bitüm, Modifikasyon, Manyetik Aktif Karbon, Reoloji.

Investigation of Physical and Rheological Properties of Magnetic Activated Carbon Modified Bitumen

Abstract: In this study, changes in physical and rheological properties of base bituminous binder modified with magnetic activated carbon (MAK) were investigated. Within the scope of the study, modified bitumens were obtained by adding MAK at the rates of 5%,10%,15% and 20% to the bituminous binder with B 160/220 penetration class. Conventional binder experiments, dynamic shear rheometry (DSR) and rotary viscometry (RV) experiments were applied to short-term aged and pure binders. The DSR test was carried out by changing the loading speeds and test temperatures and the complex shear modulus (G *) values of the bituminous binders under different conditions and the changes in phase angles were examined and their resistance against the formation of traces was evaluated. According to the test results, it was determined that with the increase in the rate of additives, the penetration values of the modified bitumen decreased, the softening point values increased, the rheological properties improved, and consequently the high temperature performance improved.

Key words: Bitumen, Modification, Magnetic Activated Carbon, Rheology.

1. Giriş

Bitümlü sıcak karışımlar agrega ve bitümün belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen yol kaplama malzemeleridir. Karışımda iskelet görevi gören agregalar kayaların kırılıp ufalanması ile elde edilirken, bitüm ise ham petrolün rafine işlemi görmesi sonrasında elde edilmektedir. Bitümlü bağlayıcılar, bitümlü sıcak karışımların ağırlıkça %5-7'sine tekabül etmekle birlikte agregalara yapışarak düzgün bir kaplama yüzeyi oluşturur ve geçirimsizlik elde edilmesine yardımcı olurlar [1-4]. Servis ömrünün başlarında yüksek performans sergileyen asfalt kaplamalarda, çeşitli dış ve iç etkilerden dolayı zamanla bozulmalar meydana gelmektedir. Bu etkiler ağır ve tekrarlı trafik yükleri, değişken iklim koşulları, özellikle çok düşük ve yüksek sıcaklıklar, çevresel faktörler, kimyasal maddeler olabilmekle birlikte, inşaat ve proje aşamasındaki eksiklikler de önem arz etmektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda bu sebeplerden dolayı zamanla kalıcı deformasyonlar, termal çatlaklar, düşük sıcaklık çatlakları, yorulma çatlakları ve soyulmalar gibi çeşitli bozulmalar meydana gelmektedir [5-8]. Bitümlü sıcak karışımların serilip sıkıştırılması ile elde edilen asfalt kaplamaları servis ömrü boyunca olumsuz yönde etkileyen bu bozulmaların en önemli sebeplerinden biri bağlayıcı özellikleridir [9-11]. Saf bitümlü bağlayıcılar yüksek ve düşük sıcaklıklara karşı gerekli toleransı çoğu iklim koşulunda gösterememekle birlikte, yeterli elastikiyet ve mukavemet özelliklerini de ağır ve tekrarlı trafik yükleri karşısında sağlayamamaktadır. Bu durumda asfalt kaplamaların servis ömrü azalmakta, bakım ve onarım maliyetleri artmaktadır [12-14]. Bu sebeple bitümlü bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklık özelliklerini, kalıcı deformasyonlara karşı dayanımlarını, stabilitelelerini ve bunun gibi performans kabiliyetlerini geliştirmek veya istenen şartlara uygun

* Sorumlu yazar: bahadir.yilmaz@btu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-8328-5328

hale getirmek suretiyle servis ömrünü uzatmak amacıyla çeşitli katkı malzemeleri ilave edilerek modifiye bitümler elde edilmektedir. Bu şekilde asfalt kaplamaların ilk yapım maliyetleri artmasına rağmen servis ömrü boyunca harcanan toplam para açısından bakıldığında fayda sağlanmaktadır [15-18]. Günümüzde modifiye bitüm elde etmek için çoğunlukla polimer malzemeler kullanılmakla birlikte, kauçuk, siyah karbon, çözücüler, elyaflar, lifler, organik veya inorganik atık malzemeler, yağlar gibi çeşitli katkıları da tercih edilebilmektedir [19-24].

Katkı olarak özellikle karbon bazlı maddelerin kullanılmasının bitümlü bağlayıcıların fiziksel, reolojik, termal ve elektriksel iletim, durabilite gibi özelliklerini artırdığı bilinmektedir. Ayrıca bitümün kimyasal yapısı hidrokarbonların kompleks bir karışımı olduğundan karbon bazlı katkıları bitümle iyi bir kimyasal ilişki oluşturarak uyumsuzlukların önüne geçmekte, modifikasyon işlemi sırasında meydana gelebilecek topaklanma, homojen yapı oluşumu gibi çeşitli problemlerin oluşumunu engellemektedir.

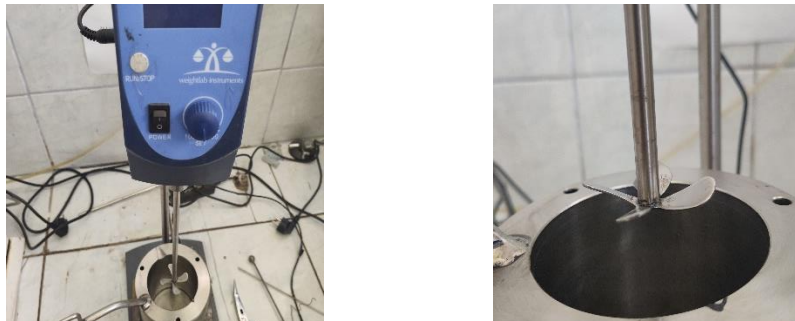
Bugüne kadar bitümlü bağlayıcılarda gerek katkı malzemesi [25-27] gerekse filler malzemesi [28-29] olarak çeşitli tip, üretim şekilleri ve kaynaklardan elde edilen karbon kullanılmıştır. Öğütülmüş araç lastiklerinin piroliz işleminden geçirilmesi sonucu elde edilen karbon siyahı bitümlü bağlayıcılara katkı olarak kullanılmış ve bitümün rijitliğini artırarak tekerlek izine karşı dayanım parametrelerini de geliştirmiştir [30]. Notani ve ekibinin yapmış oldukları çalışmada bitüm katkısı olarak karbon siyahı kullanılmış ve bazı fiziksel ve reolojik özelliklerini geliştirdiği belirlenmiştir [11]. Cong ve diğ., yaptıkları çalışmada bitümlü bağlayıcılara katkı olarak en yaygın kullanılan madde olan SBS ve karbon siyahını birlikte kullanmış ve bağlayıcının yüksek sıcaklık performans özelliklerini, termal iletkenliğini artırırken depolama stabilitesi ve elektriksel hassasiyetini azalttığı sonucuna varmışlardır [31].

Son zamanlarda endüstriyel alanlardaki kirliliklerin temizlenmesinde, gıda sanayinde, ilaç sektöründe, kozmetik sektöründe aktif karbon kullanılmaktadır [32,33]. Aktif karbon, karbon içeren çok çeşitli organik ve inorganik malzemelerden, hindistan cevizi, meyve çekirdeği, fındık kabuğu vb., elde edilebilmektedir [34]. Aktif karbon çeşitli alanlarda tercih edilmesinin yanı sıra bitümlü bağlayıcılarda da katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Seyrek ve ekibinin yapmış olduğu çalışmada tarımsal atıklardan elde edilen aktif karbon bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. %5,10 ve 15 oranlarında katkı kullanılarak elde edilen modifiye bitümlerin reolojik özellikleri ve bitümlü sıcak karışımların da mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde BBR, DSR, dönel viskozimetre (RV), yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, aktif karbonun bitümlü bağlayıcılarda katkı olarak kullanılması ile bitümün rijitliğinin ve yüksek sıcaklık performanslarının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca karışımın stabilite, rijitlik ve kalıcı deformasyon değerlerini artırmıştır [35].

Bu çalışmada %5, %10, %15 ve %20 oranlarında manyetik aktif karbon (MAK) ilave edilerek modifiye bitümler elde edilmiş, saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde geleneksel bağlayıcı deneyleri, dönel viskozimetre (RV), DSR ve RTFO deneyi uygulanmış ve fiziksel, reolojik özellikleri değerlendirilmiştir.

2. Malzeme ve Metot

Saf bağlayıcıya %5, %10, %15 ve %20 olmak üzere dört farklı oranda manyetik aktif karbon (MAK) ilave edilerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalara göre katkı malzemesi saf bitüme yavaş yavaş eklenerek, 1000 devir/dakika hızda 180°C sabit sıcaklıkta bir saat süre ile karıştırılmıştır [35-37]. Modifiye mikseri ve modifiye işleminde kullanılan dört bıçaklı pervane Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Modifiye mikseri ve dört bıçaklı pervane

2.1. Bitümlü Bağlayıcı

Çalışmada bağlayıcı olarak TÜPRAŞ Batman rafinerisinden alınan B 160/220 sınıfı bitüm kullanılmıştır. Saf bağlayıcının fiziksel özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Saf bağlayıcının fiziksel özellikleri

Özellikler	Değer	Şartname
Penetrasyon (25°C, dmm)	176.7	ASTM D-5
Yumuşama Noktası (°C)	43.7	ASTM D-36
Düktilite (25°C, cm)	100+	ASTM D-113
Parlama Noktası (°C)	223	ASTM D-92
Özgül ağırlık (25°C, g/cm ³)	1.018	ASTM D-70
Viskozite (135°C, cP)	275	ASTM D-4402
Viskozite (165°C, cP)	100	ASTM D-4402

2.2. Manyetik Aktif Karbonun Özellikleri

Çalışmada kullanılan manyetik aktif karbonun fiziksel özellikleri ve görüntüsü sırasıyla Tablo 2 ve Şekil 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Manyetik aktif karbonun özellikleri

Özellik	Değer
Görünür yoğunluk (g/cm ³)	1.2814
Gerçek yoğunluk (g/cm ³)	2.52245
BET yüzey alanı (Mikro+Mezo)(m ² /g)	310.9
Mikroporyüzey alanı (m ² /g)	210.1
Mezoporyüzey alanı (m ² /g)	100.8
Langmuiryüzey alanı (m ² /g)	495.3
Por hacmi (Mikro+Mezo)(cm ³ /g)	0.4523
Mikroporhacmi (cm ³ /g)	0.2957
Mezoporhacmi (cm ³ /g)	0.1866
Porçapı (Å)	24.9
Partikülboyutu [Ağırlıklıortalama(D[4,3]), µm]	11.552
Partikülboyutu [d(0.1), µm]	2.256
Partikülboyutu [d(0.5), µm]	11.820
Partikülboyutu [d(0.9), µm]	23.456



Şekil 2. Manyetik aktif karbonun görüntüsü

2.3. Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri

Penetrasyon deneyi TS 118 EN 1426 standardına uygun olarak, asfaltın sertlik ve kıvam özelliklerini belirlemek üzere yapılmaktadır [38]. Deney sonucu elde edilen penetrasyon değeri, standart özelliklere sahip bir iğnenin, yine standart bir süre içerisinde, belirli bir sıcaklıktaki bitüme dikey doğrultuda batma miktarıdır. Bulunan penetrasyon değerinin birimi 0,01 cm'dir. Standarttaki değerler, 25°C sıcaklık, 5 saniye süre ve 100 gr'lık yüküdür.

Yumuşama noktası deneyi, TS 120 EN 1427 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu deney bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında dayanımlarının bir ölçütü olan yumuşama noktası değerini belirlemek için yapılan bir deneydir [39]. Deneyde elde edilen yumuşama noktası değeri üzerinde bir bilye bulunan standart bir halka içerisindeki bitümün belirli bir hızda ısıtılması suretiyle malzemenin yumuşaması sonucu malzemenin sehpanın alt tabanına temas ettiği anda cihazda okunan sıcaklık değeridir.

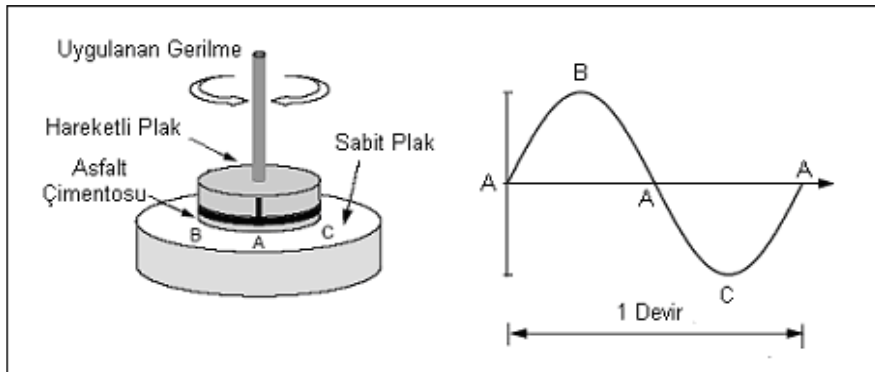
Bağlayıcının ısı hassasiyetlerini belirlemek için Penetrasyon İndeksi (PI) kullanılmaktadır. Penetrasyon İndeksi, standart penetrasyon ve yumuşama noktası verileri ile hesaplanmaktadır (Denklem 1). Formüldeki P_{25} , 25°C'deki penetrasyon deneyi sonucunu, T_{YN} ise yumuşama noktası deney sonucunu belirtmektedir. Bitümlü bağlayıcıların ısı hassasiyetlerinin artmasıyla PI değerleri azalmaktadır.

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25}$$

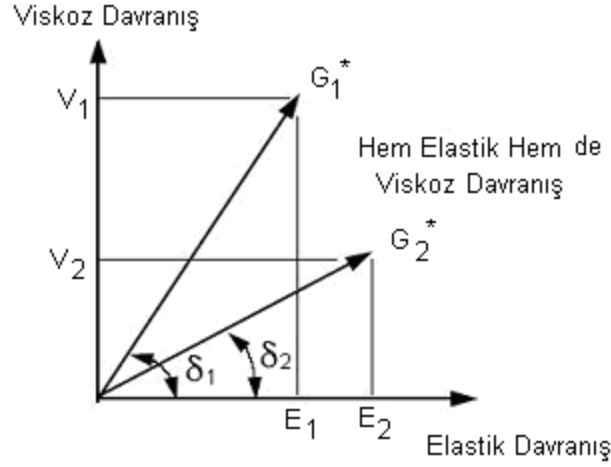
$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}$$
(1)

2.4. Dinamik Kayma Reometresi Deneyi (AASHTO TP5)

DSR deneyinde bir alt tabaka ve hareketli üst tabaka arasında konulan bitümlü bağlayıcıya sinüsoidal gerilmeler uygulanmaktadır (Şekil 3). DSR deneyi, asfalt çimentosunun kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerini belirlemek amacıyla yapılmakta ve bitümlü bağlayıcının elastik tepkilerini belirlemektedir. G^* , bitümlü bağlayıcıda meydana gelen tekrarlı kayma gerilmeleri sebebiyle oluşan deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Hem faz açısı hem de G^* değerleri mevcut ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir (Şekil 4). Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını değerlendirmek amacıyla DSR cihazında 1000 mikron yükseklikte ve 25mm çapında olmak üzere 1.59Hz (10rad/s) frekans altında saf ve RTFOT ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfı (PG) değerleri belirlenerek, G^* , δ ve $G^*/\sin \delta$ değerleri elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında yaşlandırmaya tabi tutulmamış olan B 160/220 bitüme beş farklı sıcaklıkta DSR deneyi uygulanmış ve bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfı belirlenmiştir. Ayrıca, bitümlü bağlayıcılar üzerinde 40°C, 50°C, 60°C ve 70°C sıcaklıklarda, 0.01-10 Hz aralığında gerilme kontrollü olarak frekans taraması yapılmıştır. Belirlenen sıcaklıkta RTFOT ile yaşlandırmaya tabi tutulmuş bağlayıcılar üzerinde de aynı deney gerçekleştirilerek şartname sınırlarını aşip aşmadığı kontrol edilmiştir. Superpave şartnamesine göre saf bitümlü bağlayıcıya uygulanan DSR deneylerinde tekerlek izi değerinin en az 1.0 kPa, RTFOT'a tabi tutulmuş bağlayıcılarda ise 2.20 kPa olması gerekmektedir.



Şekil 3. DSR Deneyinin yapılış şekli ve gerilmelerin doğrultuları [40]



Şekil 4. Bitümün viskoelastik özelliği [41]

2.5. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

ASTM D 4402 standardına göre gerçekleştirilen bu deneyde amaç bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklıklarda akışkanlık karakteristiklerini belirlemektir. Bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki viskozite değerleri, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarına maruz kaldıkları esnada bağlayıcıların yeterli akışkanlığa sahip olup olmadıklarının tespit edilmesi amacıyla elde edilmektedir. Deneyde, bağlayıcı içerisine 20 rpm hıza sahip bir mil batırılarak bu milin hareketiyle dönmeye karşı direnç belirlenmektedir ve bu şekilde viskozite değerleri elde edilmektedir. Saf bağlayıcıya uygulanan RV deneyinde standart olarak 135°C'deki viskozite değerlerinin 3000 cP'yi geçmemesi gerekmektedir.

2.6. Dönel İnce Film Halinde Yaşlandırma Deneyi (AASHTO T240 / ASTM D2872)

Karıştırma işlemi sırasında bitümlü bağlayıcının yaşlanması olayının temsil edildiği deneydir. Bu deneyde bitümün hazırlandığı platformdaki karıştırma işlemi esnasında etkisinde olduğu sertleşme olayını temsil edecek biçimde, ince film halinde hareket eden asfalt bağlayıcıların üzerinde sıcaklık ve havanın etkisi bir arada değerlendirilmektedir.

Deney, 163°C sıcaklığa ayarlı etüve 8 adet şişe yerleştirilerek ve TS EN 12607-1'e göre gerçekleştirilmektedir. İçerisine 35 gram bitüm doldurulan her bir şişe düşey ekseninde dakikada 15 devir yaparak 75 dakika döndürülmektedir. Dönme sırasında hava üfleyen bir mekanizma ile şişelere akışı 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklık ile birlikte bağlayıcı şişeleri ince bir film tabakası halinde kaplamakta ve yaşlanma olayının meydana gelmesi kolaylaşmaktadır.

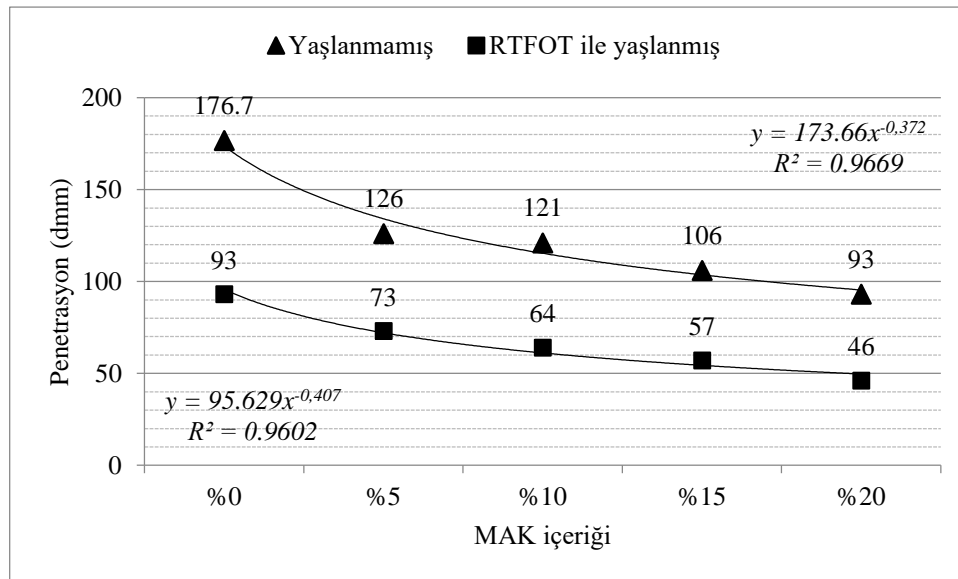
3. Deneysel Sonuçlar

3.1. Geleneksel Deney Sonuçları

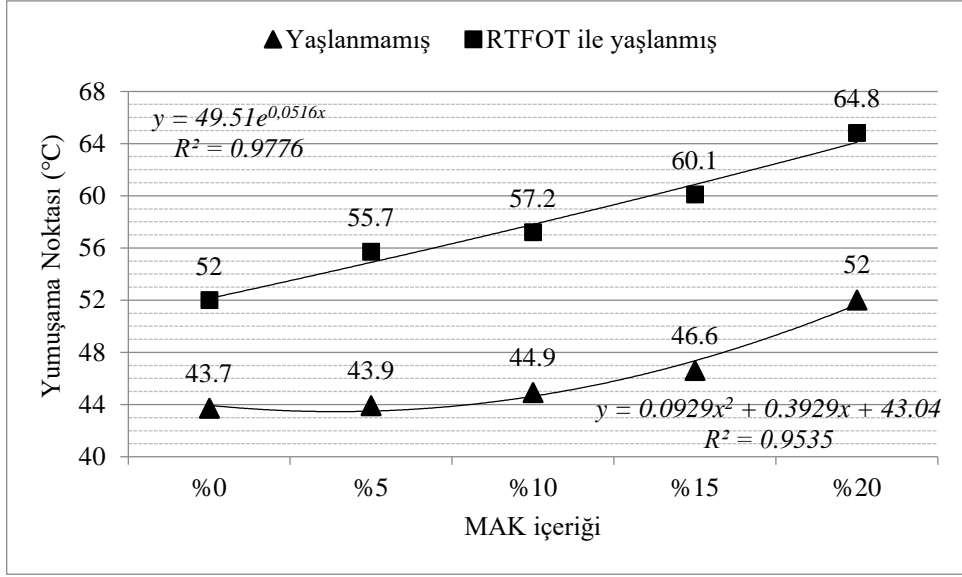
Deneyleler	%0	%5	%10	%15	%20
Yumuşama Noktası (°C)	43.7	43.9	44.9	46.6	52
Penetrasyon (dmm)	176.7	126	121	106	93
Penetrasyon İndeksi (PI)	0.89	-0.40	-0.21	-0.11	0.98
Düktilite (cm)	100	100	100	100	100
Parlama Noktası (°C)	223	226	225	229	231
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	1.018	1.022	1.024	1.03	1.032
RTFOT sonrası					
Yumuşama Noktası (°C)	52	55.7	57.2	60.1	64.8
Penetrasyon (dmm)	93	73	64	57	46
Kalıcı Penetrasyon (%)	52.63	57.94	52.89	53.77	49.46
Penetrasyon İndeksi (PI)	0.98	1.09	1.13	1.39	1.73
Yumuşama noktası farkı, ΔS (°C)	8.3	11.8	12.3	13.5	12.8
Düktilite (cm)	+100	100	100	100	98
Kütle Kaybı (%)	0.84	0.44	0.48	0.49	0.53

Tablo 3. Saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların geleneksel deney sonuçları

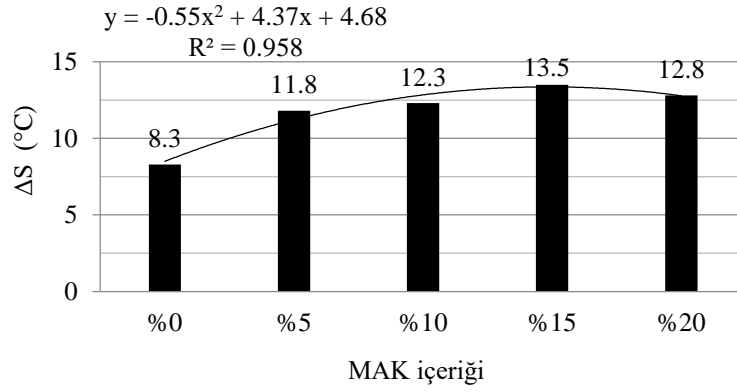
Yaşlanmamış bağlayıcının penetrasyon değeri %5, %10, %15 ve %20 katkı içeriğinde saf bağlayıcıya göre sırasıyla %28.7, %31.5, %40.0 ve %47.4 oranlarında azalırken, yumuşama noktası değeri ise yine saf bağlayıcıya göre sırasıyla %0.5, %2.7, %6.6 ve %19.0 oranlarında artmıştır. Bu sebeple, MAK ilavesinin bitümlü bağlayıcının kıvamını artırdığı, sıcaklık hassasiyetini ise düşürdüğü sonucuna varılmaktadır. RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcının penetrasyon değeri %5, %10, %15 ve %20 katkı içeriğinde saf bağlayıcıya kıyasla sırasıyla %21.5, 31.1, %38.7 ve %50.5 oranlarında azalırken, yumuşama noktası değerleri ise %7.1, %10.0, %15.6 ve %24.6 oranlarında artmıştır (Şekil 5 ve 6). Saf bitümlü bağlayıcının kalıcı penetrasyon değeri %52.63 olarak belirlenmiş, MAK içeriği %5 iken %57.94 değeri elde edilmiş ve diğer oranlarda azalarak %20 katkı içeriğinde %49.46'a kadar düşmüştür (Tablo 3). Şekil 7'de gösterilen ΔS değerlerine göre MAK oranı arttıkça yumuşama noktası sıcaklık farklarının, saf bitümlü bağlayıcıya kıyasla artış gösterdiği ve bu artışın en yüksek %62.65 oranında %15 MAK ilavesinde meydana geldiği görülmektedir. Bunun yaşlandırma sürecinde bitümün yapısında bulunan fonksiyonel gruplarındaki moleküllerin, yapısal değişime uğradığının bir göstergesidir.



Şekil 5. Yaşlandırılmamış ve RTFOT ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcıların penetrasyon değerleri

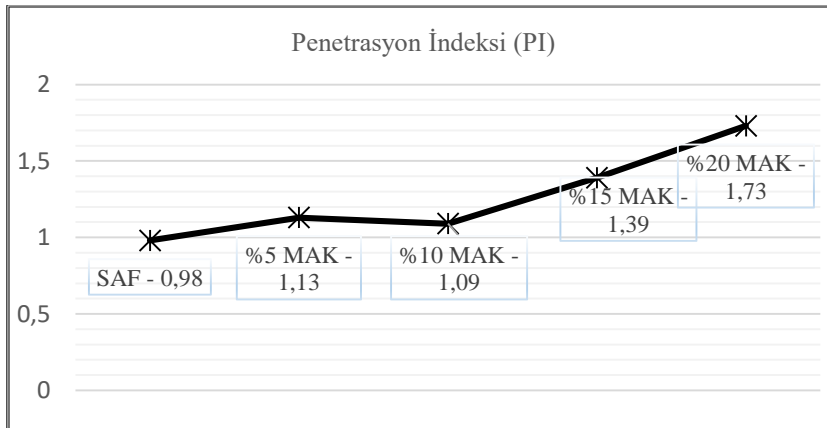


Şekil 6. Yaşlandırılmamış ve RTFOT ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri



Şekil 7. Bitümlü bağlayıcıların RTFOT ile yaşlanma öncesi ve sonrası yumuşama noktası sıcaklık farkları

Saf ve modifiye bağlayıcıların Penetrasyon İndeksi sonuçları Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Penetrasyon İndeksi (PI) değerleri

Şekil 8 incelendiğinde MAK ilave edilmesiyle sıcaklık hassasiyetlerinin bir ölçüsü olan PI değerlerinde genel bir artış olduğu görülmektedir. Bu durum MAK ilavesi ile bitümlü bağlayıcıların daha kıvamlı olup, düşük sıcaklığa sahip bölgelerde tercih edilebileceğini göstermektedir.

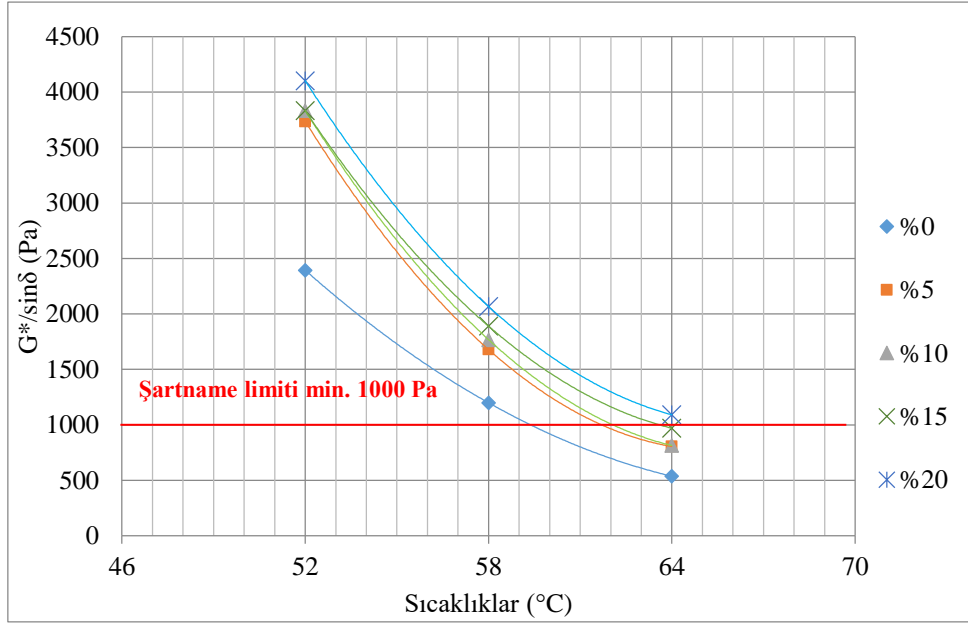
3.2. Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları

Yaşlandırılmamış saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde uygulanan DSR deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Yaşlandırılmamış bitümlü bağlayıcıların DSR deney sonuçları

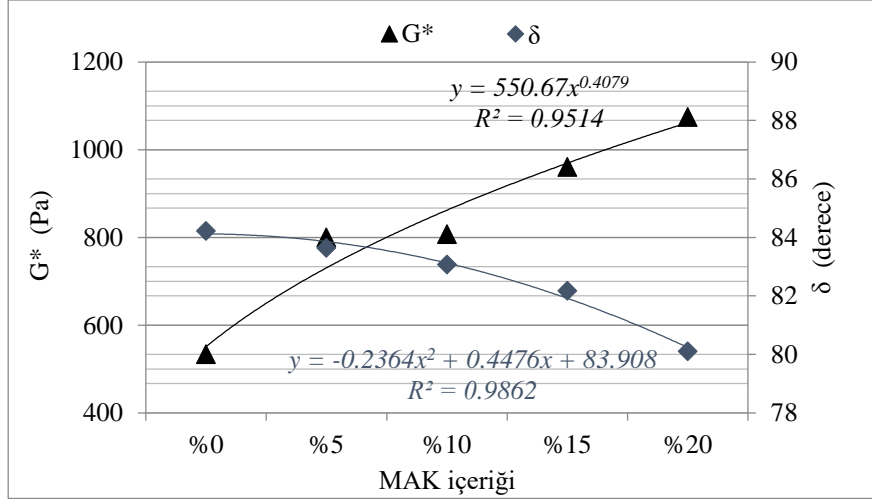
MAK içeriği	Sıcaklık (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	RTFOT sonrası G*/sin δ (Pa)	Sınır Sıcaklık (°C)	Performans Aralığı
0%	52	2345.3	78.42	2394	9430	59.4	PG 58-Y
	58	1189.5	82.80	1199	4063		
	64	534.3	84.23	537	1934		
5%	52	3651.9	77.82	3736	11893	61.6	PG 58-Y
	58	1659.2	81.20	1679	5271		
	64	800.5	83.65	805	2418		
10%	52	3761	78.93	3832	13024	62.0	PG 58-Y
	58	1747.2	81.21	1768	6672		
	64	807.7	83.08	814	3160		
15%	52	3734	77.01	3832	13071	63.5	PG 58-Y
	58	1860	79.82	1890	6899		
	64	961.2	82.18	970	3355		
20%	52	3984.8	76.27	4102	15066	64.1	PG 64-Y
	58	2026.4	78.63	2067	7152		
	64	1074.8	80.11	1091	4062		

Saf ve MAK modifiyeli bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfları (PG), Tablo 4'te faz açısı (δ), kompleks kayma modülü (G*) ve tekerlek izi dayanım parametreleri (G*/sin δ) değerleri ile birlikte verilmiştir. MAK katkı miktarındaki artış ile aynı sıcaklıktaki G* ve G*/sin δ değerlerinin arttığı görülmüş ve %20 MAK ilavesi ile bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfı yükselmiştir. Ayrıca, %15 MAK katkılı bağlayıcı 1000 Pa şartname limitini 63.5°C sıcaklıkta sağladığı ancak 70°C sıcaklığı sağlayamadığından bir üst performans sınıfında değerlendirilememiştir. En az katkı oranı içeren (%5) bağlayıcıya bakıldığında bile 3 sıcaklık değerinde de G*/sin δ değerlerinin arttığı, dolayısıyla tekerlek izine karşı dayanımının saf bağlayıcıya kıyasla geliştiği açıkça görülmektedir. Performans sınıfının saf bağlayıcıya göre 58°C'den 64°C'ye yükselmesi ile, %20 MAK ilavesinin asfaltın elastik özelliklerini artırarak tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımına katkı sunduğu sonucuna varılmıştır.



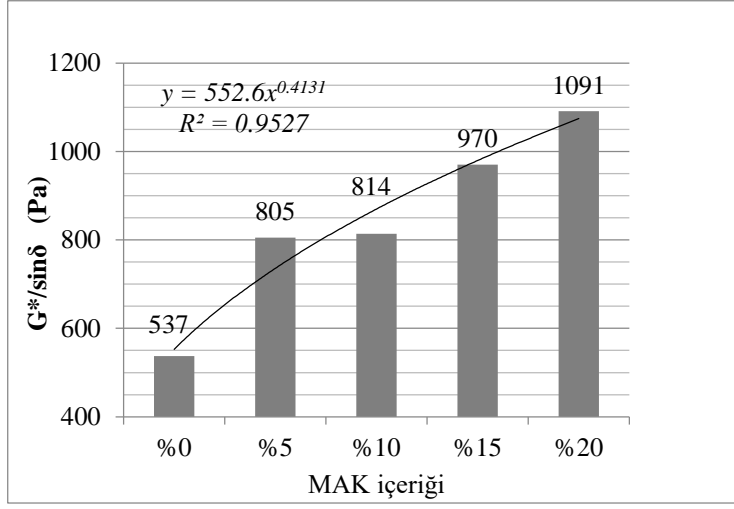
Şekil 8. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi dayanım parametre değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi

Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özelliklerinden dolayı, performanslarının değerlendirilmesinde en önemli parametrelerden biri sıcaklıktır. Şekil 9 incelendiğinde artan sıcaklık ile birlikte tekerlek izi dayanım parametresi olan $G^*/\sin \delta$ değerlerinin azaldığı, ancak MAK ilavesi ile bu değerlerin kayda değer miktarda arttığı görülmektedir.

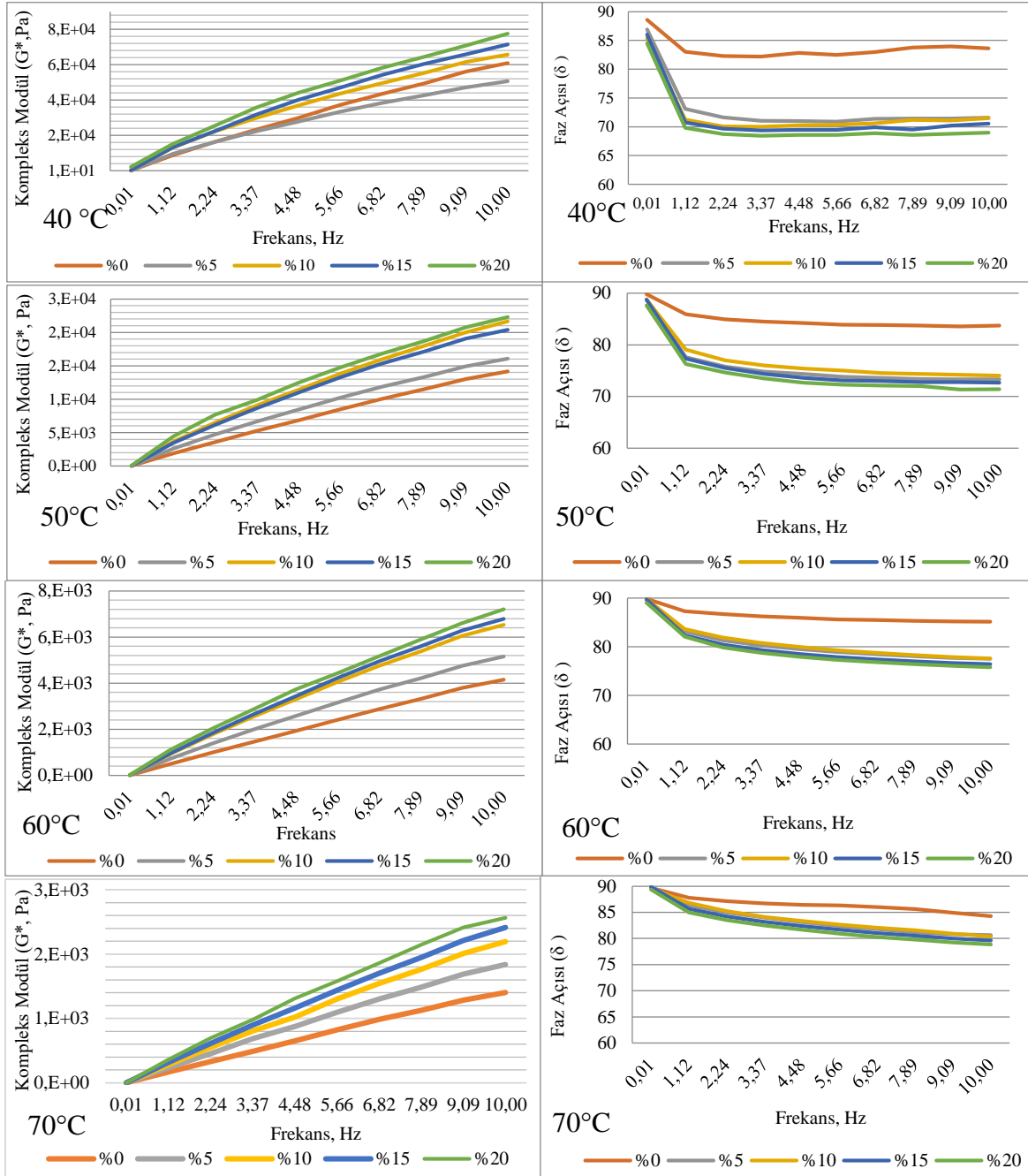


Şekil 10. Bitümlü bağlayıcıların 64 °C sıcaklıktaki kompleks kayma modülü ve faz açısı değerleri

Bitümlü sıcak karışımlarda bağlayıcı olarak kullanılan bitüm, karışımdaki deformasyonun dağıtımında etkilidir. Bu sebeple elastikiyet özellikleri önem arz etmektedir. 64°C sıcaklıktaki kompleks kayma modülü G^* ve faz açısı δ değerleri incelendiğinde (Şekil 10 ve 11), istenildiği gibi MAK katkı oranı arttıkça G^* değerleri artmış, δ değerleri azalmış, dolayısıyla bu ters ilişkiden ötürü bitümün elastik özellikleri artmıştır. Bu sayede, bitümlü bağlayıcıya MAK ilavesi ile kalıcı deformasyonlara karşı dayanım kazanılmıştır. Faz açısının küçük olması, başka bir deyişle deformasyonda meydana gelecek gecikmelerin az olması, bitümlü bağlayıcının o kadar elastik davranması demektir. Ek olarak, Şekil 11 incelendiğinde 64°C'de $G^*/\sin \delta$ değerlerinin arttığı görülmüş ve bu durumun geleneksel bağlayıcı deneylerinin sonuçlarına göre bitümün kıvamının artması ile de örtüşmüştür.



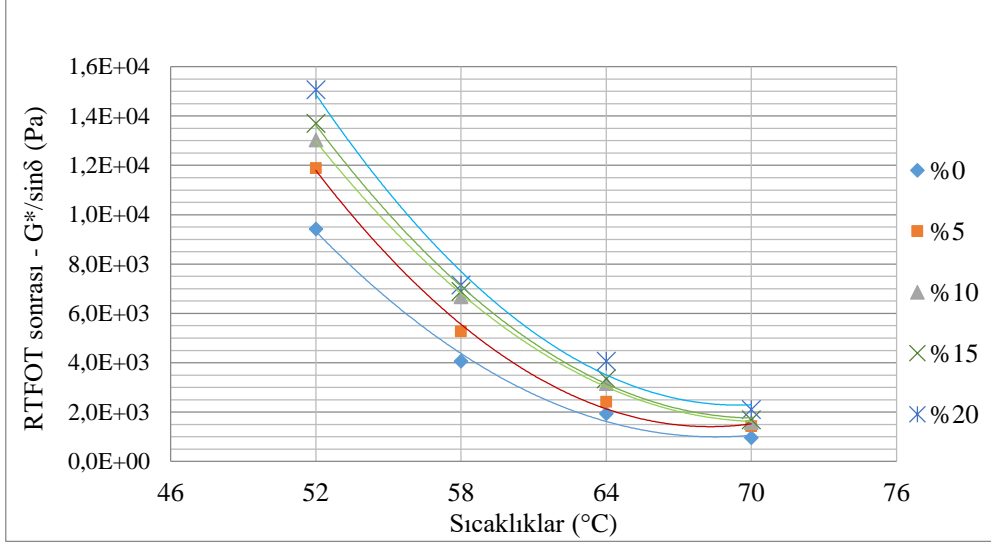
Şekil 11. Bitümlü bağlayıcıların 64 °C sıcaklıktaki tekerlek izi dayanım parametresi değerleri



Şekil 12. Bitümlü bağlayıcıların 0.01-10 Hz aralığındaki frekans tarama, kompleks kayma modülü ve faz açısı değerleri

Çalışma kapsamında saf ve MAK modifiyeli bitümlü bağlayıcılara uygulanan frekans taraması değerlerine göre bitümlü bağlayıcıların çeşitli koşullardaki reolojik tepkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre genel olarak frekansın ve MAK içeriğinin artması ile bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi dayanımları artmıştır (Şekil 12). Düşük frekans ile yükleme yapılması, yükleme süresinin uzun olması ve dolayısıyla yavaş yükleme hızını temsil ederken, yüksek frekans ile yükleme yapılması yükleme süresinin kısa ve yükleme hızının yüksek olması anlamına gelmektedir. Bu sebeple, frekans arttıkça bitüm elastik davranışlar sergilemektedir. G* değerleri de bunu doğrular niteliktedir. Şekil 12 incelendiğinde deney sıcaklığının artması ile kompleks kayma modülü (G*) değerlerinin azaldığı görülmektedir. Örneğin 40°C ve 10Hz frekans altında %10 MAK modifiyeli bitümün G* değeri 5610 Pa iken, 70°C'de 1837 Pa'dır. Faz açısı değerleri incelendiğinde düşük frekanslarda yükleme

yapılırken azalmış, fakat frekans arttıkça düzenli bir azalma görülmeyp, neredeyse sabit kalmıştır. Fakat katkı oranı arttıkça, başlangıç frekanslarındaki düşüş daha yumuşak hale gelmiş ve ilk frekans ile son frekans arasındaki fark azalmıştır. Bu durum, katkı oranının artmasının hızlı yüklemelere karşı bitümlü bağlayıcının elastik davranışlarını geliştirdiğini göstermektedir.

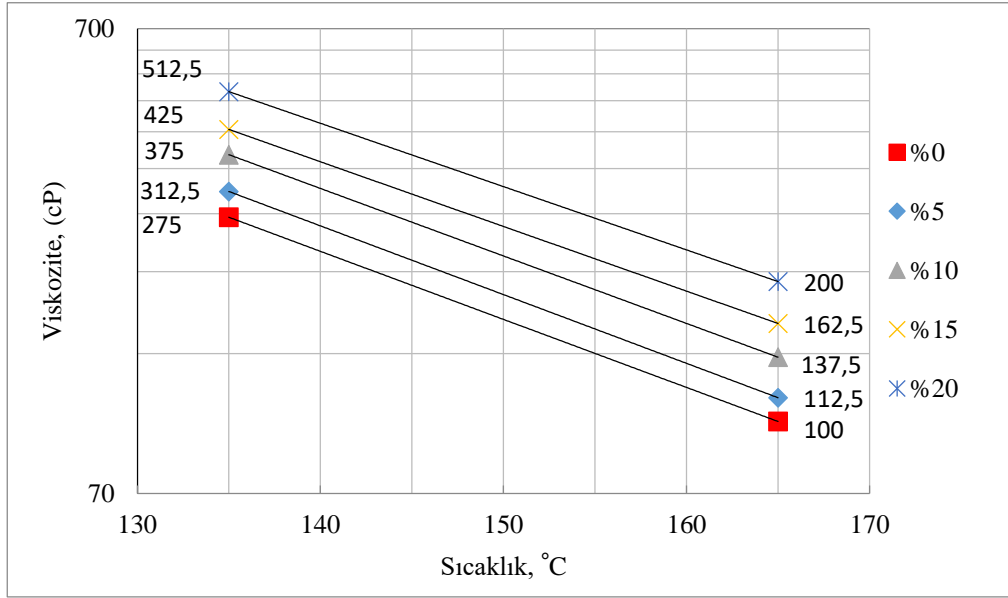


Şekil 13. Bağlayıcıların RTFOT sonrası tekerlek izi dayanım parametresi değerleri

Superpave şartnamesine göre RTFOT sonrası bitümlü bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin 2200 Pa'm altına düşmemesi gerekmektedir. Şekil 13 incelendiğinde 52°C, 58°C ve saf bağlayıcı hariç 64°C'de tüm bağlayıcılar şartname limitini sağlamıştır. Ayrıca RTFOT sonrası $G^*/\sin \delta$ sonuçlarına bakıldığında %5, %10, %15, %20 MAK ilavesi ile bu değerlerin saf bağlayıcıya göre sırasıyla 52°C'de %26.11, %38.11, %45.29, %59.76; 58°C'de %29.73, %64.21, %69.80, %98.23; 64°C'de %25.02, %63.39, %73.47, %110.03 oranlarında artışlar tespit edilmiştir. Özellikle %20 MAK ilavesi ile yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine karşı dayanım parametrelerinde önemli düzeyde artışlar olmuştur.

3.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları

Manyetik aktif karbon ilavesi, RV deneyinin gerçekleştirildiği sıcaklık değerlerinin tamamında bitümlü bağlayıcının viskozite değerlerini artırmıştır. Katkı oranı ve viskozite doğru orantılı olarak artmıştır. Saf bitümlü bağlayıcının 135°C'deki viskozite değerleri %5, %10, %15, %20 katkı içeriğinde sırasıyla %13.64, %36.36, %54.55, %86.36 ve 165°C'de ise %12.50, %37.50, %62.50, %100 oranlarında artmıştır. Şekil 14 ve Tablo 5 incelendiğinde bütün katkı içeriklerinde, 135°C'deki viskozite değerleri 3000 cP değerinin altında kalarak şartname limitini sağlamıştır. MAK modifiyeli bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları saf bitüme göre fazla çıkmıştır. Sonuçlara göre, katkı maddesinin saf bitümün kıvamını artırarak tekerlek izi direncini yükselttiği ve bitümün işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemediği anlaşılmaktadır.



Şekil 14. Logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği

Tablo 5. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

MAK içeriği	Karıştırma Sıcaklığı (°C)		Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)	
%0	146	153	137	138
%5	150	152	141	142
%10	156	162	141	147
%15	160	161	145	152
%20	165	166	151	158

4. Sonuçlar

Bu çalışmada B 160/220 sınıfı saf ve MAK modifiyeli bitümlü bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla, yaşlandırılmamış ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde yumuşama noktası deneyi, penetrasyon deneyi, dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi ve dönel viskozimetre (RV) deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlara göre:

-Penetrasyon deney sonuçlarına göre; artan katkı içeriği ile birlikte saf bağlayıcının kıvamının ve sertliğinin arttığı belirlenmiştir.

-Yumuşama noktası deney sonuçlarına göre; saf bağlayıcının yumuşama noktası sıcaklığının artan katkı içeriğiyle paralel olarak yükseldiği gözlenmiştir.

- Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde saf bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin azaldığı tespit edilmiştir.

-RV deney sonuçlarına göre; saf bağlayıcının viskozite değerlerinin MAK ilavesi ile arttığı ve 135°C'deki şartname limitini aşmadığı görülmüştür.

-DSR deney sonuçlarına göre; MAK ilavesi oranının artışına bağlı olarak saf bağlayıcının, kompleks kayma modül değerlerinin arttığı, faz açısı değerlerinin azaldığı ve böylelikle elastik özelliğini iyileştirerek tekerlek izine karşı dayanımını artırdığı tespit edilmiştir.

Teşekkür

Manyetik Aktif Karbon (MAK) katkısının sentezlenmesindeki katkılarından dolayı Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya ve Proses Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Hasan Arslanoğlu'na teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Lav AH, Lav MA. Shell Bitüm El Kitabı. İsfalt Bilimsel Yayınları, No:3, İstanbul, 334s.
- [2] Geçkil T, Önal Y, İnce CB. Atık Polietilen Tereftalat (PET) ile Modifiye Edilmiş Saf Bitümün Fiziksel, Morfolojik ve Isıl Özellikleri. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi 2020; 32(1): 157-166.
- [3] Tunç A. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 2007.
- [4] Furtana B, Yalçın E, Kök BV, Yılmaz M. EVA Bazlı Reçine Modifiyeli Bitümlü Karışımların Mekanik Özellikler Bakımından SBS Modifikasyonu ile Karşılaştırılması. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi 2019; 31(2): 497-506.
- [5] Yılmaz M, Kök BV. Ferrokrom Cürufu Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Dergisi 2008; 12(3).
- [6] Yılmaz M, Kök BV, Erdoğan Yamaç Ö. Bitüm Modifikasyonunda Stiren-Butadien-Stiren ile Gilsonit'in Birlikte Kullanılmasının Bitümlü Sıcak Karışımların Kalıcı Deformasyon Dayanımına Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Dergisi 2018; 22(2): 811-822.
- [7] Francken L. Bituminous Binders and Mixes. Rilem Reports, E&FN Spon, London, 1998.
- [8] Yılmaz M, Kök BV, Yalçın E. Farklı Katkılar İçeren Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Ömürlerinin İncelenmesi. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi 2017; 29(2): 173-183.
- [9] Geçkil T, Seloğlu M. Reaktif Terpolimerin Bitümün Kıvamına ve Sıcaklık Duyarlılığına Etkisi. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi 2019; 31(1): 203-213.
- [10] Rahbar-Rastegar R, Daniel JS, Dave EV. Evaluation of viscoelastic and fracture properties of asphalt mixtures with long-term laboratory conditioning. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 2018; 2672(28): 503-513.
- [11] Notani MA, Arabzadeh A, Satvati S, Tabesh, MT, Hashjin NG, Estakhri S, Alizadeh M. Investigating the high-temperature performance and activation energy of carbon black-modified asphalt binder. SN Applied Sciences 2020; 303.
- [12] Zhang J, Sun C, Li, P. Effect of different viscous rejuvenators on chemical and mechanical behavior of aged and recovered bitumen from RAP. Construction and Building Materials 2020; 239.
- [13] Kök BV, Yılmaz M, Şağbanşua L. Effect of hot mixture modification on overall cost of the pavement. The 2015 WEI International Academic Conference Proceedings, 18-20 June 2015; Prague, Czech Republic.
- [14] Erkuş Y, Kök BV, Yılmaz M. Evaluation of performance and productivity of bitumen modified by three different additives. Construction and Building Materials 2020; 261.
- [15] Airey GD. Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. Construction and Building Materials 2002; 16(8): 473-487.
- [16] Kök BV, Yılmaz M, Guler M. Evaluation of high temperature performance of SBS+Gilsonite modified binder. Fuel 2011; 90(10): 3093-3099.
- [17] Topal A. Evaluation of the properties and microstructure of plastomeric polymer modified bitumens. Fuel Processing Technology 2010; 91(1): 45-51.
- [18] Zhu, J, Birgisson B, Kringos N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. European Polymer Journal 2014; 54: 18-38.
- [19] Kök BV, Yılmaz M, Akpolat M. Evaluation of the conventional and rheological properties of SBS+Sasobit modified binder. Construction and Building Materials 2014; 63: 174-179.
- [20] Sengoz B, Isikyakar G. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. Construction and Building Materials 2008; 22(9): 1897-1905.
- [21] Polacco G, Berlincioni S, Biondi D, Stastna J, Zanzotto L. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. European Polymer Journal 2005; 41(12): 2831-2844.
- [22] Yalçın E, Baykara A, Yılmaz M, Kök BV. Irak ve Batman Bitümleri Kullanılan SEBS Modifiyeli Bağlayıcıların Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi 2020; 32(1): 95-104.
- [23] Oruç Ş, Yılmaz B, Sancak K. Effect of boron-containing additives on rheological properties of asphalt binder. Road Materials and Pavement Design 2015; 17(4): 810-824.
- [24] Oruç Ş, Yılmaz B. Improvement in performance properties of asphalt using a novel boron-containing additive. Construction and Building Materials 2016; 123: 207-213.
- [25] Casado-Barrasa R, Lastra-González P, Indacochea-Vega I, Castro-Fresno D. Assessment of carbon black modified binder in a sustainable asphalt concrete mixture. Construction and Building Materials 2019; 211: 363-370.
- [26] Chen Q, Wang C, Wen P, Wang, M, Zhao J. Comprehensive performance evaluation of low-carbon modified asphalt based on efficacy coefficient method. Journal of Cleaner Production 2018; 203: 633-644.

- [27] Tanzadeh R, Shafabakhsh G. Surface free energy and adhesion energy evaluation of modified bitumen with recycled carbon black (micro-nano) from gases and petrochemical waste. *Construction and Building Materials* 2020; 245.
- [28] Ahmetzade P, Alataş T, Geçkil T. Asfalt betonunda siyah karbonun filler olarak kullanımı. *İMO Teknik Dergi* 2008; 297: 4493-4507.
- [29] Ahmetzade P, Alataş T, Geçkil T. The effect of carbon black on the mechanical properties of asphalt mixtures. *Journal of Engineering and Natural Sciences* 2007; 25(2).
- [30] Alataş T, Yılmaz M, Kök BV, Çeloğlu ME, Akpolat M, Erdoğan Yamaç Ö, Yalçın E. Ögütülmüş araç lastiğinin ve piroliz işleminden sonra oluşan karbon siyahının bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 2018; 23(1): 311-328
- [31] Cong P, Xu P, Chen S. Effects of carbon black on the anti aging, rheological and conductive properties of SBS/asphalt/carbon black composites. *Construction and Building Materials* 2014; 52: 306–313.
- [32] Saygılı H. Yeni bir hammadeden üretilmiş karbonlu malzemenin yapısal, morfolojik ve gözenek özellikleri üzerine çalışmalar. *DÜMF Mühendislik Fakültesi Dergisi* 2017; 8(1): 245-252.
- [33] Açışlı Ö. Doum palm meyve kabuklarından aktif karbon üretimi ve karakterizasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2019; 16: 544-551.
- [34] Sayın ZE, Kumaş C, Ergül B. Fındık kabuğundan aktif karbon üretimi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2016; 16: 409-419.
- [35] Seyrek EŞ, Yalçın E, Yılmaz M, Kök BV, & Arslanoğlu, H. Effect of activated carbon obtained from vinasse and marc on the rheological and mechanical characteristics of the bitumen binders and hot mix asphalts. *Construction and Building Materials* 2020; 240.
- [36] Yılmaz M, Çeloğlu ME. Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures. *Construction and Building Materials* 2013; 44: 533–540.
- [37] Kök BV, Yılmaz M, Akpolat M. Effect of CR and FT-paraffin versus SBS modification in terms of conventional and rheological properties. *International Journal of Pavement Engineering* 2016; 18(12): 1052–1059.
- [38] TS 118 EN 1426, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-İğne Batma Derinliği. Ankara, Türk Standartları Enstitüsü, 2015.
- [39] TS 120 EN 1427, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Yumuşama Noktası Tayini-Halka ve Bilye Metodu. Ankara, Türk Standartları Enstitüsü, 2015.
- [40] Zaniwski JP, Pumphrey ME. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. Asphalt Technology Program, Morgantown, West Virginia, 2004. 107p.
- [41] McGennis RB, Shuler S, Bahia HU. Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-SA-94-069, Washington, DC., 1994.