

## Farklı Penetrasyon Sınıfına Ait Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması

Taylan GÜNAY<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-2669-6320>

\*Sorumlu yazar: taylan.gunay@ege.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 24.06.2022

Kabul tarihi: 26.09.2022

Online Yayınlanma: 10.03.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Bitüm

Reoloji

Deformasyon

Yorulma ömrü

### ÖZ

Esnek üstyapılarda meydana gelen bozulmaların büyük bir çoğunluğunun bağlayıcı malzeme olarak kullanılan bitüm ve bitümün deformasyon özellikleriyle ilişkili olabileceği bilinmektedir. Bu nedenle, viskoelastik ve termoplastik bir malzeme olan bitümün sıcaklık ve trafik etkisi altında deformasyon davranışlarının bilinmesi önem arz etmektedir. Çalışmada, ülkemizde kullanılmakta olan B50/70 ve B160/220 sınıfına ait bağlayıcıların reolojik özellikleri güncel deney yöntemleriyle incelenmiş, iki bağlayıcı türüne ait reolojik parametrelerde meydana gelen farklılıklar araştırılmıştır. Bu amaçla, çalışmanın ilk aşamasında bağlayıcıların penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite gibi fiziksel özelliklerine ait parametreler tespit edilmiş, ayrıca dönel ince film halinde ısıtma etüvü (RTFO) ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) yardımıyla bağlayıcıların çeşitli reolojik deneylerde kullanılmak üzere kısa ve uzun vadeli yaşlandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların ardından, reolojik deney programına geçilmiştir. Buna göre, farklı genlik (amplitude sweep) deneyleri yardımıyla bağlayıcı türlerinin viskoelastik limit (LVE) değerleri belirlenmiş, küçük genlik salınım kesme deneyi (SAOS) ile bağlayıcıların zamana bağlı deformasyon davranışları gözlemlenmiştir. SAOS deneyi verileri yardımıyla bağlayıcı türlerine ait ana eğriler oluşturularak daha geniş bir frekans aralığında bağlayıcıların depolama ve kayıp modülü parametreleri araştırılmıştır. Güncel bir yorulma deneyi olan lineer genlik tarama (LAS) testi ile bağlayıcıların yorulma ömürleri belirlenmiştir. Elde edilen test parametreleri neticesinde B50/70 ve B160/220 bitümleri arasındaki reolojik farklılıklar karşılaştırılmalı olarak ortaya konmuştur. SAOS deneyi verilerine göre B160/220 bağlayıcısının 40 °C'nin üzerinde tümüyle viskoz davranış biçimini sergileyebileceği ortaya konmuştur. LAS deneyi neticesinde düşük deformasyon mertebelerinde B50/70 bitümünün B160/220 bağlayıcısına göre daha uzun bir yorulma ömrü olabileceği belirlenmiştir.

## Comparison of Rheological Properties of Bitumens Having Various Penetration Classes

### Research Article

#### Article History:

Received: 24.06.2022

Accepted: 26.09.2022

Published online: 10.03.2023

#### Keywords:

Bitumen

Rheology

Deformations

Fatigue

### ABSTRACT

As known, most of the deteriorations in flexible pavements are related to the deformation properties of the bitumen used as a binder. For this reason, it is fundamental to know the deformation behavior of bitumen which is a viscoelastic and thermoplastic material. In this study, the rheological properties of binders having B50/70 and B160/220 penetration classes were investigated with multiple test methods, and the differences in rheological parameters of these two binders were determined. For this purpose, in the first stage of the study, the physical properties of the binders such as penetration softening point, viscosity were determined, and the short and long-term aging processes of the binder were conducted by means of rotating thin film heating oven (RTFO) and a pressure aging vessel (PAV) tests. After these studies, the rheological experiment program was applied. The viscoelastic limit (LVE) ranges of individual binder types were determined by amplitude experiments, and the time-dependent deformation behavior of binders was observed with the small amplitude

oscillation shear (SAOS) test. By means of SAOS test data, the master curves of the binders were drawn, and the storage and loss moduli of the binders were investigated within a wide frequency range. As a result of the test parameters obtained, the rheological differences between B50/70 and B160/220 bitumen were rheologically investigated. SAOS tests proves that B160/220 might exhibit completely viscous behavior over 40 °C. According to LAS test results B50/70 could have a longer fatigue life compared to that of B160/220.

---

**To Cite:** Günay T. Farklı Penetrasyon Sınıfına Ait Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2023; 6(1): 682-699.

## 1. Giriş

Esnek üstyapılarda agregalar arası bağlayıcı malzeme olarak kullanılan bitüm termoplastik ve viskoelastik özelliktedir (McNally, 2011; Rossi ve ark., 2015). Termoplastik özellik sıcaklık artışıyla birlikte polimer zincirlerin zayıflaması ve bu sayede malzemenin yumuşayarak şekil alabilir hale gelebilmesini ifade etmektedir. Sıcaklık değişimi malzemelerin deformasyon biçimleri üzerinde rol oynar. Buna göre, bitüm düşük sıcaklıkta katı madde gibi davranırken yüksek sıcaklıkta viskoz akışkan özelliktedir. Viskoelastikte, malzemenin uygulanan yük altında hem viskoz hem de elastik deformasyon davranışlarının bir arada göstermesini ifade etmektedir. Buna göre, bitümlü malzemeler uygulanan yük altında deformasyona uğramakta yük sonucu meydana gelen bu deformasyonun belirli bir kısmı yükün ortadan kaldırılmasıyla birlikte geri kazanılmaktadır. Deformasyonun bu bileşeni elastik deformasyon olarak adlandırılırken geri dönmeyen, viskoz sıvı davranışın neticesinde oluşan deformasyon ise kalıcı deformasyon olarak isimlendirilir (Lesueur, 2009; Ahmedzade, 2013).

Günümüz koşullarında taşıt sayısının ve trafiğe ait yüklerinin artması neticesinde karayollarında meydana gelen bozulmaların yaygınlaştığı görülmektedir. Esnek üstyapıdaki deformasyonun sınırlandırılması için başta bağlayıcı olmak üzere malzeme özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir (Ahmedzade, 2013).

Son yıllarda, reoloji alanında bitümlü bağlayıcı ve daha geniş perspektifte viskoelastik malzemeler için birçok yeni test yöntemi geliştirilmiştir. Bu deney yöntemlerinde, farklı yükleme hızı ve deformasyon miktarları kullanılarak bağlayıcı malzemeye esnek üstyapıda meydana gelen gerilmelerin gerçeğe uygun biçimde modellenmesi sağlanmakta ve bu sayede oluşması muhtemel bozulmalar daha iyi şekilde ön görülebilmektedir. Bu deneyler, bağlayıcının viskoelastik deformasyon sınırları içerisinde veya dışında gerçekleştirilebilmektedir. Böylelikle, bağlayıcıların viskoelastik davranış özelliklerinin yanı sıra yorulma ömrü gibi daha yüksek deformasyon seviyelerinin ve yük tekrarının söz konusu olduğu durumlar da incelenmektedir. Çalışma kapsamında, ülkemizde kullanılmakta olan B50/70 ve B160/220 olmak üzere iki farklı penetrasyon sınıfına ait bağlayıcılar üzerinde bir reolojik deney programı uygulanmış ve bu sayede farklı sertlik ve özellikte olan bu bağlayıcı türlerinin reolojik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen reolojik verilerin kendi aralarında kıyaslanması suretiyle meydana gelen farklılıklar tespit edilmiştir. Bu sayede ülkemiz literatüründe mevcut olan reolojik deney yöntemlerinin yanı sıra güncel deney yöntemlerinin de kullanımının artırılması ve aynı zamanda ülkemize ait farklı sertlik özelliklerine sahip bağlayıcı türlerinin bu deney yöntemleriyle incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu bağlamda, bağlayıcılar üzerinde, öncelikle geleneksel test yöntemleri olarak da isimlendirilen penetrasyon, yumuşama noktası gibi fiziksel test yöntemleri uygulanmış ve bağlayıcıların temel fiziksel özellikleri saptanmıştır. Dönel viskozite (RV) deneyi yardımıyla bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C'deki viskozite değerleri belirlenmiş, ardından viskozite değerleri kullanılarak bu bağlayıcı türleriyle elde edilecek bitümlü sıcak karışımların (BSK) ideal sıkıştırma ve karıştırma sıcaklık aralıkları hesaplanmıştır.

Reolojik deneyler öncesinde, bağlayıcıların viskoelastik deformasyon limitleri (LVE) belirlenmesi ve bu limit değerlere göre testlerde doğru deformasyon değerlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla, reolojik deneylerin ilk adımı olarak bağlayıcılar üzerinde genlik tarama (amplitude sweep) deneyleri yapılmıştır (Yusoff, 2011). Bağlayıcıların LVE değerlerinin belirlenmesinin ardından küçük genlik salınım kesme deneyi (Small amplitude oscillatory shear test- SAOS) 10-50 °C sıcaklık ve 0,01-100 rad/sn aralığında gerçekleştirilmiştir. Zaman-sıcaklık süperpozisyon prensibi (TTS) kullanılarak bağlayıcıların depolama modülü (G'), kayıp modülü (G'') parametrelerine ait ana eğriler (master curve) oluşturulmuştur. Ana eğrilerin hazırlanmasında kullanılan kaydırma faktörü (shift factor) değerleri, Arrhenius ve WLF eşitlikleriyle karşılaştırılmıştır. Son yıllarda, yorulma ömrünün tahmininde yaygın biçimde kullanılan lineer genlik tarama (LAS) deneyi farklı penetrasyona sahip bağlayıcılar üzerinde uygulanmış ve bu sayede yorulma ömrüne ilişkin, A ve B parametreleri, malzeme bütünlüğü (C), hasar yoğunluğu (D) ve yorulma ömrü ( $N_f$ ) parametreleri belirlenmiştir.

## **2. Materyal ve Metot**

Çalışmada, B50/70 ve B160/200 penetrasyon sınıfına sahip bitümler çalışmada bağlayıcı malzeme olarak kullanılmak üzere Tüpraş Aliğa rafinerisinden temin edilmiştir. B50/70 sınıflı bitümün genel olarak (polimer katkılarla modifiye edilmek suretiyle) orta ve yüksek sıcaklık bölgesinde kullanımı uygun iken, B160/220 bitümü sıcaklığın düşük olduğu bölgelerde, termal çatlakların meydana gelmesini azaltmak amacıyla kullanılabilir. Sertlik açısından belirgin bir farka sahip olan bu iki bitümün çalışmada kullanılmasıyla birlikte, bu iki bağlayıcı türü arasında reolojik olarak farklılaşmaların gözlemlenmesi hedeflenmiştir.

### *2.1. Bağlayıcıların Kısa ve Uzun Vadeli Yaşlandırılması*

Reolojik deneylerin bazıları kısa ve uzun vadeli yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde gerçekleştirilmektedir. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ile uzun vadeli yaşlandırma işlemleri için öncelikle bağlayıcıların kısa vadeli yaşlandırılmalarının tamamlanmış olması gerekmektedir. Bu maksatla, B50/70 ve B160/220 penetrasyon sınıfına sahip bağlayıcıların kısa vadeli yaşlandırılma işlemleri dönel ince film etüvü (RTFO) yardımıyla PAV deneyi öncesinde tamamlanmıştır. RTFOT deneyi, ASTM D2872 şartnamesine uygun olarak gerçekleştirilmiştir (ASTM D2872, 2012). Kısa vadeli yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde gerçekleştirilen PAV deneyleri ise ASTM D6521 standardına göre yapılmıştır (ASTM D6521, 2019).

## 2.2. Geleneksel Deney Yöntemleri

Çalışmada kullanılan iki farklı penetrasyona sahip bağlayıcı türünün fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla geleneksel deney yöntemleri olarak adlandırılan penetrasyon, yumuşama noktası deneyleri bağlayıcılar üzerinde uygulanmıştır. Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri ilgili Türk Standartlarına, uygun olarak gerçekleştirilmiştir (TS EN 1426, 2015; TS EN 1427, 2015). Çalışmada ayrıca, penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinin bir arada kullanılmasıyla hesaplanan ve bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetini gösteren penetrasyon indeksi parametreleri bu bağlayıcı türleri için aşağıda verilen Denklem 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

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

Burada PI; penetrasyon indeksi, SP; bağlayıcı türünün yumuşama noktasını, Pen<sub>25</sub>; bağlayıcının 25 °C'deki penetrasyon değerini ifade etmektedir.

## 2.3. Dönel Viskozite Deneyi

Farklı penetrasyon değerlerine sahip bağlayıcıların yüksek sıcaklık bölgesinde akışkanlık özelliklerinin incelenmesi için Brookfield, dönel viskozite cihazı kullanılmıştır. ASTM D 4402 standardına uygun olarak, viskozimetre cihazına takılan ve 20 dev/dakika hıza sahip dönen silindirik bir uç (spindle) yardımıyla bağlayıcıların dönel viskozite değerleri tayin edilmiştir (ASTM D 4402, 2006). Çalışmada viskozite değerleri, 135 ve 165 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta okunmuştur. Bu viskozite okumaları yardımıyla ayrıca bu bağlayıcı türleriyle hazırlanacak bitümlü sıcak karışımların ideal karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları matematiksel yöntemlerle hesaplanmıştır.

## 2.4. Küçük Genlik Salınım Kesme Deneyi

Küçük genlik salınım kesme (SAOS) deneyi bağlayıcının viskoelastik limitleri (LVE) içerisinde sabit bir deformasyon değerinde belirli bir frekans aralığında gerçekleştirilen reolojik bir test yöntemidir. Dinamik kayma reometresi (DSR) cihazı yardımıyla sabit deformasyon altında uygulanan frekansların değiştirilmesiyle gerçekleştirilen bir reolojik deney türüdür. Bu sayede bağlayıcının yükleme hızına karşı hassasiyeti değerlendirilebilir. SAOS deneyi bağlayıcının viskoelastik limitleri içerisinde gerçekleştirildiği için deney öncesinde, bağlayıcılara ait LVE değerlerinin tespit edilerek bu değerler altında bir deformasyon değerinin seçilmesi gereklidir. Dolayısıyla, çalışma kapsamında bağlayıcıların öncelikle genlik tarama deneyi ile LVE değerleri belirlenmiş ardından LVE sınırları içerisinde kalan ortak bir deformasyon değeri tayin edilmesi suretiyle SAOS deneyleri uygulanmıştır. LVE deneyleri sonrası bağlayıcılara %1'lik deformasyon uygulanması uygun görülmüştür. Çalışmada kullanılan, Anton Paar Smart Pave dinamik kayma reometresi cihazına ait görünüm Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. DSR cihazının görüntüsü

SAOS deneyinden elde edilen veriler, diğer reolojik çalışmalarda da kullanılabilirdiğinden uygulanan frekans aralığının (reometrenin tork değerlerini kontrol edilerek) olabildiğince geniş bir aralıkta seçilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında uygulanan SAOS deneyleri, 0,01-100 rad/sn frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Deney sıcaklığı, bağlayıcıların fiziksel sertlik durumları dikkate alınarak 10-50°C aralığında 10 °C artışlar şeklinde seçilmiştir. Sıcaklık değerlerine bağlı olarak 8 mm (düşük sıcaklıklarda 10-30 °C) ve 25 mm (40-50 °C) olmak üzere iki farklı düz plaka, deney geometrisi olarak çalışmada kullanılmıştır. Bu başlıklara ait görüntü Şekil 2’de gösterilmiştir. (Laukkanen ve Winter, 2018).



Şekil 2. Çalışmada kullanılan 8 ve 25 mm’lik DSR başlıkları

### 2.5. Zaman Sıcaklık Prensibiyle Ana Eğrilerin Oluşturulması

SAOS deneyinden elde edilen depolama ve kayıp modülü gibi reolojik parametrelerin, zaman sıcaklık süper pozisyon (time-temperature superposition, TTS) prensibi uygulanarak belirlenen bir referans sıcaklık derecesinde daha geniş bir frekans aralığında incelenmesi mümkündür. Ana eğri (master curve) olarak isimlendirilen bu grafikler yardımıyla reometrelerin okumasının mümkün olmadığı kadar düşük ve yüksek frekanslarda bağlayıcının reolojik özelliklerine ait veriler incelenebilmektedir.

Çalışma kapsamında bağlayıcılara ait kompleks kayma modülü, depolama modülü ve kayıp modülü parametrelerine ait ana eğriler SAOS verileri yardımıyla oluşturulmuştur. SAOS deneylerinde kullanılan parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Ana eğrilerin oluşturulması için seçilen SAOS deney parametreleri

Kullanılan frekanslar (rad/sn)															
100	54,1	29,3	15,8	8,58	4,64	2,51	1,36	0,74	0,40	0,21	0,12	0,06	0,03	0,02	0,01
Sıcaklıklar (°C)															
10			20			30			40			50			

Ana eğrilerin oluşturulmasında kullanılan kayma faktörlerini (shift factors) dinamik kayma reometresine ait yazılım matematiksel hesap yöntemleriyle otomatik olarak hesaplamaktadırlar. Bu hesaplanan kaydırma faktörleri Denklem 2 ve Denklem 3’te verilen Williams–Landel–Ferry (WLF) ve Arrhenius eşitliklerinden hesaplanan kaydırma faktörleriyle kıyaslanmıştır. Çalışmada ayrıca, Arrhenius eşitliği yardımıyla bağlayıcıların aktivasyon enerjileri ( $\Delta H$ ) hesaplanmıştır (Williams ve ark., 1955; Lytton ve ark., 1993).

$$\log a_t = \frac{C_1(T-T_{ref})}{C_2+(T-T_{ref})} \quad (2)$$

$$\log a_t = C \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) = \log \frac{E_a}{2.303 R} = \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (3)$$

Burada,  $C_1$  ve  $C_2$  malzemeye ait ampirik parametreler,  $a_t$  kaydırma faktörü,  $T$  deney sıcaklığı,  $T_{ref}$  referans sıcaklık,  $E_a$  aktivasyon enerjisi,  $R$  evrensel gaz sabitidir.

### 2.6. Lineer Genlik Tarama (LAS) Deneyi

Son yıllarda geliştirilmiş olan Lineer genlik tarama (LAS) deneyiyle bağlayıcıların orta sıcaklık bölgesindeki yorulma ömrünün tahmin edilmesi mümkün olmaktadır. Standartları AASHTO TP101’de tanımlanan LAS deneyi, viskoelastik sürekli hasar (Viscoelastic continuum damage, VECD) teorisine bağlı olarak bağlayıcıya %0’dan başlamak suretiyle %30 mertebesine kadar sürekli lineer şekilde artan deformasyon miktarları uygulanmaktadır (AASHTO TP101, 2012). Yorulma deneyleri genel olarak yaşlandırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmekte, dolayısıyla, dönel ince film halinde ısıtma etüvü (RTFO) ile kısa vadeli yaşlandırılması gerçekleştirilmiş bağlayıcı numunelerin ayrıca basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ile uzun vadeli olarak yaşlandırılması ve bu şekilde LAS deneylerinde kullanılmaları gerekmektedir.

VECD teorisine göre bağlayıcıya uygulanan deformasyon miktarı ve yine bağlayıcıya ait A ve B parametreleri yardımıyla bağlayıcıların yorulma ömrü ( $N_f$ ) aşağıdaki verilen formüller yardımıyla hesaplanmaktadır (Hassanpour Kasanagh ve ark. 2021); Bunun için, LAS deneyi öncesinde frekans

deneyi ile kompleks kayma modülü  $|G^*|(\omega)$  ve faz açısı  $\delta(\omega)$  parametreleri belirlenir. Bu sayede Denklem 4 kullanılarak bağlayıcıya ait depolama modülü  $G'(\omega)$  tayin edilir.

$$G'(\omega) = |G^*|(\omega) \times \cos \delta(\omega) \quad (4)$$

Bağlayıcının depolama modülü değerinin  $G'(\omega)$  açısal frekansla  $(\omega)$  olan ilişkisi aşağıda verilen şekilde modellenebilir (Denklem 5).

$$\log G'(\omega) = m(\log \omega) + b \quad (5)$$

m, yani eğimin tersi  $\alpha$  parametresidir (Denklem 6).

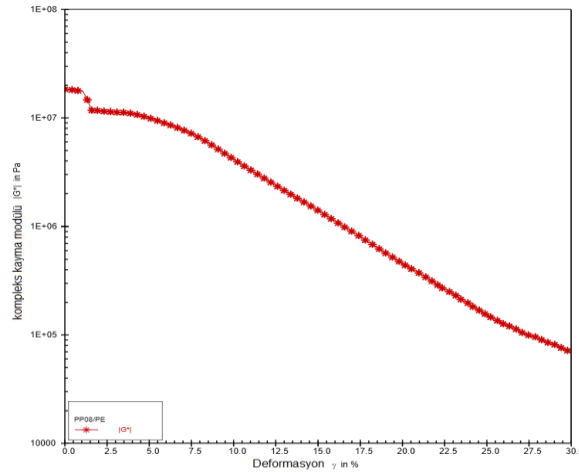
$$\alpha = \frac{1}{m} \quad (6)$$

Bağlayıcıda oluşan hasar birikimi  $D(t)$  Denklem 7 ile hesaplanır.

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi \gamma_{p,i}^2 (C_{i-1} - C_i)]^{1+\alpha} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (7)$$

Burada C'nin (zamana bağlı parametreleri) hesaplanan andaki kompleks kayma modülü değerinin başlangıç kompleks kayma değerine oranı;  $\gamma_{p,i}$  uygulanan kayma deformasyonu genliği,  $t$  ise hasar birikiminin hesaplandığı anı ifade etmektedir.

Şekil 3'te LAS deneyinde elde edilen tipik bir deformasyon miktarına bağlı bağlayıcının kompleks kayma modülünün değişimi görülmektedir. Bu egride sayesinde, belirli bir andaki kompleks kayma modülü ile başlangıç anındaki kompleks kayma modülü değerleri saptanabilmekte, bu sayede C parametresi yukarıda belirtildiği şekilde hesaplanabilmektedir.



Şekil 3. LAS deneyine ait tipik kompleks kayma modülü vs. deformasyon eğrisi

Malzeme bütünlüğünün zamana bağlı denklem modeli Denklem 8' de gösterilmiştir.

$$C(t) = C_0 - C_1 D(t)^{C_2} \quad (8)$$

Burada  $C_0$ , malzeme bütünlüğünün başlangıç değeri (genellikle 1 alınır),  $C_1$  ve  $C_2$ , parametrik katsayılarıdır.

Yorulma noktasındaki hasar yoğunluğu ( $D_f$ ) Denklem 9 ile hesaplanmaktadır.

$$D_f = \left( \frac{C_0 - C_f}{C_1} \right)^{1/C_2} \quad (9)$$

Bitümün yorulma performansının tayinin de kullanılan A ve B parametreleri sırasıyla Denklem 10 ve Denklem 11 ile belirlenmektedir.

$$A = \frac{f \cdot D_f^{1+\alpha(1-C_2)}}{[1+\alpha(1-C_2)](\pi \cdot C_1 \cdot C_2)^\alpha} \quad (10)$$

$$B = 2\alpha \quad (11)$$

A, B parametrelerinin belirlenmesiyle birlikte bitümlü bağlayıcılar için yorulma ömrü ( $N_f$ ) tahmin edilebilmektedir (Denklem 12).

$$N_f = A \times (\gamma_p)^{-B} \quad (12)$$

Burada, A ve B deneysel parametreler, bağlayıcıda meydana gelen deformasyondur.

LAS deneyi yardımıyla hesaplanan A ve B parametreleri sırasıyla bağlayıcının bütünlüğünü koruma (structural integrity) ve deformasyon değişimine olan hassasiyeti ifade etmektedir (Hassanpour Kasanagh ve ark. 2021). Araştırma kapsamında bağlayıcılar üzerinde uygulanan LAS deneyleri orta sıcaklık sınıfını temsil etmek üzere 25 °C'de gerçekleştirilmiştir. Deney geometrisi olarak, reometrenin tork gücünün aşılması için standartlara uygun olarak 8 mm numune çapı ve 2mm plakalar arası kalınlık kullanılmıştır. Çalışma neticesinde, bağlayıcılara ait A ve B parametreleri belirlenmiş, malzeme bütünlüğü (C) hasar yoğunluğuna (D) bağlı olarak tespit edilmiş ve son olarak ilgili parametreler kullanılarak bağlayıcıların %2,5 ve %5,0 deformasyon değerlerine karşılık gelen  $N_f$  değerleri hesaplanmıştır.



### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Geleneksel Deney Yöntemleri

Bağlayıcılara ait temel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen fiziksel deney yöntemlerine ait sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde beklenildiği üzere B50/70 bağlayıcısının B160/220 sınıflı bağlayıcıya göre daha düşük penetrasyon ve daha yüksek yumuşama noktası değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç, aynı sıcaklık koşulları altında bu iki viskoelastik malzeme türünden B50/70 bağlayıcısının daha viskoz özellikte olduğunu ifade etmekte, bu da bu bağlayıcı türünün orta ve yüksek sıcaklık bölgesindeki uygulamalardaki uygunluğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, B50/70 bağlayıcısına göre yumuşak yapıda olan B160/220 bağlayıcısının daha düşük sıcaklığa sahip iklimler için uygun olduğu görülmektedir. Bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri yardımıyla hesaplanan penetrasyon indeksi değerleri incelendiğinde (Tablo 2), B50/70 ve B160/220 bağlayıcılarının birbirlerine oldukça yakın PI değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Bu sonuç, ısı hassasiyetini ifade eden PI değerinin bağlayıcının sertlik değeriyle doğrudan ilişki olmadığı sıcaklık karşısında bağlayıcının sertlik durumundaki değişimi ortaya koyduğunu vurgulamaktadır. Genel olarak (-2,0 ve +2,0) aralığında PI değerlerine sahip bitümlerin yol esnek üstyapılarında bağlayıcı malzeme olarak kullanımının uygunluğu literatürde belirtilmektedir (Button ve ark., 1982).

**Tablo 2.** Geleneksel test yöntemlerine ait sonuçlar

Özellikler	Bağlayıcı türleri	
	B160/220	B50/70
Penetrasyon (0,1 mm)	185	58
Yumuşama noktası (°C)	37,5	47,5
Penetrasyon indeksi (PI)	-1,55	-1,52

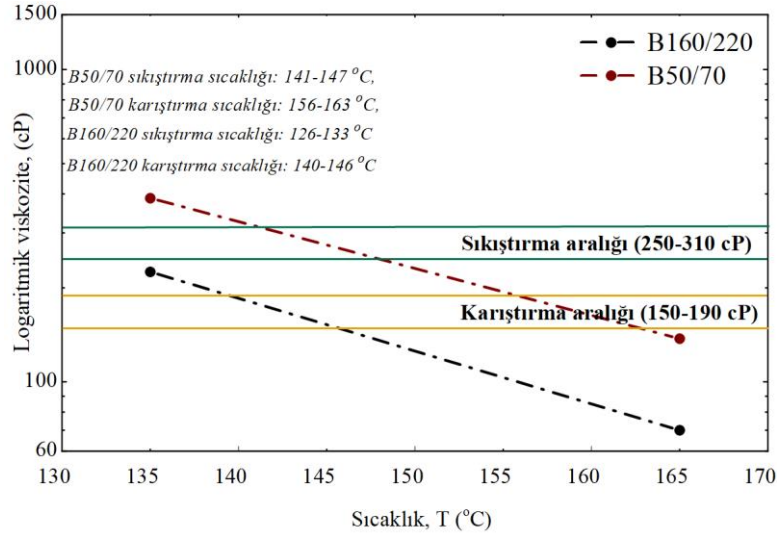
#### 3.2. Dönel Viskozite Deneyi

Şekil 4’te B50/70 ve B160/220 katkılı bağlayıcıların 135 ve 165 °C’deki viskozite değerleri grafik olarak verilmiştir. Viskozite değerleri incelendiğinde, B50/70 bağlayıcı türünün viskozite değerlerinin B160/220 bağlayıcısına göre her iki sıcaklık derecesinde de yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 4’te bitümlü sıcak karışımlar için karıştırma ideal bağlayıcı viskozite değerleri (150 - 190 cP), sıkıştırma için ideal bağlayıcı viskozite değerleri (250 - 310 cP) log-viskozite/sıcaklık eğrisinde işaretlenmiştir. Bağlayıcıların viskozite eğrilerine ait logaritmik denklemler matematiksel olarak belirlenerek ideal karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları hesap yoluyla bulunmuştur. Tablo 3’te verilen ideal karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları incelendiğinde, viskozite değerlerine paralel olarak B50/70 bağlayıcısının ideal karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Ancak, dönel viskozite deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, her iki bağlayıcı türünün de Superpave bağlayıcı şartnamesinde tanımlanan 3000 cP üst limit değerinin çok altında viskozite değerlerine sahip oldukları görülmektedir (Ghuzlan ve ark., 2013). Benzer şekilde, ideal karıştırma ve sıkıştırma

sıcaklıklarının da enerji sarfiyatı veya bitümün degradasyona (kimyasal bozulma) uğrayabileceği sıcaklık değerlerine erişmediği çalışma kapsamında belirlenmiştir (Chakravarty ve ark. 2021).

**Tablo 3.** Saf ve SBS katkıli bağlayıcılara ait döneel viskozite deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	RV (cP)		Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Sıcaklığı (°C)
	135°C	165°C		
B160/220	225,0	70,0	126-133	140-146
B50/70	387,5	137,5	141-147	156-163

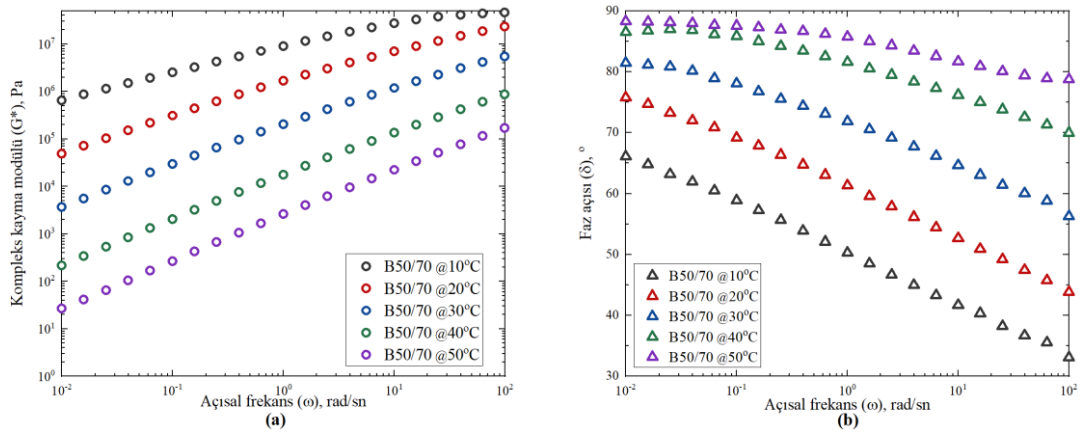


**Şekil 4.** B50/70 ve B160/220 bağlayıcılarına ait viskozite-sıcaklık eğrileri

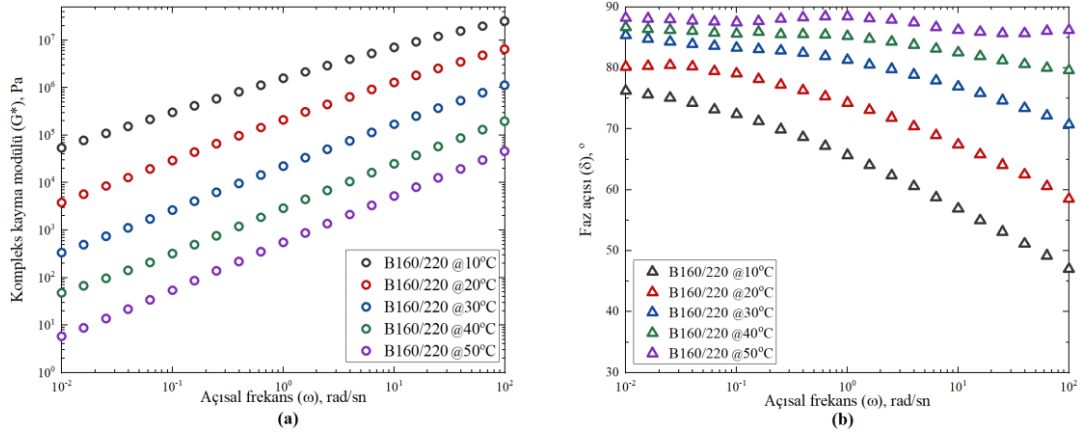
### 3.3. Küçük Genlik Salınım Kesme Deneyi

B50/70 ve B160/220 sınıfına ait bağlayıcıların yükleme süresine bağlı olarak deformasyon özelliklerinin incelenmesi amacıyla çalışma kapsamında küçük genlik salınım kesme (SAOS) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney neticesinde elde edilen kompleks kayma modülü ve faz açısı değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi Şekil 5 ve 6'da verilmiştir. Buna göre, 0,01-100 rad/sn aralığında, her frekans değerinde B50/70 türü bağlayıcının kompleks kayma dayanımı değerlerinin, B160/220 türü bağlayıcının kompleks kayma dayanımı değerlerine göre daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Bilindiği üzere, kompleks kayma dayanımı depolama ve kayıp modüllerinin bileşkesidir ve bağlayıcıların kayma gerilmelerine karşı dayanımını ortaya koymaktadır. Depolama modülü, malzemede depolanabilen enerjiyi ve dolayısıyla elastikiyet kabiliyetini sembolize ederken, kayıp modülü malzemenin uygulanan dairesel gerilme neticesinde kaybolan enerjiyi ifade etmektedir. Yüksek kompleks kayma modülü değerleri bağlayıcıların kayma dayanımı direncinin de daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. Bununla birlikte, trafiğin durağan olduğu durumu ifade eden düşük frekans değerlerinde, iki bağlayıcı türüne ait kompleks kayma dayanımları arasındaki farkın daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu sonuç, bağlayıcıların yükleme zamanına bağlı deformasyon özelliğini ortaya koymakta, ayrıca B50/70 bitümünün tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonların en sık rastlandığı

durağan trafikte B160/220 bitümüne göre belirgin biçimde daha dirençli olduğunu ifade etmektedir (Salehfard ve ark., 2017). Şekil 5.a'da verilen B50/70 bitümüne ait  $G^*$  parametresi incelendiğinde, orta sıcaklık bölgesinde (30-50 °C), artan frekans değerlerine karşılık (logaritmik ölçekte) bu parametrenin orantılı biçimde artma eğiliminde olduğu, ancak test sıcaklığının azalmasıyla birlikte (özellikle 10-20 °C aralığında) parametredeki artış miktarının azaldığı, diğer bir ifadeyle  $G^*$  eğrisinin düşük sıcaklık ve yüksek frekans bölgesinde düzleşme eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, verilen B160/220 bağlayıcısının  $G^*$  değerlerinin sıcaklık ve frekans değişimine karşı daha lineer bir değişim gösterdiği görülmektedir (Şekil 6.a). SAOS deneylerine ait diğer bir reolojik parametre olan faz açısı ( $\delta$ ) değeri viskoelastik malzeme uygulanan yükleme anı ve yükleme sonucu malzemede meydana gelen deformasyonun oluşma süresi arasındaki farkı ifade etmekte ve bu şekilde malzemenin elastik davranışı hakkında bilgi vermektedir. B160/220 bitümüne ait faz açısı değerleri incelendiğinde, özellikle 40 °C sıcaklığın üzerinde bağlayıcının elastik deformasyon özelliklerini tümüyle kaybettiği ve neredeyse tam viskoz davranışa geçtiği görülmektedir (Şekil 6.b). Bu sonuç, sıcak iklimlere sahip bölgelerde durağan trafik koşulları altında saf bitümün bağlayıcı olarak kullanılması durumunda kalıcı deformasyonların önemli ölçüde artacağını ortaya koymaktadır. Orta sıcaklık bölgesinde, B50/70 bitümünde meydana gelen deformasyonda elastik deformasyon oranının B160/220 bitümüne göre önemli ölçüde fazla olduğu görülmektedir (Şekil 5.b) (Airey, 2003). SAOS deneylerinde elde edilen sonuçlar, bağlayıcıların, yükleme hızının daha uzun olduğu durumlarda daha belirgin hale geldiğini hem kompleks kayma dayanımı değerleriyle hem de faz açısı parametresiyle ortaya koymaktadır.



Şekil 5. (a) B50/70bağlayıcılarına ait kompleks kayma modülü, ve (b) faz açısı değerleri



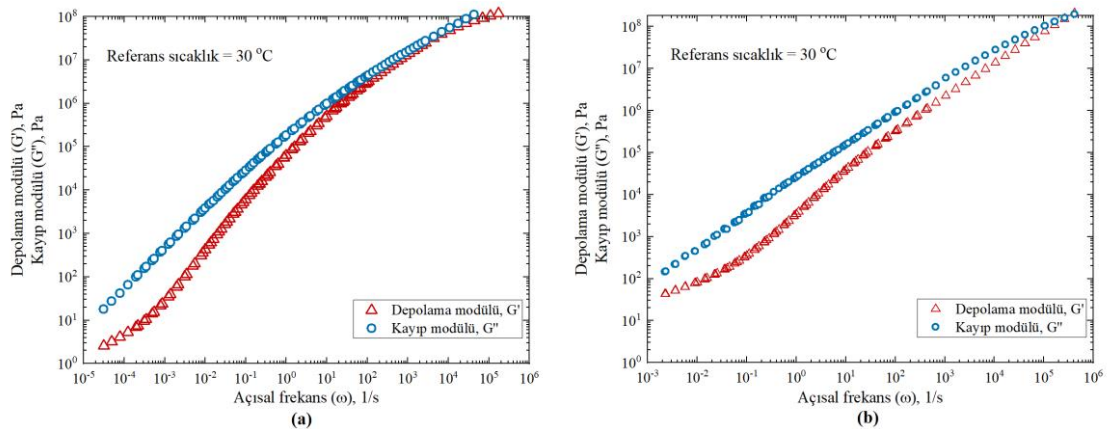
Şekil 6. (a) B160/220 bağlayıcılarına ait kompleks kayma modülü ve (b) faz açısı değerleri

### 3.4. Ana Eğrilere İlişkin Bulgular

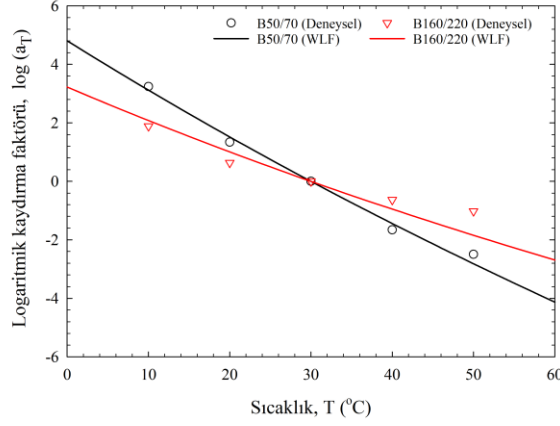
0,01-100 rad/sn frekans ve 10-50 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen SAOS deneyine ait verilerin zaman-sıcaklık süperpozisyonu prensibi yardımıyla belirli bir referans sıcaklığına aktarılmasıyla B50/70 ve B160/220 bağlayıcılarına ait ana eğriler (master curves) oluşturulmuş ve bu eğriler Şekil 7’de verilmiştir. Referans sıcaklık olarak 30 °C’de çizilen ana eğrilerde bağlayıcılara ait depolama ve kayıp modülleri bulunmaktadır. Her iki bağlayıcı türünün de viskoelastik deformasyon davranışının gözlemlenebilmesi için ideal olabileceği düşünülen 30 °C referans sıcaklık değeri çalışmada belirlenmiştir. Yükleme süresine bağlı olarak depolama ve kayıp modüllerindeki değişim incelendiğinde, yükleme süresinin uzamasıyla birlikte (yüksek frekans seviyelerden düşük frekans seviyelerine) bağlayıcıların depolama ve kayıp modülü değerlerinin hızla azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte B50/70 bağlayıcısının en düşük frekans seviyelerinde depolama stabilitesi değerlerinin sabit bir değer aldığı ve plato olarak isimlendirilen bölgenin B160/220 bağlayıcısına göre daha belirgin şekilde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu sonuç, yarı katı yapıda bulunabilen asfaltten bileşenin B50/70 bağlayıcısı için daha yüksek oranlarda (diğer bitüm bileşenlerine göre) bulunduğunu ifade edebilmektedir (Behzadfar ve Hatzikiriakos, 2014). B160/220 bağlayıcısına ait kayıp modülü değerleri incelendiğinde frekans değişimine oranlı biçimde  $G''$  değerlerinin değişim gösterdiği dolayısıyla eğrinin doğrusal özellikte olduğu (logaritmik ölçekte) görülmektedir. Öte yandan B50/70 bağlayıcısının kayıp modülü değerlerinin düşük frekans seviyelerinde frekans değerlerinin azalmasıyla birlikte daha yüksek oranda azalma eğilimine geçtiği görülmektedir. Bu sonuç, B50/70 bağlayıcısının deformasyon davranışının yükleme hızına bağlı olarak değişimini ifade etmektedir. 30°C’lik referans sıcaklık değerinde depolama modülü değerlerinin kayıp modülü değerleriyle çakıştığı kesişme frekansı “cross frequency” olgusunun her iki bağlayıcı türü içinde gözlemlenebildiği görülmektedir. Bilindiği üzere depolama modülü, viskoelastik malzemenin elastik deformasyon, kayıp modülü ise geri dönmeyen kalıcı deformasyon bileşenini temsil etmektedir. Dolayısıyla, bu iki modülün kesişme noktası, SBS katkılı bağlayıcının yarı katı (kavuçuk benzeri-rubberlike) davranıştan viskoz davranışa geçişini ortaya koymaktadır (Gunay ve ark., 2020). Buna

göre, B50/70 bağlayıcısı için kesişme frekansı değeri  $10^3$  frekans mertebesinde gözlemlenirken, B160/220 bitümü için bu değer yaklaşık  $10^5$  1/s frekans değeridir. 30 °C'lik referans sıcaklık değerinde B50/70 bitümünün daha düşük frekans seviyelerinde kesişme frekansına sahip olması bu bağlayıcı türünün daha uzun yüklenme sürelerinde dahi viskoelastik davranış göstermeye devam ettiğini ortaya koymaktadır.

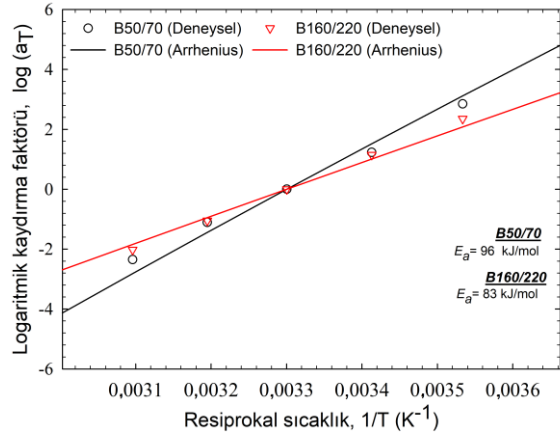
SAOS deney sonuçlarının TTS prensibiyle kaydırılması sonucu elde edilen ana eğrilere ait kayma faktörlerinin (shift factor), WLF ve Arrhenius denklemleri yardımıyla hesaplanan kayma faktörleri ile karşılaştırılmaları Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. Buna göre, hem B50/70 hem de B160/220 bağlayıcıları için deneysel yöntemle tespit edilen kaydırma faktörleriyle denklemler yardımıyla hesaplanan kaydırma faktörlerinin genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, B160/220 bağlayıcısına ait WLF denklemiyle hesaplanan kaydırma faktörlerinin (Şekil 8) sıcaklık artışıyla birlikte (40-50 °C) deneysel kaydırma faktörlerinden uzaklaştığı görülmektedir. Bu sonuç, bu bağlayıcı türünün orta sıcaklık mertebelerinde tümüyle akışkan davranış göstermesi ve artan sıcaklık değerlerine karşı viskoelastik deformasyon modelinden ayrılması ile açıklanabilmektedir. Çalışmada ayrıca, Arrhenius denklemi ile bağlayıcıların aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Buna göre, Şekil 9'da belirtildiği üzere, B50/70 bitümünün aktivasyon enerjisi 96 kJ/mol, B160/220 bitümünün aktivasyon enerjisi ise 83 kJ/mol olarak bulunmuştur. Bu değerlerin literatürde diğer bağlayıcı türleri için hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleriyle uyumlu olduğu görülmektedir (Yılmaz ve ark., 2022). Yüksek aktivasyon enerjisi malzemelerin reaksiyona girmek için gerekli olan minimum enerjiyi ifade etmektedir. B50/70 bitümünün B160/220 bağlayıcısına göre daha yüksek aktivasyon enerjisine sahip olması, bu bağlayıcı türünün daha fazla karmaşık molekül içermesi ile açıklanabilmektedir (Mezger, 2011). Arrhenius bağıntısıyla hesaplanan kaydırma faktörlerinin deneysel sonuçlara göre bulunan kaydırma faktörlerine WLF eşitliğine göre daha yakın olduğu Şekil 8-9'da görülmektedir.



Şekil 7. (a) B50/70 ve (b) B160/220 bağlayıcılarına ait ana eğriler



Şekil 8. B50/70 ve B160/220 bağlayıcılarının WLF bağıntısına ait kaydırma faktörleri



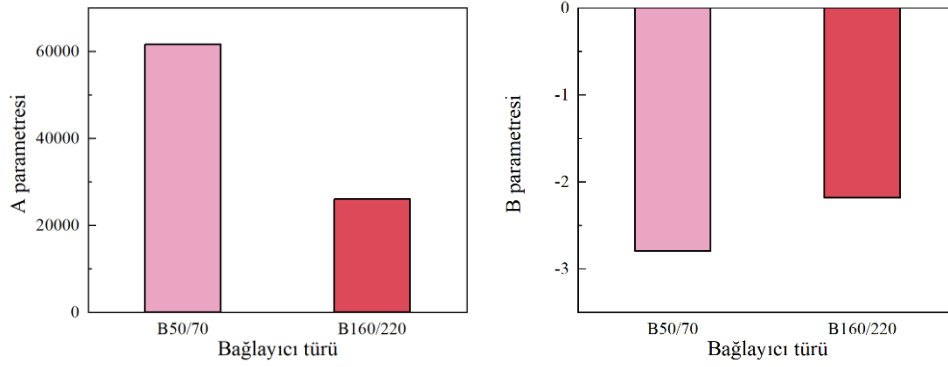
Şekil 9. B50/70 ve B160/220 bağlayıcılarının Arrhenius bağıntısına ait kaydırma faktörleri

### 3.5. Lineer Genlik Tarama (LAS) Deneyi

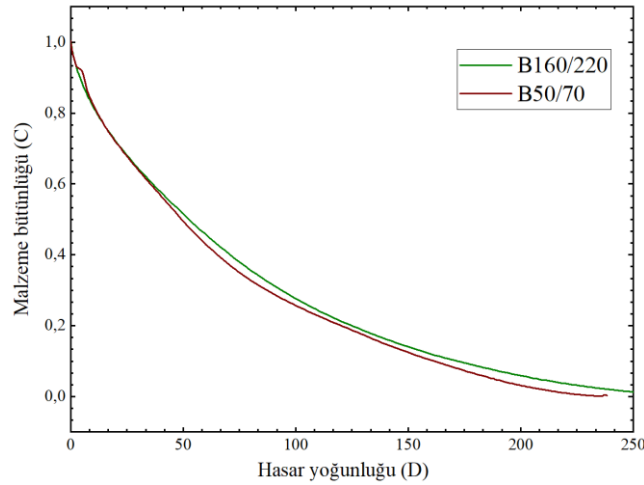
Çalışma kapsamında, farklı penetrasyon değerlerine sahip bağlayıcılar üzerinde gerçekleştirilen lineer genlik tarama (LAS) deneyleri neticesinde bağlayıcıların yorulma ömrüne ilişkin elde edilen reolojik parametreler Şekil 10'da verilmiştir. Buna göre, Şekil 10.a ve 10.b incelendiğinde, B50/70 bağlayıcısının A parametresinin B160/220 bağlayıcısına göre daha yüksek bir değere sahip olduğu, öte yandan B parametresinin ise yine B160/220 bağlayıcısına göre mutlak değer olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Malzemenin bütünlüğü koruması (structural integrity) ile ilişkili olan A parametresinin yüksek olması ve bağlayıcının uygulanan deformasyon değişimine karşı duyarlılığını ifade eden B parametresinin mutlak değer olarak düşük olması daha uzun yorulma ömrü anlamına gelebilmektedir (Saboo ve ark., 2018; HassanpourKasanagh ve ark., 2020).

Farklı penetrasyon değerlerine sahip bağlayıcıların hasar yoğunluğuna (D) bağlı olarak malzeme bütünlüğü (C) değerinin değişimi grafik olarak Şekil 11'de verilmiştir. Buna göre, B160/220 bağlayıcısının hasar yoğunluğu hattı boyunca daha yüksek malzeme bütünlüğü değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç B160/220 bağlayıcısının daha iyi bir yorulma direncine sahip olduğunu ifade etmektedir. Bununla birlikte viskoelastik sürekli hasar (VECD, Viscoelastic continuum damage) teorisine göre, bağlayıcıların yorulma ömrü  $N_f = A \times \gamma^{-B}$  formülü yardımıyla tahmin

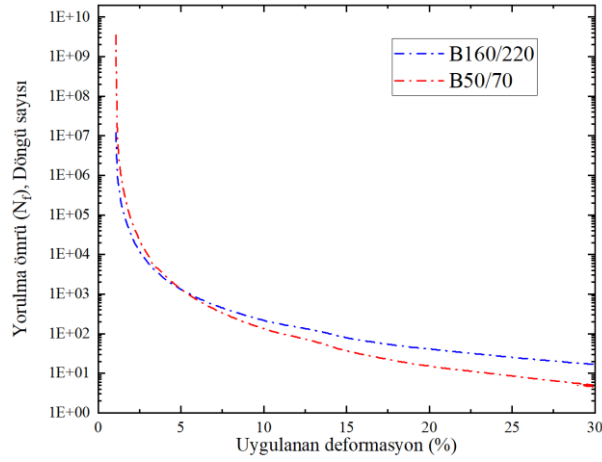
edilebilmektedir (Joohari ve Giustozzi, 2022). A ve B parametreleri ve %0-30 aralığında lineer şekilde uygulanan deformasyon seviyeleriyle hesaplanan bağlayıcılara ait  $N_f$  değerleri Şekil 12’de verilmiştir. Buna göre, B160/220 bağlayıcısının yorulma ömrünün yüksek deformasyon mertebelerinde B50/70 bağlayıcısına göre daha üstün olduğu belirlenmiştir. Ancak, LAS deneylerinde, VECD teorisine göre kritik olan ve esnek kaplamaların gerçek uygulamalarda maruz kalabileceği %2,5 ve %5,0 gibi nispeten düşük deformasyon seviyelerinde B50/70 bağlayıcısının (B160/220 bağlayıcısına göre) daha uzun bir yorulma ömrüne sahip olabileceği görülmektedir.



Şekil 10. LAS deneyine ait A ve B parametreleri



Şekil 11. Bağlayıcılara ait malzeme bütünlüğü - hasar yoğunluğu ilişkisi



Şekil 12. B50/70 ve B160/220 bağlayıcılarının yorulma ömrü

#### 4. Sonuçlar

Çalışma kapsamında, B50/70 ve B160/220 olmak üzere iki farklı penetrasyon değerine sahip bağlayıcı türü üzerinde gerçekleştirilen fiziksel ve reolojik deney programı kapsamında elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir;

Geleneksel deney yöntemleri neticesinde elde edilen penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinin bir arada kullanılmasıyla hesaplanan PI değerlerinin her iki bitüm türü içinde oldukça yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, bağlayıcı türlerinde sıcaklık hassasiyeti kavramının sertlik değerleriyle doğrudan ilişkili olmadığını ifade etmektedir. Bağlayıcılara ait dönel viskozite değerleri incelendiğinde, her iki bağlayıcı türünün de beklenildiği üzere Superpave Şartnamesinde ifade edilen limit viskozite değerlerinin altında kaldığı ve benzer şekilde bu bağlayıcı türleriyle elde edilecek bitümlü sıcak karışımların (BSK) ideal karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının da aşırı enerji tüketimine veya bitümde yapısal bozulmaya sebep olabilecek yüksek sıcaklık derecelerine ulaşmadığı belirlenmiştir. SAOS deneyleri neticesinde, B50/70 bitümünün özellikle durağan trafiği sembolize eden çok düşük frekans değerlerinde B160/220 bağlayıcısına göre üstün  $G^*$  değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan, B160/220 bitümüne ait  $\delta$  değerlerinin özellikle 40 °C sıcaklığın üzerinde, tüm frekans aralığında tam viskoz davranışı ifade eden 90° mertebesine çok yaklaştığı, diğer bir ifadeyle bu sıcaklık değerinin üzerinde tümüyle elastik deformasyon özelliklerini kaybettiği gözlemlenmiştir. 30 °C'lik referans sıcaklık değerinde çizilen ana eğrilerde, B50/70 bağlayıcısının çok düşük frekanslarda depolama stabilitesi değerlerinin belirli bir sabit değere erişme eğiliminde olduğu ve bu sıcaklık değerinde yarı katı malzeme benzeri deformasyon davranışı gösterebileceği belirlenmiştir. Lineer genlik tarama testi neticesinde B160/220 bağlayıcısının deformasyon değişimine karşı duyarlılığının daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu iki bağlayıcı türünün yorulma ömürleri kıyaslandığında deformasyon miktarlarının sürekli olarak artmasıyla birlikte (%5-30) yumuşak yapıdaki B160/220 bağlayıcısının yorulma ömrünün daha uzun olduğu ancak, gerçek uygulamalarda meydana gelebilecek deformasyon seviyelerinde (%5 deformasyon altında) B50/70 bağlayıcısının daha sert yapıda olmasına karşılık daha uzun bir yorulma ömrünün olabileceği ortaya konmuştur.



## **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## **Araştırmacının Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

## **Kaynakça**

- AASHTO TP 101. Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the Linear Amplitude Sweep 2012; American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.
- Ahmedzade P. The investigation and comparison effects of SBS and SBS with new reactive terpolymer on the rheological properties of bitumen. *Construction and Building Materials* 2013; 38: 285-291.
- Airey GD. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel* 2003; 82(14): 1709-1719.
- ASTM D4402. Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. *Annual Book of ASTM Standards*, West Conshohocken, PA, 2006.
- ASTM D2872. Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test). *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, 2012.
- ASTM D6521 Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV) 2019. *American Association of State Highway and Transportation Officials*, West Conshohocken, PA.
- Behzadfar E., Hatzikiriakos SG. Rheology of bitumen: Effects of temperature, pressure, CO<sub>2</sub> concentration and shear rate. *Fuel* 2014; 116: 578-587.
- Button JW., Epps JA., Little DN., Gallaway BM. Asphalt temperature susceptibility and its effect on pavements. *Transportation Research Record* 1982; 843.
- Chakravarty H., Sinha S., Kumar P., Das S. Role of graphene oxide nanosheet on mixing and compacting temperature of bitumen. In *Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes Conference 2021*; 110-117.
- Ghuzlan KA., Al-Khateeb GG., Qasem Y. Rheological properties of polyethylene-modified asphalt binder. *Athens Journal of Technology and Engineering* 2013; 10: 1-14.
- Gunay T., Tomkovic T., Hatzikiriakos, SG. Thermorheological properties of asphalt binders. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 2020; 98(8): 1803-1814.

- Hassanpour Kasanagh S., Ahmedzade P., Günay T. Polimer katkılı bitümlü sıcak karışımların İzmir hava durumu şartlarındaki marshall stabilite performansının incelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 2021; 21(5): 1157-1166
- Joohari IB., Giustozzi F. Oscillatory shear rheometry of hybrid polymer-modified bitumen using multiple stress creep and recovery and linear amplitude sweep tests. Construction and Building Materials 2022; 315: 125791.
- Laukkanen OV., Winter HH. Strain accumulation in bituminous binders under repeated creep-recovery loading predicted from small-amplitude oscillatory shear (saos) experiments. Mechanics of Time-Dependent Materials 2018; 22(4): 499–518.
- Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. Advances in Colloid and Interface Science 2009; 145(1-2): 42-82.
- Lytton RL., Uzan J., Fernando, EG., Roque R., Hiltunen D., Stoffels, SM. Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixes. Strategic Highway Research Program 1993; Washington, DC.
- McNally T. Polymer modified bitumen: Properties and characterisation. Elsevier Woodhead Publishing 2011; 424.
- Mezger T. Basics of rheology workshop 2011. Applied Rheology 2011; 21(5): 303–304.
- Rossi CO., Spadafora A., Teltayev B., Izmailova G., Amerbayev Y., Bortolotti V. Polymer modified bitumen: Rheological properties and structural characterization. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2015; 480: 390-397.
- Saboo N., Kumar R., Kumar P., Gupta A. Ranking the rheological response of SBS and EVA modified bitumen using mscr and las tests. Journal of Materials in Civil Engineering 2018; 30(8): 04018165.
- Salehfard R., Abdi A., Amini B. Effect of SBR/NC on the rheological properties of bitumen and fatigue resistance of hot mix asphalt. Journal of Materials in Civil Engineering 2017; 29(5): 04016282.
- TS EN 1426. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar – İğne batma derinliği tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 2015; 16.
- TS EN 1427. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Yumuşama noktası tayini – Halka ve bilye yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 2015; 20.
- Williams ML., Landel RF., Ferry JD. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. Journal of the American Chemical Society 1955; 77(14): 3701–3707.
- Yılmaz B., Özdemir AM., Gürbüz HE. Assessment of thermal properties of nanoclay-modified bitumen. Arabian Journal for Science and Engineering 2022; 1-13.
- Yusoff NIM., Shaw MT., Airey GD. Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders. Construction and Building Materials 2011; 25(5): 2171-2189.