

## Türkiye’de Sık Kullanılan Farklı Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlanmaya Bağlı Reolojik ve Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi

**\*Makale Bilgisi / Article Info**

Alındı/Received: 03.04.2024

Kabul/Accepted: 13.06.2024

Yayımlandı/Published: xx.xx.xxxx

### Investigation of the Rheological and Morphological Properties of Different Bituminous Binders Commonly Used in Türkiye Due to Aging

Abdulgazi GEDİK \* 

Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bitümlü bağlayıcıların zamanla yaşlanmasına bağlı olarak asfalt karışımlar elastikiyetini kaybederek daha gevrek bir yapıya dönüşebilmektedir. Dolayısıyla esnek kaplamalı yollarda birtakım bozulmalar, deformasyonlar ve çatlamlar meydana gelmektedir ki bu durum asfalt yolların planlanan hizmet ömrünü önemli ölçüde kısaltmaktadır. Bu nedenle yaşlanmanın bitümün viskoelastik davranışını nasıl etkilediğini anlamak ve yaşlanmayı engelleyecek ve/veya geciktirecek önlemler ve çeşitli ajanlar geliştirmek karayolu mühendisliğinde büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında yaşlanmanın Türkiye’de bitümlü karışımlarda sıkça kullanılan dört farklı penetrasyon dereceli bağlayıcının (B50/70, B70/100, B100/150 ve B160/220) reolojik ve mikro yapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Laboratuvar ortamında kısa ve uzun vadede yaşlandırılan bitüm numuneleri yeni nesil performans deneyleri (dönel viskozimetre, dinamik kesme reometresi ve kırış eğilme reometresi) ile test edilmiştir ve mikro yapıları yüksek çözünürlüklü elektron mikroskobu altında incelenmiştir. Sonuç olarak yaşlanmaya rağmen B50/70 bağlayıcısının tekerlek izi deformasyonuna karşı direncini; B160/220 bağlayıcısının ise düşük sıcaklıklarda meydana gelebilecek termal çatlaklara karşı dayanımını muhafaza edebileceği görülmüştür.

#### Abstract

As bituminous binders age over time, asphalt mixtures may lose their elasticity and become more brittle. Therefore, some deteriorations, deformations and cracks occur on flexible paved roads, which significantly shorten the planned service life of the asphalt roads. Therefore, understanding how aging affects the viscoelastic behavior of bitumen and developing measures and various agents to prevent and/or delay aging is of great importance in highway engineering. Within the scope of this study, the effects of aging on the rheological and microstructure of four different penetration degree binders (B50/70, B70/100, B100/150 and B160/220), which are frequently used in bituminous mixtures in Türkiye, were investigated. Bitumen samples aged in the laboratory environment in the short and long term were tested with new generation performance experiments (rotational viscometer, dynamic shear rheometer and beam bending rheometer) and their microstructures were examined under a high-resolution electron microscope. According to test results, it has been observed that despite aging, B50/70 can maintain its resistance against rutting deformation and B160/220 keeps its resistance to low temperature cracks.

**Anahtar Kelimeler** Bitümlü bağlayıcı; Yaşlanma; Reoloji; Morfoloji.**Keywords** Bituminous binder; Aging; Rheology; Morphology.

#### 1. Giriş

Asfalt betonundaki agregaları bir arada tutmak için kullanılan bitümlü bağlayıcılar; viskoelastik davranışları nedeniyle esnek yol kaplamalarının performansı ve hizmet ömrü üzerinde belirleyici bir role sahiptir (Zhang vd. 2011, Hosseinnazhad vd. 2019, Karahancer vd. 2020). Asfalt karışımlarda su geçirmez bir bariyer niteliğindeki bağlayıcı; yolun servis süresi boyunca trafik yüklerine ilaveten soğuk ve sıcak havalarda, don, güneş ışınları, yağmur ve kar yağışları ve rüzgâr gibi çeşitli çevresel faktörlere de sürekli maruz kalmaktadır (Gómez vd. 2013,

Tang vd. 2018, Feng vd. 2013). Bu etkenler bitümlü bağlayıcıların farklı ölçeklerde yaşlanmasına ve dolayısıyla asfalt yolun üstyapısında birtakım bozulmalara, çatlamalara, deformasyonlara ve ondülasyonlara neden olmaktadır (Mirwald vd. 2022, López-Montero vd. 2018).

Oldukça karışık bir mekanizması olan yaşlanma; asfalt yol kaplamasının maruz kaldığı çevresel faktörlerin tipi, süresi ve şiddetine bağlı olduğu kadar bitümün cinsi, kimyasal yapısı, moleküler bileşenlerinin cinsi, ağırlığı ve polaritesi gibi bağlayıcı ile ilgili birçok parametreye de bağlıdır (Fernández-Gómez vd. 2014, Androjić 2016). Onun

üzerinde farklı mekanizma bitüm yaşlanmasına neden olmakla birlikte bunlar arasında en önemlileri oksidasyon, buharlaşma ve yapısal sertleşme olarak belirtilmiştir (Omar vd. 2021, Airey 2003, Polo-Mendoza vd. 2022). İrreversibl bir mekanizma olan oksidasyon; havadaki oksijen ile bağlayıcının bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyon nedeniyle oluşmaktadır. Oksidasyona maruz kalan bitümün karbon-karbon zincirleri kırılarak oksijenle birleşmektedir ki bu durum bağlayıcının kimyasal bileşenlerini ve doymuş, aromatik, reçine ve asfaltten bileşenlerinin fraksiyonunu değiştirmektedir (Das vd. 2014). Daha spesifik olarak; oksitlenmeyle birlikte reçine ve aromatiklerin önemli bir kısmı asfaltene dönüşmektedir. Moleküler yapısı itibarıyla daha hafif olan reçine ve aromatiklerin oranının azalması ve daha fazla moleküler ağırlığı olan asfaltten oranının artması bağlayıcının gevrekleşmesine ve vizkozitesinin artmasına kohezyonunun ise azalmasına neden olmaktadır (Wang vd. 2012). Oksidasyon kaynaklı yaşlanma hızı; sıcaklık, zaman, asfalttaki agregaların üzerindeki bitüm filminin kalınlığı ve kullanılan bitümün yapısına ve bileşenlerinin fraksiyonuna bağlıdır (Shui 1998).

Her ne kadar oksidasyona nazaran daha düşük seviyelerde gerçekleşse de evaporasyon; yani bağlayıcının uçucu nitelikteki bileşenlerinin buharlaşması bitümün yaşlanmasını önemli ölçüde etkileyen ve geri dönüşümü olmayan bir başka mekanizmadır (Zupanick ve Baselice 1997). Göreceli olarak daha hafif moleküler yapıdaki doymuş ve aromatik bitüm bileşenleri; özellikle yüksek sıcaklıktaki asfalt üretimi, üretilen asfaltın işyerinde serilmesi ve sıkıştırılması esnasında buharlaşmaktadır (Bocci vd. 2020). Yapılan bir çalışma asfalt plentindeki üretim sıcaklığının sadece 10°C arttırılmasının uçucu madde kaybını iki katına kadar arttırabileceğini göstermiştir (Hunter vd. 2015). Kısa periyotta gerçekleşen evaporasyon nedeniyle yaşanan asfalt bağlayıcısı daha sert, daha viskoz ve daha gevrek hale gelmektedir.

Yapısal sertleşme, asfalttenlerdeki lineer alkanların varlığından dolayı bitüm moleküllerinin yeniden yapılanması ve maltenlerde balmumu bileşiklerinin oluşmasıyla ilişkilidir (Tauste vd. 2018). Sterik sertleşme olarak da bilinen yapısal sertleşme ortam sıcaklığında gerçekleşir ancak fiziksel sertleşmeye nazaran üç katı daha fazla sürede oluşur (Frolov vd. 2016). Yapısal sertleşmenin ilk fazı asfalt bağlayıcısının camsı geçiş sıcaklığının (-35/-15°C) altındaki sıcaklıklarda 1-2 gün içinde meydana gelirken, ikinci fazı ortam sıcaklığında günler, hatta haftalar boyunca gerçekleşmektedir. Yaşlanmada önemli bir etkiye sahip olan yapısal sertleşme; bağlayıcının ısıtılması veya mekanik olarak

işlenmesi ile kaybolduğundan reverzibl bir mekanizmadır (Gómez vd. 2013). Tikotropi, sineresis ve separasyon gibi ikincil mekanizmalar asfalt bağlayıcısının kısa ve uzun periyotta yaşlanmasına neden olan diğer mekanizmalar olarak bilinmektedir.

Bu çalışma kapsamında; Türkiye’nin farklı bölgelerindeki karayolu üstyapılarındaki bitümlü sıcak karışımlarda (BSK) ve sathî kaplamalarda en sık kullanılan dört farklı bitüm sınıfının yaşlanmaya bağlı reolojik davranışlarının ve morfolojik özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılan B50/70, B70/100, B100/150 ve B160/220 bağlayıcıların orijinal haline, kısa periyotta yaşlandırılmış haline (dönen ince film etüv deneyi ile) ve uzun periyotta yaşlandırılmış haline (basıncılı yaşlandırma kabı deneyi ile) çeşitli SUPERPAVE performans deneyleri (dönel viskozimetre, dinamik kesme reometresi ve kiriş eğilme reometresi) uygulanmıştır ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Ayrıca her bir bitüm sınıfının orijinal, kısa periyotta yaşlanmış ve uzun periyotta yaşlanmış numunelerine ait mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu altında incelenmiştir ve elde edilen mikrogramlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

## 2. Malzeme ve Deneyler

Bu çalışmada Türkiye’deki farklı iki TÜPRAŞ rafinerisinden (İzmit ve Batman) temin edilen B50/70, B70/100, B100/150 ve B160/220 olmak üzere 4 farklı penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Herhangi bir modifiye ajan içermeyen saf ve yaşlanmamış bu bağlayıcılara ait teknik özellikler aşağıda Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Kullanılan bitümlerin özellikleri.

| Bağlayıcı | Rafineri | Pen. (d-mm) | Yum. Noktası (°C) | Yoğunluk (ton/m <sup>3</sup> ) |
|-----------|----------|-------------|-------------------|--------------------------------|
| B50/70    | İzmit    | 53.00       | 51.46             | 1.02                           |
| B70/100   | İzmit    | 75.30       | 47.85             | 1.01                           |
| B100/150  | İzmit    | 116.40      | 45.59             | 1.01                           |
| B160/220  | Batman   | 186.40      | 42.22             | 1.02                           |

Bitümlü bağlayıcılardaki yaşlanma; kısa periyottaki yaşlanma ve uzun periyottaki yaşlanma olmak üzere iki temel fazda oluşmaktadır. Bir başka deyişle; bitüm rafinelerde petrolden damıtılarak elde edildiği ilk günden itibaren kullanıldığı yerdeki servis ömrünün son anına kadar çeşitli hızlarda yaşlanmaktadır. Asfalt karışımlarda kullanılacak bağlayıcı için kısa periyottaki yaşlanma; bitümün depolanması, taşınabilmesi ve işlenebilmesi için ısıtılması, bitümlü sıcak karışım üretimi için yüksek sıcaklıkta agrega ile birlikte kullanılması, plentte üretilen asfalt malzemenin kullanılacağı yere kadar taşınması ve serilip sıkıştırılması esnasında oluşmaktadır. Uzun

periyottaki yaşlanma ise; servise açılmış bir yolun asfalt kaplamasındaki bitümün gerek taşıt yüklerine gerekse çeşitli çevresel faktörlere maruz kalmasıyla oluşmaktadır.

Geçmişten günümüze dek birçok bilim insanının ve çeşitli kurumların üzerinde çalıştığı, modellemeye çalıştığı ve deneysel olarak simüle etmek istediği bitüm yaşlanması ile ilgili çok farklı laboratuvar testleri bulunmaktadır. İnce film etüv deneyi (TFOT), dönen ince film etüv deneyi (RTFOT), nitrojen dönen ince film etüv deneyi (NRTFOT), modifiye rotavapor yaşlandırma deneyi (MRAT), Alman dönel şişe testi (GRFT) ve modifiye Alman dönel şişe testi (MGRFT) kısa periyottaki bitüm yaşlanmasını laboratuvar ortamında simüle etmek için kullanılan testlerdir. Uzun periyottaki bitüm yaşlanması ise laboratuvar; basınçlı yaşlandırma kabı deneyi (PAV), yüksek basınçlı yaşlandırma deneyi (H-PAT), basınçlı oksidasyon kabı (POV) ve dönel silindir yaşlandırma deneyi (RCAT) ile yapılmaktadır. Bitümlü bağlayıcıyı koloit kıvamdan jelimsi kıvama getirerek koloidal stabilite indeksini azaltan ultraviyole (UV) yaşlandırma testi ise bir başka uzun dönem yaşlandırma testidir (He vd. 2019, Peng vd. 2015, Eberhardsteiner vd. 2015). Bu araştırma kapsamındaki taze bitümlerin kısa periyottaki yaşlanması RTFOT ile sağlanmıştır. Bu test, TS EN 12607-1 standartları gereğince, 35’er gram bağlayıcı içeren 8 tane deney şişesinin  $15 \pm 0.2$  devir/dak hızla döndürülerek 85 dakika süre boyunca  $163^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta ısıtılmasıyla uygulanmıştır (TS EN 12607-1 2015). Uzun periyottaki yaşlanma ise RTFOT kalıntılarına PAV uygulanması ile sağlanmıştır. Bu test, TS EN 14769 standartları gereğince, 50’şer gram 10 tane 3.2 mm film kalınlığındaki RTFOT kalıntılarına  $100^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 20 saat 2.1 MPa basınç uygulanarak yapılmıştır (TS EN 14769 2012).

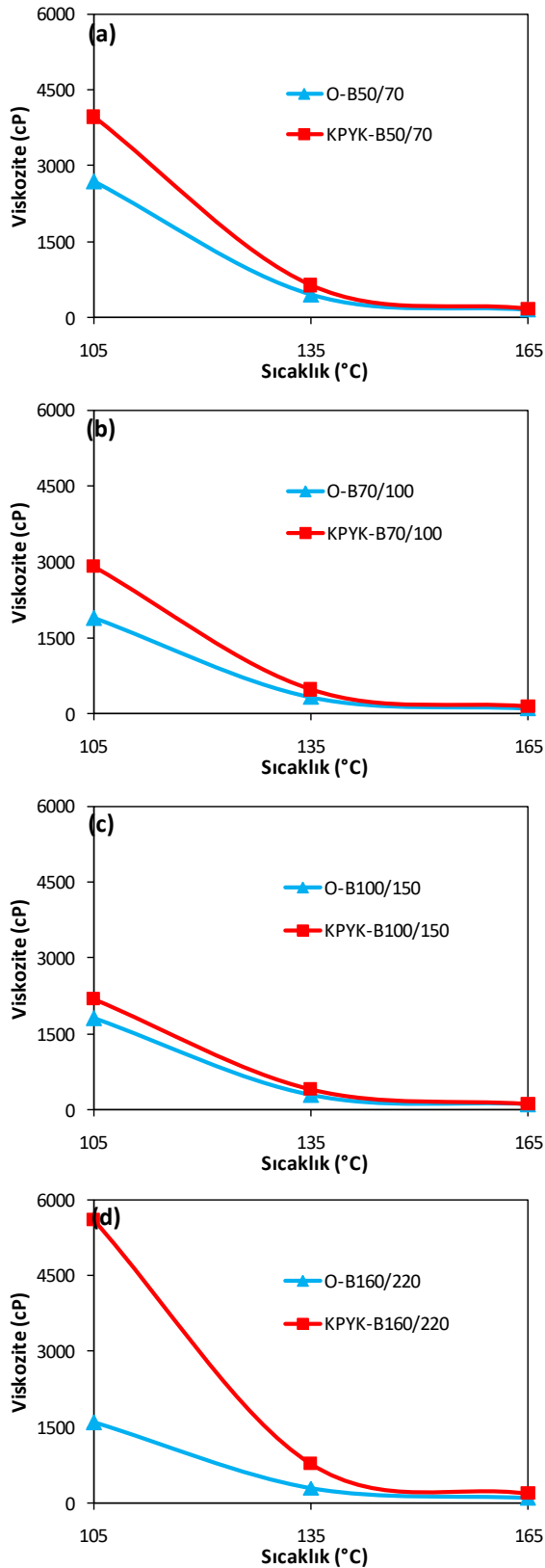
Bitümlü bağlayıcıların işlenebilirliği, pompalanabilirliği ve akışkanlığını ölçen dönel viskozimetre deneyi bu çalışmadaki numunelerin orijinal ve kısa periyottaki yaşlandırılmış kalıntılarına (KPYK) 105, 135 ve  $165^{\circ}\text{C}$  olmak üzere üç farklı sıcaklıkta uygulanmıştır. Viskozite okumaları; ASTM D 4402 standartları gereğince viskozimetre milinin 20 devir/dak sabit hızla döndüğü esnada yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yaşlanmaya bağlı akışkanlıktaki değişiklikler incelenmiştir (ASTM D 4402 2015). Orijinal numunelerin, KPYK’ların ve kısa+uzun periyottaki yaşlandırılmış kalıntıların (KUPYK) dinamik reolojik özelliklerini tayin etmek için dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi ASTM D 7175 standartları doğrultusunda uygulanmıştır (ASTM D 7175 2015). Bu çalışmadaki deneyler; ülkemizin birçok karayolu kesimindeki standart seyir hızı olan 90 km/sa’lik taşıt hızına karşılık gelen trafik yükleri altındaki kesme

hareketini simüle etmek amacıyla 1.59 Hz’lik (10 rad/sn) frekansta ve 25, 30, 40 ve  $50^{\circ}\text{C}$  olmak üzere dört farklı sıcaklıkta gerilme kontrollü bir reometrede tatbik edilmiştir. DSR testinde 1.0 mm açıklığa ve 25 mm çapa sahip paralel aparatlar kullanılmıştır. Asfalt kaplamaların düşük sıcaklıklardaki davranışını belirleyen en önemli parametre bitümlü bağlayıcının performansıdır. Düşük sıcaklıkta neredeyse tamamen elastik bir davranış sergileyen bitümün termal çatlaklara karşı dayanımını, rijitliğini ve sünmesini belirlemede kullanılan kiriş eğilme reometresi (BBR) sıkça uygulanan deneyler arasındadır. Bu çalışmadaki KUPYK numunelerine BBR deneyi ASTM D 6648 standartları doğrultusunda uygulanmıştır (ASTM D 6648 2016). Her bir bitüm grubunun 3 farklı fazdaki (orijinal, KPYK ve KUPYK) yüzey görünümüne ait yüksek çözünürlüklü mikrografiklerini elde etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM, JEOL JSM-6510) kullanılmıştır. 1000x büyütme ile alınacak resimlerdeki olası artefaktları minimuma indirmek için yalıtkan nitelikteki bitüm numuneleri yüzey taraması öncesinde altın-paladyum ile kaplanmıştır.

### 3. Bulgular

RTFOT esnasında oksitlenme ve evaporasyon birlikte görüldüğünden yaşlandırılmış numunelerde orijinal hallerine göre kütle kayıpları ve/veya kazanımları görülebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan tüm bağlayıcı sınıflarında kütle kayıpları görülmüştür. Yaşlanmaya bağlı oransal olarak en büyük kütle kaybı %2.776 ile B160/220 grubunda; en az kütle kaybı ise %0.086 ile B50/70 grubunda görülmüştür. Penetrasyon derecesiyle doğru yumuşama noktası ile ters ilişkiyi doğrulayan bu sonuçlardan da anlaşılabacağı üzere göreceli olarak daha yumuşak ve daha az kıvamlı bağlayıcılarda yaşlanma ile daha çok evaporasyon dolayısıyla daha çok kütle kaybı olmaktadır.

Her bir bağlayıcı grubunun orijinal ve KPYK’larına ait viskozite değişimleri Şekil 1’de verilmektedir. Grafiklerden de görüleceği üzere bitüm sınıfından bağımsız olarak  $135^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktan sonra yaşlanma öncesi ve sonrasındaki akışkanlık eğrileri birbirlerine yaklaşıp süperpoze olmaktadır. Ancak  $135^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar yaşlanma ile birlikte viskozite değerlerinde önemli farklılıklar görülmektedir. Bu durum B160/220 grup bağlayıcısı için Şekil 1(d)’de de görüleceği üzere daha belirgindir. Viskozite eğrileri arasında büyük bir fark görülen B160/220 bağlayıcısı yaşlanma ile birlikte daha viskoz hale gelmektedir ki bu durum akışkanlığı ve dolayısıyla işlenebilirliği büyük oranda azaltmaktadır.



**Şekil 1.** Viskozite Okumaları: (a) B50/70, (b) B70/100, (c) B100/150, (d) B160/200. O: Orijinal (Yaşlanmamış) numune, KPYK: Kısa periyotta yaşlandırılmış kalıntı numunesi.

Sonuç itibarıyla bu çalışmada kullanılan bağlayıcılar arasında viskozite açısından yaşlanmaya en duyarlı bitümün B160/220 olduğu anlaşılmaktadır.

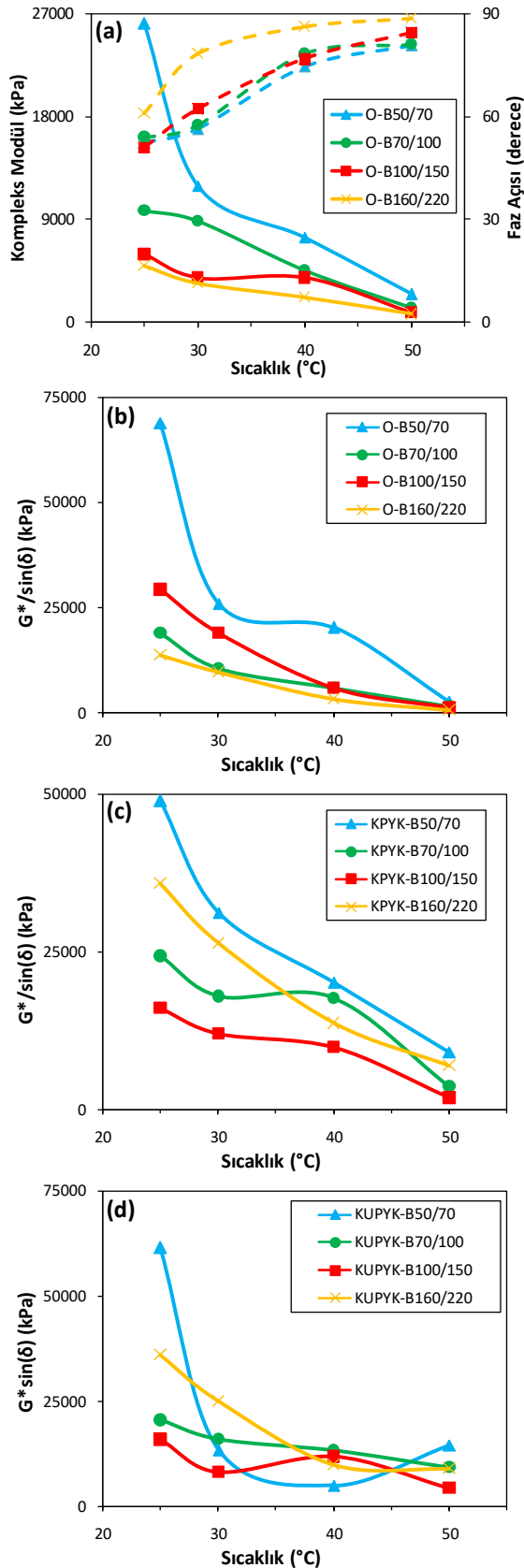
Asfalt bağlayıcıların viskoelastik davranışını ölçmeye yarayan Dinamik Kesme Reometresi (DSR) değişen

sıcaklıklar ve değişen sinüsoidal yüklemeler altında bitümün performansını ortaya koymaktadır. 1990'lı yılların başlarında Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) tarafından geliştirilen DSR; bitümlü bağlayıcıların hem katı halindeki hem de sıvı halindeki reolojik davranışlarını belirlemek için tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de sıkça uygulanan yeni nesil bir deneydir. Bu test genel olarak 10 ile 90°C arasındaki sıcaklıklarda ve 0.1 ile 10 Hz arasında değişen frekanslarda uygulanmakta olup bitümlü bağlayıcının kompleks modülünü ( $G^*$ ) ve faz açısını ( $\delta$ ) ölçmektedir.

Bu çalışmada kullanılan her bir bitüm sınıfının orijinal haldeyken (yaşlanmamış)  $G^*$  ve  $\delta$  değerlerinin artan test sıcaklıklarıyla nasıl değiştiğini gösteren grafik Şekil 2(a)'da verilmiştir. Beklendiği üzere artan sıcaklıkla her bir bağlayıcının  $G^*$  değeri azalırken  $\delta$  değeri ise artmıştır. Kullanılan bağlayıcılar içerisinde kompleks modüldeki en büyük azalış B50/70 sınıfı bitümde görülmesine rağmen yüksek sıcaklıkta en yüksek  $G^*$  ve en düşük  $\delta$  değerinin yine aynı sınıf bitüm grubunda olması sıcak iklimli yerlerde B50/70 bağlayıcısının daha sert ve daha çok viskoz performans sergileyeceğini aynı zamanda daha az duktil olacağını göstermektedir. Bu viskoelastik davranış B50/70 grubu bitümün kimyasal yapısıyla yani bünyesinde daha çok polar yapıları ve moleküler ağırlığı daha fazla olan fraksiyonel yapıları içermesiyle ilgilidir.

Hava sıcaklıklarının yüksek olduğu bölgelerde asfalt kaplamalı yolların özellikle sağ şeritlerinde tekrarlanan ağır tonajlı trafik yüklerine bağlı olarak oluklanma görülebilmektedir. Tekerlek izi deformasyonu olarak da bilinen oluklanma yolun beklenen hizmet ömrünü önemli oranda azaltmaktadır. Yağışlar sonrasında yol yüzeyindeki suyun tahliyesine engel olan oluklanmalar sürüş konforu ve güvenliğini de etkilemektedir. Bu tür deformasyonları engellemek/minimize etmek için SHRP, tekerlek izi parametresinin ( $G^*/\sin\delta$ ) orijinal ve KPYK bitümleri için 10 rad/s frekansta uygulanan DSR testinde sırayla 1.0 ve 2.2 kPa'dan büyük olmasını istemektedir.

Şekil 2(b) ve 2(c)'deki grafiklerden de anlaşılabacağı üzere yaşlanmadan bağımsız olarak her bir test sıcaklığında en yüksek tekerlek izi parametresinin ( $G^*/\sin\delta$ ) B50/70 grubunda olduğu dolayısıyla oluklanmaya karşı en büyük direnci B50/70 bitümlü bağlayıcı ile yapılacak asfalt kaplamaların göstereceği anlaşılmaktadır. Bu parametre yaşlanma öncesinde göreceli olarak en düşük B160/220 bağlayıcı grubunda iken kısa periyotta yaşlanma sonrasında beklenenin aksine aynı bağlayıcının daha iyi bir performans sergileyeceği öngörülmektedir.



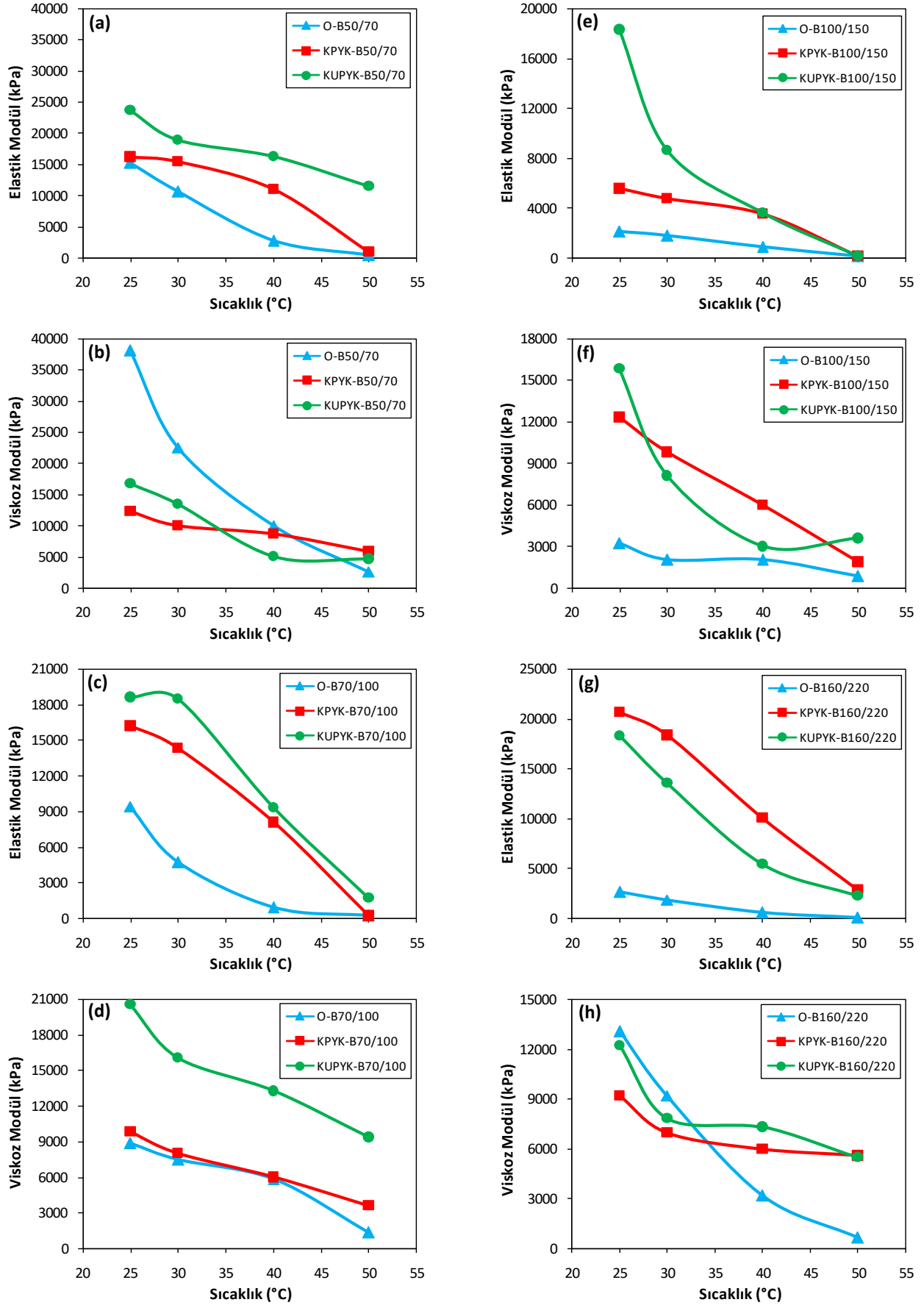
**Şekil 2. (a):** Orijinal durumda kompleks modül ve faz açısı, **(b):** Orijinal durumda tekerlek izi parametresi, **(c):** Yaşlanma sonrası tekerlek izi parametresi **(d):** Yaşlanma sonrası yorulma parametresi.

Bu durumun yaşlanmaya bağlı olarak B160/220 bağlayıcısındaki çok sayıdaki daha az polar yapıdaki

fraksiyonların daha polar yapıdaki fraksiyonlara dönüşmesiyle ilgili olduğu düşünülmektedir.

Timsah sırtını andıran yorulma çatlakları; servise açılmış asfalt kaplamalı yollarda sıkça karşılaşılan bir bozulma türüdür. Timsah sırtı çatlaklarına sebep olan her ne kadar çeşitli faktörler (iklim şartları, zeminin taşıma gücü, yol kaplamasının kalınlığı, trafik yükleri, asfalt karışımın serme ve sıkıştırma teknikleri vs.) olsa da asfalt karışımındaki kullanıma bağlı olarak yaşlanmış bitümün performansı çok önemlidir. Beklenen servis süresi boyunca asfalt kaplamalı yollarda bu tür çatlakların önüne geçebilmek için SHRP; 10 rad/sn frekansta uygulanan DSR testinde KUPYK bitümünün yorulma parametresinin ( $G^*\sin\delta$ ) 5000 kPa'dan az olmasını istemektedir. Bu çalışmada kullanılan farklı bağlayıcıların değişen test sıcaklıklarına göre yorulma parametrelerinin nasıl değiştiği Şekil 2(d)'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde  $G^*\sin\delta$  değerinin B160/220 grubu bitümde yüksek olduğu görülmektedir. Bir başka deyişle bağlayıcısı B160/220 olan bitümle hazırlanmış asfalt kaplamalı yollarda kullanıma ve yorulmaya bağlı olarak oluşması muhtemel timsah sırtı çatlakların nispeten daha az olacağı öngörülmektedir. Daha az kıvamlı dolayısıyla daha az sert yapıdaki B160/220 bağlayıcısındaki bu durum yorulmaya karşı vizkoelastik performansının daha yüksek olmasını sağlamaktadır.

DSR testi sonucu elde edilen kompleks modülün ( $G^*$ ); elastik (depolama) modülü ( $G'$ ) ve viskoz (kayıp) modülü ( $G''$ ) olmak üzere iki komponenti bulunmaktadır. Viskoelastik bir yapıya sahip bitümlü bağlayıcıların özellikle yüksek sıcaklıklar altında deformasyona ve şekil değiştirmeye karşı dayanıklı olması yani daha elastik bir performans sergilemesi istenmektedir. Ancak düşük sıcaklıklarda bitüm daha kırılğan hale geldiğinden ve herhangi bir çatlama olmaksızın enerjiyi dağıtabilmesi için bağlayıcının yüksek viskoz davranışa ve daha düşük elastikiyete sahip olması beklenmektedir. Bu çalışmada kullanılan bitümlere ait yaşlanma öncesi ve sonrasındaki (kısa ve kısa+uzun) elastik ve viskoz modüller Şekil 3'te verilmiştir. Şekildeki grafiklerden de görüleceği üzere yaşlanmadan ve bitüm cinsinden bağımsız olmak üzere artan sıcaklıkla her bir bağlayıcının gerek elastik gerekse viskoz modülü azalmaktadır. Kompleks modüle ait elastik bileşenin her test sıcaklığında her bir bağlayıcının orijinal halinde daha düşük olduğu gözlemlenirken elastikiyetin yaşlanmayla birlikte arttığı görülmektedir. İlk üç bitüm grubunda (B50/70, B70/100 ve B100/150) en yüksek değerli  $G'$  eğrilerinin kısa+uzun vadede yaşlanma sonrasında olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Elastik ve Viskoz Modüller. (a) ve (b): B50/70 bitümlü, (c) ve (d): B70/100 bitümlü, (e) ve (f): B100/150 bitümlü, (g) ve (h): B160/220 bitümlü.

Ancak bu durum B160/220 grubu bitüm için farklılık göstermektedir ve elastik davranışın kısa vadede daha belirgin olduğu görülmektedir.

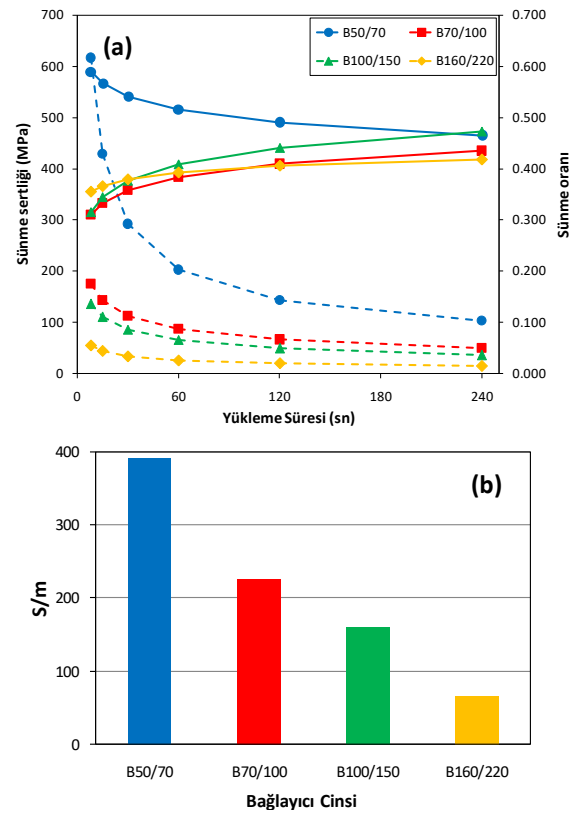
Bağlayıcıların viskoz modüllerinin ise yaşlanma öncesi ve sonrasında düzgün değişmediği görülmektedir. B70/100 bağlayıcısının orijinal ve kısa vadede yaşlanma sonrasındaki viskoz modülleri her sıcaklıkta birbirini takip ederken kısa+uzun yaşlanma sonrasında bu değerlerde belirgin bir artış olmuştur (Şekil 3(d)).

Trafik yükleri altındaki yollarda sıcaklık düştüğünde asfalt kaplama büzülür ve birtakım gerilmeler oluşur. Eğer bu kontraksiyonlar çok kısa sürede meydana gelirse asfalt karışımındaki gerilmeler termal çatlaklara neden olabilmektedir. Enine yönde meydana gelen bu tür termal çatlaklar daha çok uzun süre hizmet veren yollarda yani bitümlü bağlayıcısı uzun periyotta yaşlanmış asfalt kaplamalarda görülmektedir. Türkiye’nin farklı coğrafik bölgelerinde asfalt yolların maruz kaldığı en düşük kış sıcaklıkları çok farklı olabilmekle birlikte ülkemiz koşulları için 0, -6, -12 ve -18°C sıcaklıkları BBR testinin en çok uygulandığı sıcaklıklardır. -12 ve -18°C sıcaklıkları daha çok modifiye bitümler için tercih edilen sıcaklıklar olup bu çalışmadaki saf bitümlerin KUPYK’larına BBR deneyi -6°C uygulanmıştır. 240 saniye boyunca sabit yükleme altındaki numunelerin sünme sertlikleri (S) ve sünme oranları (m) Şekil 4(a)’da verilmiştir.

Deneyin yapıldığı sıcaklıkta 60. saniye sonunda sünme sertliğinin 300 MPa’dan daha düşük, sünme oranının ise 0.300’den daha büyük olması istenmektedir. Şekil 4(a)’dan da görüleceği üzere bu çalışmada kullanılan her bir bağlayıcı grubu -6°C’de eğilme-sünme sertliği açısından istenen her iki kriteri de yerine getirmektedir. Ancak yaşlanmayla birlikte düşük sıcaklıklarda meydana gelebilecek termal çatlaklara karşı en iyi performansı B160/220 grubu bitümlü bağlayıcısının göstereceği anlaşılmaktadır. Bu noktada en temel etken bağlayıcısının kimyasal yapısıdır. Daha düşük moleküler ağırlıklı, fraksiyonel olarak daha az asfalt ve parafin içeren ancak daha fazla non-polar ve doymuş hidrokarbon içeren bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda meydana gelebilecek termal çatlaklara karşı daha dirençli olduğu bilinmektedir.

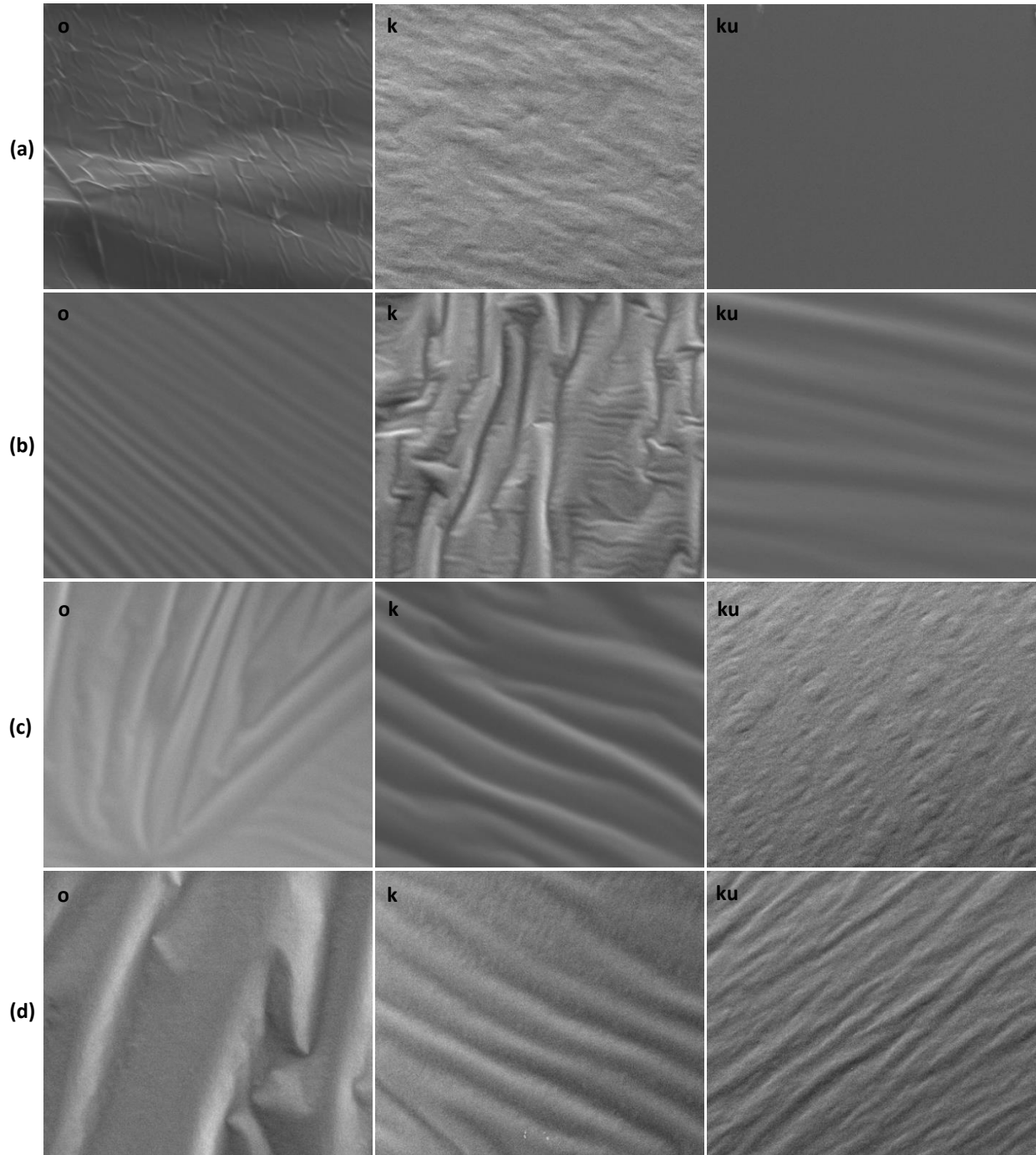
Sadece S ve m değerlerini kullanarak bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklık performansını değerlendirmenin kısıtlı sonuçlar verebileceği belirtilmiştir. Bu nedenle S ve m değerlerinin oranlanmasıyla elde edilen S/m indeksinin asfalt çimentosunun düşük sıcaklıktaki reolojik özelliklerini daha kapsamlı bir şekilde yansıtabileceği belirtilmiştir. Bu indeks ne kadar küçük olursa bitümün düşük sıcaklık

performansı o kadar yüksek olacaktır (Wei vd. 2020). Bu çalışmada kullanılan her bir bitüm sınıfına ait S/m indeksi Şekil 4(b)’de verilmiştir. Kaskad şeklindeki grafikten de görüleceği üzere S/m indeksi bitüm penetrasyon dereceleriyle ters orantılı olarak değişmektedir. En yüksek değer B50/70 grubu bağlayıcıda en düşük değer ise B160/220 grubu bağlayıcıda görülmektedir. Sünme sertliği ve sünme oranı değerleriyle uyumlu olan bu indeks soğuk iklimli bölgelerde B160/220 grubu bitümle hazırlanacak asfalt karışımların iyi bir performans sergileyebileceğini ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dirençli olacağını göstermektedir.



Şekil 4. BBR deneyi sonuçları. (a): Sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m) değişimi, (b): S/m indeksi.

SEM mikroskobu altında bitüm numunelerinin morfolojik yapısını 1000 kat büyütürken gösteren resimler Şekil 5’te verilmiştir. Taze haldeki her bir bitüm grubunun üzerinde farklı ölçeklerde katlantıların olduğu görülmektedir. Ancak penetrasyon derecesi arttıkça yüzeydeki bu kıvrımların da boyutunun arttığı görülmektedir. B50/70 bağlayıcısının yüzeyindeki kıvrımların çapı yaklaşık 1µm iken bu değer daha yumuşak kıvamdaki B160/220 bitümünde 10µm’a kadar çıkabilmektedir. Bu konvolüsyonlar kısa periyottaki yaşlanma sonrasında B50/70 ve B70/100 grubunda daha belirgin hale gelirken kısa+uzun periyottaki yaşlanma sonrasında B50/70 bitümünde neredeyse tamamen kaybolmuştur (Şekil 5(a) (ku)); B70/100 bağlayıcısında ise belirginliğini oldukça kaybetmiştir (Şekil 5(b) (ku)).



**Şekil 5.** Mikrografikler. **(a):** B50/70, **(b):** B70/100, **(c):** B100/150, **(d):** B160/200. **o:** orijinal (yaşlanmamış) numune, **k:** kısa periyotta yaşlandırılmış kalıntı numunesi, **ku:** kısa+uzun periyotta yaşlandırılmış kalıntı numunesi.

B100/150 bitümündeki katlantılar RTFOT sonrasında şekillerini muhafaza ederken PAV sonrasında bu katlantılar yüzeyde protrüzyona dönüşmüştür (Şekil 5(c) (ku)).

Tazeyken daha koyu renkteki bağlayıcıların yaşlanma sonrası opaklaşması oksitlenmenin bir göstergesidir. Benzer şekilde yeni servise açılmış yol kaplamalarının içindeki bitümün henüz tam yaşlanmamış olması nedeniyle asfalt tabakalar daha koyu renkteyken zamanla oksitlenmeye dolayısıyla yaşlanmaya bağlı olarak daha açık renge bürünmektedir.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Petrol türevi bitümlü bağlayıcılar; üretildiği ilk andan kullanıldıkları yerdeki hizmet ömrünün son anına kadar farklı hızlarda yaşlanmaktadır. Bitüm yaşlanmasında bağlayıcının fiziksel ve kimyasal yapısı gibi intrinsek faktörlerin yanı sıra güneş ışınları, iklim koşulları ve çevresel faktörler gibi çok önemli ekstrinsek faktörler de rol almaktadır. Bu çalışmada Türkiye’de sıcak asfalt kaplamalı ve sathî kaplamalı yollarda sıkça kullanılan 4 farklı penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcının (B50/70, B70/100, B100/150 ve B160/220) yaşlanmaya bağlı olarak

reolojik ve morfolojik yapılarının nasıl değiştiği incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre;

- Yaşlanma ile birlikte en az kütle kaybı B50/70 grubu bitümde; en çok kütle kaybı ise B160/220’de görülmüştür. Zaten diğer bağlayıcılara nazaran asfalten oranı yüksek olan B50/70 numunesinde kütle kaybının sınırlı olacağı beklenen sonuçlar arasındadır. Yaşlanma öncesi ve sonrasında akışkanlıktaki ve işlenebilirlik derecesindeki en büyük değişim B160/220 bağlayıcısında görüldüğünden viskozite açısından yaşlanmaya en duyarlı bitüm B160/220’dir.

- Yaşlanma sonrasında yüksek sıcaklıklarda sergilediği vizkoelastik davranış nedeniyle (yüksek kompleks modül, düşük faz açısı) elastik yapısını en çok muhafaza eden bağlayıcı grubunun B50/70 olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle tekerlek izi bozulmalarının en olası görüleceği sıcak iklimli yerlerde ve ağır taşıt trafiği altında servis verecek yollardaki asfalt kaplamalı yollarda bağlayıcı olarak B50/70 grubu bitümün kullanılması büyük önem arz etmektedir. Ancak oluklanmaya karşı yüksek dirençli bağlayıcıların düşük sıcaklık çatlaklarına ve yorulma çatlaklarına karşı daha hassas olabileceği unutulmamalıdır.

- Daha az sert yapısı nedeniyle yorulma çatlaklarına karşı en iyi performansı B160/220 grubu bitümün sergileyeceği görülmektedir. Ayrıca yaşlanmayla birlikte düşük sıcaklıklarda sergilediği performans nedeniyle (göreceli düşük sünme sertliği ve göreceli yüksek sünme oranı) soğuk iklimli bölgelerde B160/220 grubu bitümle hazırlanacak asfalt kaplamalı yollarda düşük sıcaklık çatlaklarının oluşma olasılığı da daha düşük olacaktır. Ancak küresel ısınma dünya yüzeyindeki ortalama sıcaklığın her geçen yıl artmasına bu nedenle soğuk iklimli bölgelerde bile yaz aylarında ekstrem sıcaklıkların görülmesine yol açabilmektedir. Dolayısıyla ülkemizde sıcak asfalt üretiminde kullanılacak bağlayıcıların modifiye edilmesi büyük önem arz etmektedir.

- Bu çalışmada 4 farklı bitümün yaşlanma sonrası tekerlek izi performansı ile yorulma ve düşük sıcaklıktaki çatlama dayanımı gibi reolojik davranışları irdelenmekle birlikte ülkemiz koşullarında (iklim ve trafik yükleri) BSK üretiminde en çok B50/70 ve B70/100 penetrasyonlu bağlayıcılar kullanılmaktadır. Ülkemizdeki sathî kaplamalı yollarda ise Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan "Türkiye Karayolları Sathî Kaplamalı Yollar İçin Bitüm Sınıfı Seçim Haritası" üzerinden görüleceği üzere ağırlıklı olarak B70/100, B100/150 ve B160/220 grubu bağlayıcılar kullanılmaktadır. Dolayısıyla yaşlanmayla birlikte farklı türdeki bitümlü bağlayıcıların çeşitli bozulma ve deformasyonlara karşı davranışları kullanıldıkları yol kaplamasının cinsine (asfalt veya sathî) göre farklılık gösterecektir.

- Yaşlanmayla birlikte bağlayıcının opaklığının penetrasyon derecesi ile orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir.

Sonuç olarak ülkemizde asfalt kaplamalı ve sathî kaplamalı yollar tasarlandığında yolun yapılacağı yerin coğrafik koşulları, iklim koşulları ve bilhassa güneşli gün sayısı dikkate alınarak kullanılması gereken bitüm sınıfını gösteren haritalar belirlenmelidir. Sonraki çalışmalarda her bir bitüm sınıfına spesifik yaşlanma engelleyici/azaltıcı ajanlar araştırılmalı ve daha uzun servis ömürlü asfalt yollar belirlenen özgün yaşlanma karşıtı ajanlar ile birlikte tasarlanmalıdır.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak  
Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

## 5. Kaynaklar

- Airey, G.D., 2003. State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, **4(3)**, 165-176.  
<https://doi.org/10.1080/1029843042000198568>
- Androjić, I., 2016. Ageing of hot mix asphalt. *Građevinar*, **68(6)**, 477-483.  
<https://doi.org/10.14256/JCE.1420.2015>
- ASTM D 4402, 2015. Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.  
[https://doi.org/10.1520/D4402\\_D4402M-15](https://doi.org/10.1520/D4402_D4402M-15)
- ASTM D 6648, 2016. Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). *ASTM International*, West Conshohocken, PA.  
<https://doi.org/10.1520/D6648-08R16>
- ASTM D 7175, 2015. Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.  
<https://doi.org/10.1520/D7175-15>
- Bocci, E., Prosperi, E., Mair, V., and Bocci, M., 2020. Ageing and cooling of hot-mix-asphalt during hauling

- and paving—A laboratory and site study. *Sustainability*, **12(20)**, 8612.  
<https://doi.org/10.3390/su12208612>
- Das, P.K., Kringos, N., and Birgisson, B., 2014. Microscale investigation of thin film surface ageing of bitumen. *Journal of microscopy*, **254(2)**, 95-107.  
<https://doi.org/10.1111/jmi.12122>
- Eberhardsteiner, L., Füssl, J., Hofko, B., Handle, F., Hospodka, M., Blab, R., and Grothe, H., 2015. Influence of asphaltene content on mechanical bitumen behavior: experimental investigation and micromechanical modeling. *Materials and Structures*, **48**, 3099–3112.  
<https://doi.org/10.1617/s11527-014-0383-7>
- Feng, Z.G., Yu, J.Y., and Kuang, D.L., 2013. The physical properties and photostability of bitumen with different ultraviolet absorbers. *Petroleum Science and Technology*, **31(2)**, 113-120.  
<https://doi.org/10.1080/10916466.2012.654573>
- Fernández-Gómez, W.D., Quintana, H.A.R., Daza, C.E., and Lizcano, F.A.R., 2014. The effects of environmental aging on Colombian asphalts. *Fuel*, **115**, 321-328.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.009>
- Frolov, I.N., Bashkirceva, N.Y., Ziganshin, M.A., Okhotnikova, E.S., and Firsin, A.A., 2016. The steric hardening and structuring of paraffinic hydrocarbons in bitumen. *Petroleum Science and Technology*, **34(20)**, 1675-1680.  
<https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1221962>
- Gómez, W.D.F., Quintana, H.A.R., and Lizcano, F.A.R., 2013. A review of asphalt and asphalt mixture aging. *Ingeniería e Investigación*, **33(1)**, 5-12.
- He, B., Yu, J., Du, W., Cao, Z., and Han, X., 2019. Preparation and characterization of lignosulfonate grafted layered double hydroxides and their applications as anti-ultraviolet additives for bitumen. *Construction and Building Materials*, **195**, 432-440.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.100>
- Hosseinnezhad, S., Zadshir, M., Yu, X., Yin, H., Sharma, B. K., and Fini, E., 2019. Differential effects of ultraviolet radiation and oxidative aging on bio-modified binders. *Fuel*, **251**, 45–56.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.029>
- Hunter, R.N., Self, A., Read, J., and Hobson, E., 2015. The Shell Bitumen Handbook, 6th ed.; ICE Publishing: London, UK.
- Karahancer, S., Enieb, M., Saltan, M., Terzi, S., Eriskin, E., Cengizhan, A., and Akbas, M.Y., 2020. Evaluating mechanical properties of bitumen and hot mix asphalt modified with nano ferric oxide. *Construction and Building Materials*, **234**, 117381.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117381>
- López-Montero, T., Crucho, J., Picado-Santos, L., and Miró, R., 2018. Effect of nanomaterials on ageing and moisture damage using the indirect tensile strength test. *Construction and Building Materials*, **168**, 31-40.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.110>
- Mirwald, J., Nura, D., Eberhardsteiner, L., and Hofko, B., 2022. Impact of UV–Vis light on the oxidation of bitumen in correlation to solar spectral irradiance data. *Construction and Building Materials*, **316**, 125816.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125816>
- Omar, H.A., Katman, H.Y., Bilema, M., Ahmed, M.K.A., Milad, A., and Md Yusoff, N.I., 2021. The effect of ageing on chemical and strength characteristics of nanoclay-modified bitumen and asphalt mixture. *Applied Sciences*, **11(15)**, 6709.  
<https://doi.org/10.3390/app11156709>
- Peng, C., Yu, J., Dai, J., and Yin, J., 2015. Effect of Zn/Al Layered Double Hydroxide Containing 2-Hydroxy-4-n-octoxy-benzophenone on UV Aging Resistance of Asphalt. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2015**, 739831.  
<https://doi.org/10.1155/2015/739831>
- Polo-Mendoza, R., Martinez-Arguelles, G., Walubita, L. F., Moreno-Navarro, F., Giustozzi, F., Fuentes, L., and Navarro-Donado, T., 2022. Ultraviolet ageing of bituminous materials: A comprehensive literature review from 2011 to 2022. *Construction and Building Materials*, **350**, 128889.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128889>
- Shui, H.F., 1998. Study on the aging kinetics of paving asphalt. *Journal of East China University of Science and Technology*, **24(4)**, 399.
- Tang, N., Yang, Y.L., Yu, M.L., Wang, W.L., Cao, S.Y., Wang, Q., and Pan, W.H., 2018. Investigation of ageing in bitumen using fluorescence spectrum. *Materials*, **11(8)**, 1325.  
<https://doi.org/10.3390/ma11081325>
- Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., and Rubio-Gámez, M.C., 2018. Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. *Construction and Building Materials*, **192**, 593-609.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.169>
- TS EN 12607-1, 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar- Isı ve hava etkisi altında sertleşme direncinin tayini- Bölüm 1: RTFOT yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 14769, 2012. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ile hızlandırılmış uzun süreli yaşlandırma işlemi, Türk Standartları Enstitüsü.
- Wang, J.S., Wu, S.P., Han, J., and Liu, X., 2012. Study on preparation and UV ageing resistance effect of LDHs modified asphalt. *Key Engineering Materials*, **509**, 194-202.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.509.194>

Wei, C., Zhang, H., Duan, H., 2020. Effect of catalytic-reactive rejuvenator on structure and properties of aged SBS modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, **246**, 118531, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118531>

Zhang, H., Yu, J., Wang, H., and Xue, L., 2011. Investigation of microstructures and ultraviolet aging properties of organo-montmorillonite/SBS modified bitumen. *Materials Chemistry and Physics*, **129(3)**, 769–776. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.04.078>

Zupanick, M. and Baselice, V., 1997. Characterizing asphalt volatility. *Transportation research record: Journal of the Transportation Research Board*, **1586(1)**, 1-9. <https://doi.org/10.3141/1586-01>