

# NORMAL VE MODİFİYE BİTÜMLERİN KALICI DEFORMASYONLARA KARŞI DİRENCİNİN SIFIR KESME VİSKOZİTESİ İLE BELİRLENMESİ

A. Gürkan GÜNGÖR<sup>1</sup> Ahmet SAĞLIK<sup>2</sup>

## ÖZET

Karayolu üstyapılarında görülen en önemli yapısal bozulardan birisi olan tekerlek izinde oturmalar, büyük oranda bitümlü bağlayıcının özellikleri tarafından belirlenen kaplama tabakalarının viskoelastik davranışına bağlı olarak gelişmektedir. Bitümlü bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı reolojik dayanım özelliği ise yeni Superpave performans şartnamesinde  $G^*/\sin\delta$  (elastik modül) değeri ile belirlenmektedir. Bununla birlikte; bu değer yerine, özellikle modifiye bitümlerin gecikmeli-elastik davranışını daha iyi temsil ettiği ve tekerlek izinde oturmalarla daha iyi korelasyon verdiği yönünde bulgulara ulaşılan Sıfır Kesme Viskozitesi (ZSV) değeri son zamanlarda alternatif bir parametre olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada; Kırıkkale ve Batman rafinerilerine ait farklı penetrasyon sınıfındaki bitümler ile bunlara SBS ve Elvaloy tipinde polimerler ilave edilerek hazırlanan modifiye bitümler için hem  $G^*/\sin\delta$  ve ZSV değeri, hem de bu bitümler kullanılarak hazırlanan bitümlü karışım numuneleri üzerinde çevrimsel basınç deneyi ile kalıcı deformasyonlar belirlenerek bu iki parametrenin bitümlerin kalıcı deformasyon davranışlarının belirlenmesinde kullanımı için karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır.

## 1. GİRİŞ:

Bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakalarının tekerlek izine karşı dayanımı büyük ölçüde bünyesinde bulunan bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerine bağlıdır. Bu anlamda, bitümün reolojik özelliklerinin iyi bilinmesi ve bu özelliklerin belirlenmesine yönelik doğru deney metodunun seçilmesi çok önemlidir.

Superpave bitüm performans sınıflamasında bitümün kalıcı deformasyon performans kriteri olarak Dinamik Kesme Reometresi (DSR) deneyi ile 10 rad/s (1,6 Hz) frekanslı yükleme şartları altında belirlenen  $G^*/\sin\delta$  ( $G^*$ :kompleks modülü,  $\delta$  :faz açısı) değeri kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda esas olarak, diğer şartlar sabit olmak koşuluyla, tekerlek izinde oturma bitümlü bağlayıcının rijitliği tarafından kontrol edildiği, kalıcı deformasyonu azaltan elastikliğin ise faz açısına ( $\delta$ ) bağlı olduğu kabul edilmiştir. Yani; yüksek sıcaklıklarda elastik davranış gösteren bir bitüm, elastik

---

1. İnş. Yük. Müh., KGM, TADB, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara

2. İnş. Yük. Müh., KGM, TADB, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara

olmayan aynı rijitlikteki başka bir bitümden daha az kalıcı deformasyon gösterecektir. Ancak gerçekte, faz açısının  $60^\circ$  'den büyük değerlerinde  $G^*/\sin\delta$  oranı  $\sin\delta$  değerine karşı çok hassas değildir. Çoğu modifiye bitümün faz açısı nadiren  $70^\circ$  'den ( $\sin\delta$  değeri 0,94) küçük çıkmakta olup,  $\sin\delta$  değeri modifikasyonun esas hedef olan elastiklik üzerindeki etkisini çok az derecede yansıtmaktadır. Bunun nedeni, kısa süreli yükleme şartlarında (1,6 Hz) yapılan DSR osilasyon deneyinin özellikle modifiye bitümlerde yüksek değerler alan 'gecikmeli elastik deformasyon (delayed elastic strain)' davranışı tam olarak temsil etmemesi olarak gösterilmektedir (1). Nitekim, yapılan çalışmalarda bitümlü karışımların arazide ve laboratuarda elde edilen kalıcı deformasyon değerleri ile bitümün  $G^*/\sin\delta$  değeri arasındaki korelasyonun zayıf olduğu tespit edilmiş, bu nedenle daha iyi korelasyon verecek başka reolojik özelliklerin araştırılmasına yönelinmiştir. Bu anlamda son zamanlarda, sabit bir yükün belli bir süre uygulanması şeklinde yapılan sünme (creep) deneyi ile tespit edilen bitümlü bağlayıcıların sıfır kesme viskozitesi (zero shear viscosity, ZSV) alternatif bir değerlendirme yöntemi olarak kullanılmaya başlanmış, bazı çalışmalarda ZSV değerinin özellikle modifiye bitümlerin kalıcı deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Diğer taraftan, bitümlü sıcak karışım malzemelerinin kalıcı deformasyonlara karşı dayanımları geleneksel olarak teker izi deneyleri (wheel tracking test) ile belirlenmektedir. Ancak son zamanlarda geliştirilen performans deneyleri ile yağurmalı kompaktörde sıkıştırılarak elde edilen silindirik karışım numunelerinin üç eksenli çevrimsel (cyclic) basınç deneyi ile sünme ve deformasyon davranışları test edilebilmektedir.

Bu çalışmada Kırıkkale rafinerilerine ait B50/70, B70/100, B160/220 ve Batman rafinerisine ait B50/70 sınıfı bitümler ve bunların SBS ve Elvaloy adlı iki farklı katkı malzemesi ile üretilen modifiye bitümlerinin  $G^*/\sin\delta$  ve sıfır kesme viskozitesi değerleri belirlenmiş, yağurmalı sıkıştırıcı ile her bir bitüm için karışım numuneleri hazırlanarak çevrimsel basınç deneyi ile kalıcı deformasyonları tespit edilmiştir.

## **2. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN REOLOJİSİ VE SIFIR KESME VİSKOZİTESİ**

Reoloji cisimlerin gerilme altında zaman ve sıcaklığa bağlı akma ve deformasyon özelliklerini inceleyen bilim dalı olup, genel olarak katıların deformasyon ve sıvıların akış özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılır. Bitümlü bağlayıcıların davranışı ise hem yükleme, hem de sıcaklık koşullarına bağlıdır. Bitümler, sıcak iklim koşullarında ve sürekli yükleme durumunda viskoz bir sıvı gibi davranırken, soğuk iklim veya hızlı yükleme koşullarında elastik bir katı gibi davranış göstermektedir.

Reolojik olarak, elastik malzemeler dış yük etkisinde ani bir deformasyon gösterirken, yük sabit kaldığı sürece deformasyon da sabit kalır. Yükün kalkması durumunda, malzeme yine hızlı bir şekilde eski haline geri döner. Viskoz malzemelere yük uygulandığında ise şekil değişimi zamana bağlı ve gecikmeli olarak meydana gelir. Yük kalktığında ise deformasyonlar geri gelmez ve plastik deformasyon olarak kalır. Bitümlü bağlayıcılar çoğu durumda bu iki özeliği bir arada yansıtan viskoelastik davranış gösterirler. Viskoelastik malzemeler ise sabit yükleme altında önce elastik ani deformasyon daha sonra zamana bağlı gecikmeli elastik deformasyon (delayed elastic strain) ve viskoz deformasyon gösterir. Yük kalktığında ise benzer şekilde önce elastik

ani geri dönme, daha sonra zamana bağlı gecikmeli elastik geri dönme (delayed elastic recovery) meydana gelir. Viskoz deformasyonlar geri dönmez ve kalıcı deformasyon olarak kalır.

Superpave bağlayıcı sınıflama sisteminde bitümlerin viskoelastik davranışının bir ölçütü olarak, uygulanan osilasyonlu gerilme ile deformasyon arasındaki gecikme miktarı, yani faz açısı ( $\delta$ ) kullanılmaktadır. Faz açısı ne kadar küçükse, yani gecikme ne kadar azsa o kadar elastik; faz açısı, yani gecikme ne kadar fazla ise o kadar viskoz olduğu kabul edilmektedir. Diğer taraftan, yükleme altında cisimlerde meydana gelen şekil değişiminin miktarı; cismin maruz kaldığı gerilmenin şiddetine, uygulama hız ve doğrultusuna, cismin yapıldığı malzemenin viskozitesine göre değişir. Elastik katılarda cisimlerin deformasyonlara karşı iç direncinin ölçüsü olarak elastisite modülü (E) kullanılırken, viskoz akışkanların akmaya karşı gösterdikleri iç direncin ölçüsü olarak viskozite değeri kullanılmaktadır. Cisimlerin akmaya karşı direnci olarak tanımlanan viskozite ( $\eta$ ), kesme gerilmesinin deformasyon hızına oranı ( $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ ) olarak ifade edilir ve akış tabakalarını birbirine göre  $\dot{\gamma}$  ( $d\gamma/dt$ ) kayma hızında hareket ettirebilmek için gerekli kuvveti temsil eder.

Bazı akışkanlarda kesme gerilmesi ile kesme hızı doğrusal orantılı olup, viskozite sabittir ve kesme hızının değişmesi ile viskozite değişmemektedir. Bu tip sıvılar Newtonian (ideal akışkan) sıvılar olarak bilinmektedir. Newton akışkanlarda direnç kuvveti ile bağlı hız arasında lineer bir ilişki vardır. Newtonian olmayan akışkanlarda ise viskozite değeri kesme hızına bağlı olarak değişmekte, yani hızlı yükleme ve yavaş yükleme şartları için farklı viskozite elde edilmektedir. Newtonian olmayan akışkanlar, yalancı plastik (kesme gerilmesiyle incelen) ve dilatant (kesme gerilmesiyle koyulaşan) sıvılar olarak ikiye ayrılırlar. Akışkan; görünür viskozitesi makaslama hızının yükselmesiyle düşüyorsa yalancı (pseudo) plastik, görünür viskozitesi (anlık viskozite) artan makaslama hızıyla artıyorsa dilatant adını alır. Orta sıcaklıklarda asfalt, viskozitesi düşerken bağlı hızı arttığı için “incelen sıvı”dır. Bazı modifiye asfaltlar incelen bazıları ise koyulaşan sıvılardır. Koyulaşan sıvılarda tabakalar arası bağlı hız arttıkça viskozite de artar.

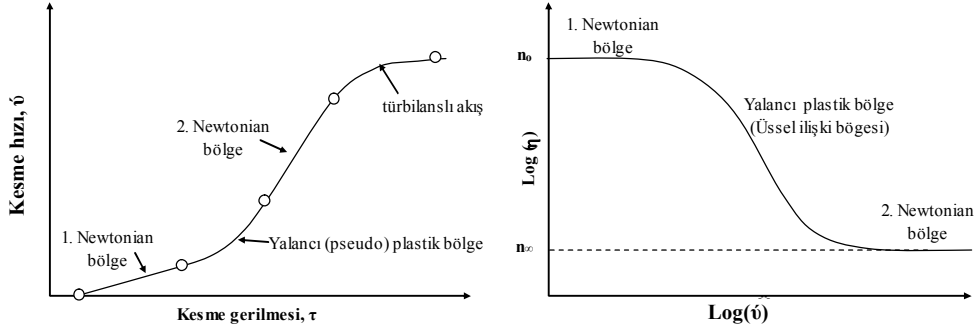
### ***Sıfır Kesme Viskozitesi (ZSV)***

Hem normal hem de modifiye bitümler çoğunlukla Newtonian olmayan akışkan özelliği göstermektedirler. Newtonian olmayan akışkanların viskozitesi ise o anda maruz kaldığı kesme hızına göre değişmektedir. Bununla birlikte, bütün akışkanlar çok küçük ve çok büyük kesme hızı değerlerinde sabit bir viskozite değerine ulaşırlar. Bu sınırlar sırası ile 1. Newtonian bölge ve 2. Newtonian bölge olarak adlandırılır. Malzemelerin kesme hızına bağlı pseudoplastik viskozite değerinin değişimi aşağıdaki bağıntı belirlenmektedir.

$$\eta_a = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{c-1}{2}} \quad (1)$$

Burada;  $\eta_a$ =anlık (görünür) viskozite;  $\eta_0$ =sıfır kesme viskozitesi;  $\eta_\infty$ =sonsuz kesme viskozitesi,  $\dot{\gamma}$ =kesme hızı;  $\lambda$ ,  $c$ =sabittir. Bu formülde de görüldüğü gibi  $\lambda \dot{\gamma} \rightarrow 0$  ‘a yakınsadığında  $\eta_a \rightarrow \eta_0$  olacaktır. Kritik  $\lambda \dot{\gamma} > 1$  değerinden sonra viskozite azalmaya başlayacak ve yalancı plastik (kesme ile koyulaşan) bölgeye geçecektir. Kesme hızının

aşırı fazla olduğu,  $D \gg 1$  değerlerde viskozitenin sabit olduğu 2. Newtonian bölgeye ulaşılacaktır. İşte viskozite değerinin en yüksek değeri aldığı 1. Newtonian bölgedeki asimtotik viskozite değeri,  $\eta_0$ , sıfır kesme viskozitesi (zero shear viscosity, ZSV) olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 1: Bitümlü bağlayıcıların viskozitesinin kesme hızına göre değişimi (3)

Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik davranışı nedeniyle, ZSV ancak, viskoz akış bileşeni gecikmeli elastik deformasyon bileşeninden ayırdıktan sonra bulunabilir. Sıfır kesme viskozitesi sünme deneyinde, sünme eğrisinin ve sünme sonrası geri dönme eğrisinin yaklaşık doğrusal hale ulaştığı noktadaki eğiminden veya çok küçük frekanslardaki viskozite değerinden kestirimele bulunabilmektedir.

### 3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, farklı türden bitümlere ait hem  $G^*/\sin\delta$  değeri ve sıfır kesme viskozitesi (ZSV) değeri hem de bu bitümlerle hazırlanana bitümlü karışım numunelerinin kalıcı deformasyonları tespit edilerek tekerlek izi oluşumunu tespitinde bu iki parametreden (DSR ve ZSV) hangisinin daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla Kırıkkale rafinerisine ait B50/70, B70/100, B160/220 ve Batman rafinerisine ait B50/70 sınıfı bitümler ile bu bitümlerin SBS ve Elvaloy katkılı olarak hazırlanan modifiye bitümleri olmak üzere toplam 12 adet bitüm kullanılmış olup; SBS katkı oranı %5, Elvaloy katkı oranı ise %2 olarak kullanılmıştır. Bu bitümlerin Superpave bağlayıcı sınıflama sistemine göre performans sınıfları (PG) önceden belirlenmiş olup, bu bildiriye dahil edilmemiştir. Bu çalışmada ise, bu bitümlerin farklı sıcaklıklarda  $G^*/\sin\delta$  ve ZSV değerleri ile bu bitümlerle hazırlanan standart bir asfalt betonu aşınma tabakası üzerinde çevrimsel basınç deneyi ile kalıcı deformasyonlar belirlenmiştir. Yapılan çalışmaların detayları aşağıda verilmiştir.

#### 3.1. Dinamik Kesme Reometresi ile $G^*/\sin\delta$ değerinin bulunması

Bitümlerin  $G^*/\sin\delta$  değerleri Dinamik Kesme Reometresi (DSR) aleti ile osilasyon modunda tekrarlı kayma gerilmesi uygulanarak AASHTO T315 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Deneyde 25 mm'lik yükleme plakası kullanılmış ve DSR yükleme plakaları arasında 1 mm boşluk bırakılmıştır. Deney; döner ince film halinde ısıtma

(RTFO) deneyi ile yaşlandırılmış bitümlere 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C ve 60 °C olmak üzere 6 sıcaklıkta yapılmıştır. Her bir deney öncesinde, deney sıcaklığına gelen numunenin 10 dakika süre ile istenilen sıcaklıkta kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Sağa ve sola 10 radyan/saniye (1,6 Hz) frekans ile tekrarlı kesme gerilmesi uygulanmış, kesme gerilmesinin kesme deformasyonuna oranı alınarak kompleks modülü ( $G^*=\tau/\gamma$ ) ve kesme gerilmesi ile kesme deformasyonu arasındaki gecikme olan faz açısı ( $\delta$ ) belirlendikten sonra  $G^*/\sin\delta$  değerleri tespit edilmiştir.

### 3.2 Bitümlerin sıfır kesme viskozitelerinin bulunması

Yukarıda söz edilen her bir bitüm numunesi öncelikle döner ince film halinde ısıtma deneyi ile 163 °C'de 5 saat süre ile kısa dönemli olarak yaşlandırılmıştır. Bu numunelere dinamik kesme reometresi aleti ile belli bir süre ile sabit yük uygulanarak 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C ve 60 °C sıcaklıklarda sünme (creep) deneyi yapılmış ve prCEN/TS 15325 Avrupa standardına göre ZSV değerleri bulunmuştur. Deneyde, dinamik kesme reometresinin yükleme plakası altına yerleştirilen numune deney sıcaklığında kararlı hale geldikten sonra numuneye uygulanan sabit yük belli bir süre sonra kaldırılmış ve belli bir süre de deformasyonların geri dönmesi beklenmiştir.

ZSV deneyinde uygulanacak sabit yükün seçimi oldukça önemlidir. Deney esnasında numunenin viskoelastik sınırlar içerisinde kalmasını sağlayacak düşük gerilme seviyeleri kullanılmalıdır. Zira, gerilme kesme hızına bağlı olduğundan ( $\dot{\gamma}=\tau/\eta$ ), kesme hızının aşırı düşük alınması durumunda deney aleti sınır değerleri zorlanabildiği gibi birbirinden sapan viskozite değerleri elde edilebilir. Kesme hızının aşırı yüksek alınması halinde ise ZSV koşullarına ulaşılamaması ve numunenin bütünlüğünün bozulması söz konusu olabilir. Farklı gerilme seviyelerinde yapılan deneylerden (stress sweep) elde edilen sonuçlarına göre, ZSV deneylerinde kullanılan gerilmeler modifiye olmamış bitümler için 10 Pa, modifiye bitümler için ise 30 Pa alınmıştır. Diğer taraftan, ZSV değerinin bulunabilmesi için gecikmeli elastik deformasyonların tamamlanması ve kesme hızının sifıra yaklaştığı değerlerin elde edilmesi gerektiğinden, deney süresinin bu koşulun sağlandığı kararlı hale (steady state) gelinceye kadar devam ettirilmesi geçerli bir sonucun elde edilebilmesi için zorunluluk arz etmektedir.

	Normal bitümler	Modifiye bitümler
DSR plaka çapı/plakalar arası boşluk	25 mm/1000 µm	25 mm/1000 µm
Sıcaklık dengeleme süresi	10 dakika	10 dakika
Kesme gerilmesi	10 Pa	30 Pa
Sünme (creep) süresi	30 dakika	30 dakika
Geri dönme süresi	3.5 saat	3.5 saat

Sünme olayına maruz bırakılan malzemelerde belirli bir gerilme altında zaman içerisinde meydana gelen deformasyonun değişimi 'sünme uyumluluğu (creep compliance)' ile ifade edilmektedir. Sünme uyumluluğu 'J' harfi ile gösterilmekte olup, kesme modülünün ( $G=\tau / \gamma$ ) çarpma işlemine göre tersidir ( $J=G^{-1}= \gamma/\tau$ ).

Deney sırasında bilgisayarda otomatik olarak zaman-sünme ve zaman-sünme uyumluluğu grafikleri takip edilebilmektedir. Kararlı hal durumuna ulaştığında zaman-sünme uyumluluğu eğrisi doğruya yakın bir hal alır. Yük kaldırılmadan son 15 dakika

(900 s) içerisindeki zaman-sünme uyumluluğu eğrisinin ortalama eğimi  $\Delta t/\Delta J$  kararlı haldeki viskozite değeri, yani sıfır kesme viskozitesi olarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$\eta_i = \Delta t / \Delta J = 900 / (J_{\text{son}} - J_{\text{son-15 dakika}}) \quad (2)$$

Burada,  $J_{\text{son-15 dakika}}$  değeri, sondan 15 dakika önceki sünme uyumluluğu değerini göstermektedir. Sıfır kesme viskozitesi değeri, geri dönme eğrisi sonunda elde edilen kararlı hal durumundaki eğriden de benzer şekilde hesaplanabilmektedir. Ancak, bu çalışmada sadece sünme durumundaki ZSV değeri bulunmuştur.

### 3.3. Üç eksenli çevrimsel basınç deneyi ile kalıcı deformasyonların bulunması

Bu deneyde, önceden karışım dizaynı yapılarak karışım özellikleri belirlenen asfalt betonu aşınma tabakasına ait standart bir dizayn kullanılmıştır. Karışıma giren malzemeler aşağıdaki tabloda verilmiş olup, bu malzemeler 10 cm çapındaki kalıplarda Superpave yoğunmalı kompaktörde istenen yoğunluk değerine gelene kadar 12 cm yüksekliğinde sıkıştırılmış, her bitüm için 4 adet silindirik numune hazırlanmıştır. Bu numuneler alt ve üstünden 1'er cm kesilip, eksenel basıncın uygulanacağı yüzeyler düzeltilerek toplam 10 cm yüksekliğinde ve 10 cm çapında silindirik deney numuneleri hazırlanmıştır.

Karışım Özellikleri		Agrega özellikleri	
Agrega cinsi	Bazalt	<b>Fiziksel özellikler</b>	<b>Değer</b>
Pratik yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	2.473	Los Angeles aşınma kaybı, %	11.7
Optimum bitüm, %	5.25	Sağlamlık (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) kaybı, %	2
<b>Hedef gradasyon</b>		Soyulma mukavemeti, %	30-35
<b>Elekler</b>	<b>% Geçen</b>	Cilalanma değeri	0.53
3/4"	100	Yassılık indeksi, %	24.5
1/2"	90	Kaba agrega hacim özgül.ağ	2.799
3/8"	80	Kaba agrega zahiri özgül.ağ	2.894
No.4	47	Kaba agrega absorpsiyonu, %	1.2
No.10	33	İnce agrega hacim özgül.ağ	2.69
No.40	15	İnce agrega zahiri özgül.ağ	2.737
No.80	9	İnce agrega absorpsiyonu, %	0.6
No.200	7	Filler zahiri özgül.ağ	2.743

Çevrimsel basınç deneyi UTM-100 (Universal Testing Machine, 100 ton kapasiteli) deney aleti ile EN 12697-25 standardına göre yapılmıştır. Silindirik numunelerin yüzeyi membranla kaplanıp, alt ve üst yükleme başlıkları yerleştirildikten sonra numunelere 100 kPa çevresel pnömatolitik yük ve 2,5 Hz frekanslı 300 kPa eksenel çevrimsel yük (cyclic load) tatbik edilmiştir. Her bir bitümden 4 adet üretilen silindirik karışım numunelerinden 2 tanesi 40 °C, 2 tanesi de ve 50 °C olmak üzere iki sıcaklık değerinde deney yapılmış ve her bir numuneye en az 15000 yükleme uygulanmıştır. Her bir darbe sonucunda üç eksenli hücre üzerindeki iki adet LVDT deformasyon ölçerden bilgisayar vasıtasıyla deformasyonlar alınarak kaydedilmiştir.

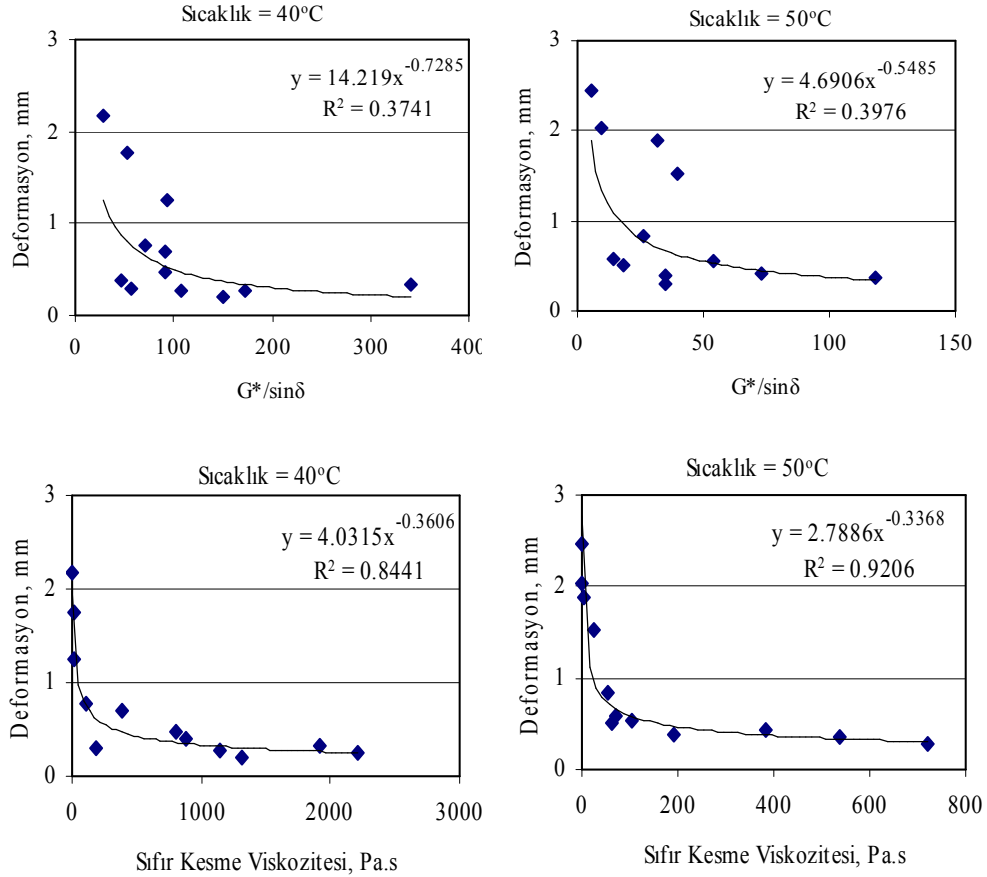
Tablo 1: Deney sonuçlarını gösterir özet tablo

DENEYLER		Kırıkkale 50/70	Kırıkkale 70/100	Kırıkkale 160/220	Batman 50/70	Kırıkkale 50/70 SBS Modifiye	Kırıkkale 70/100 SBS Modifiye	Kırıkkale 160/220 SBS Modifiye	Kırıkkale 50/70 Elvaloy Modifiye	Kırıkkale 70/100 Elvaloy Modifiye	Kırıkkale 160/220 Elvaloy Modifiye	Batman 50/70 SBS Modifiye	Batman 50/70 Elvaloy Modifiye	
PG Sınıfı		64-22	58-22	52-28	64-22/28	76-16	64-16	64-16	70-22	70-22	64-22	88-16	88-16	
DSR Deneyi	G*/sinδ (kPa)	35 °C	130.3	95.0	69.6	139.1	419.5	240.3	174.5	299.0	121.0	93.0	682.9	208.9
		40 °C	92.8	52.8	28.3	71.2	173.3	91.8	92.2	150.9	57.6	46.3	341.6	107.7
		45 °C	45.8	38.3	12.2	86.0	87.5	79.1	47.0	77.8	36.6	24.7	197.2	62.7
		50 °C	32.0	9.3	5.2	39.4	72.6	53.8	26.3	34.9	18.6	14.2	118.6	35.0
		55 °C	14.5	4.9	2.7	16.9	41.4	26.4	14.0	20.0	10.4	8.9	56.8	20.6
		60 °C	4.9	2.6	1.4	5.2	26.9	13.8	7.5	12.2	6.1	5.7	34.2	13.1
Sıfır Kesme Viskozitesi (ZSV)	35 °C	175.2	63.33	19.06	328.4	1906	1435	1024	2845	515.1	1450	4739	4210	
	40 °C	16.13	19.74	7.304	103.7	1137	805	393	1311	193.1	883.7	1915	2219	
	45 °C	9.773	6.36	2.767	54.47	550	210.3	156.9	577.7	101.8	127.4	850	1220	
	50 °C	5.388	1.828	1.007	24.74	384.8	104.3	56.08	191.8	62.32	71.49	536.6	721	
	55 °C	2.041	0.7633	0.4309	10.97	131.1	79.01	35.25	76.39	23.45	16.02	352.1	285.9	
	60 °C	1.038	0.5234	0.1782	4.4	74.33	37.77	12.38	27.25	12.38	7.156	171.2	66.26	
Çevrimsel basınç deneyi	Minimum deformasyon hızı	40 °C	0.0795	0.1940	0.0750	0.2410	0.0060	0.0380	0.1750	0.0030	0.0110	0.0175	0.0065	0.0175
		50 °C	0.1130	0.2560	0.1690	0.1500	0.1315	0.1065	0.3485	0.0035	0.0470	0.0220	0.0470	0.0160
	Min. def.hızındaki yükleme sayısı	40 °C	24144	37312	28192	14960	15232	16608	19728	24576	30736	21856	28608	27216
		50 °C	21632	20064	28336	27552	12160	16896	19664	28512	31088	28976	28752	28480
	Min. def.hızındaki deform., mm	40 °C	1.247	3.636	2.862	0.814	0.279	0.480	0.804	0.207	0.310	0.399	0.335	0.276
		50 °C	2.146	2.529	3.590	1.897	0.381	0.518	1.111	0.386	0.555	0.617	0.395	0.308
10000 yükleme sonundaki deform., mm	40 °C	1.254	1.760	2.175	0.766	0.279	0.463	0.697	0.207	0.295	0.391	0.332	0.263	
	50 °C	1.893	2.037	2.454	1.524	0.422	0.546	0.840	0.386	0.503	0.580	0.362	0.292	

#### 4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

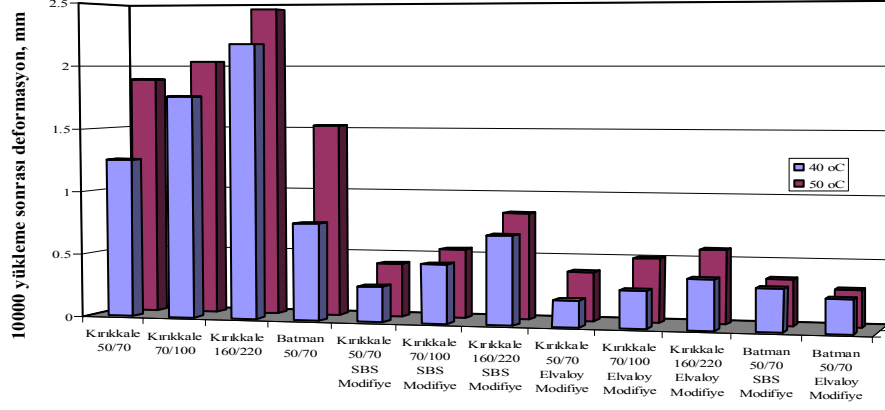
Yapılan deneylere ait sonuçlar Tablo 1’de özet olarak verilmiştir. Deney sonuçlarına göre çizilen  $G^*/\sin\delta$ -deformasyon ve ZSV-deformasyon grafiklerinde görüldüğü gibi her iki sıcaklıkta da ZSV değerinin meydana gelen kalıcı deformasyonlar ile daha yüksek derecede bir korelasyon oluşturduğu görülmektedir. En iyi korelasyon üssel olarak elde edilmekte olup, bu da Şekil 1’de verilen yalancı plastik davranış modeline uygunluk göstermektedir. Bu anlamda sıfır kesme viskozitesi değerinin bitümün viskoelastik davranışını daha iyi ifade ettiği söylenebilir.

Aynı zamanda Şekil 3 ‘de de görüldüğü gibi SBS katkılı modifiye karışımlarda oluşan kalıcı deformasyonlar genel olarak Elvaloy katkılı karışımlardan daha fazla çıkmıştır. Bu durum, ZSV değerlerinde de büyük ölçüde uyumluluk gösterse de,  $G^*/\sin\delta$  deneyi bakımından karşılaştırıldığında aksi yönde SBS katkılı modifiye bitümlerin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 4 ve 5).

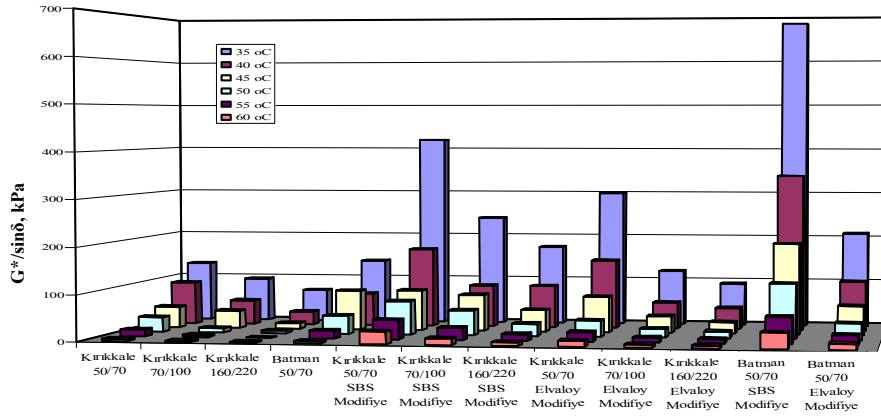


Şekil 2: 40°C ve 50°C sıcaklıklarda ZSV-deformasyon ve  $G^*/\sin\delta$ -deformasyon grafikleri

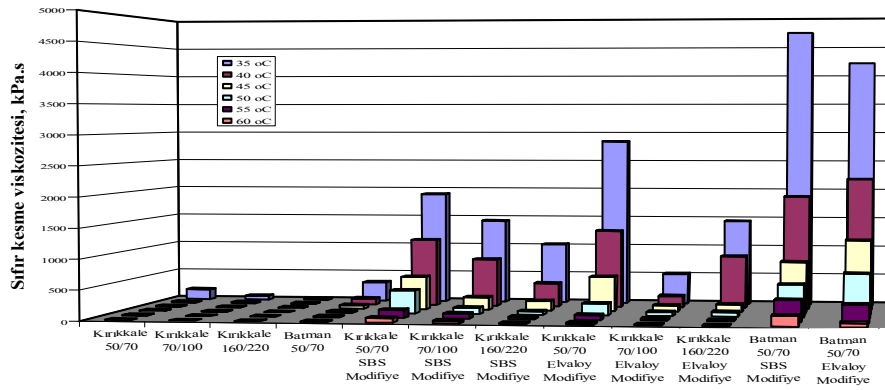




Şekil 3: Bitümü karışımlara ait kalıcı deformasyon sonuçları grafik gösterimi



Şekil 4: Bitümlere ait G\*/sinδ sonuçları grafik gösterimi



Şekil 5: Bitümlere ait sıfır kesme viskozitesi sonuçları grafik gösterimi

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Kırıkkale rafinerilerine ait B50/70, B70/100, B160/220 ve Batman rafinerisine ait B50/70 sınıfı bitümler ve bunların SBS ve Elvaloy adlı iki farklı katkı malzemesi ile üretilen modifiye bitümlerinin farklı sıcaklıklarda  $G^*/\sin\delta$  ve sıfır kesme viskozitesi (ZSV) değerleri belirlenmiş; her bir bitüm için karışım numuneleri hazırlanarak çevrimsel basınç deneyi ile kalıcı deformasyonları tespit edilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre; ZSV ile kalıcı deformasyonlar arasındaki korelasyonun ( $40^\circ\text{C}$ 'de  $R^2=0.84$ ;  $50^\circ\text{C}$ 'de  $R^2=0.92$ );  $G^*/\sin\delta$  ile kalıcı deformasyonlar arasındaki korelasyondan ( $40^\circ\text{C}$ 'de  $R^2=0.37$ ;  $50^\circ\text{C}$ 'de  $R^2=0.40$ ) çok daha yüksek olduğu, özellikle modifiye bitümlerin karşı deformasyon davranışını daha iyi yansıttığı tespit edilmiştir. Bununla beraber; özellikle modifiye bitümler üzerinde yapılan ZSV deneylerinde, sünme eğrisinin doğrusal hale geldiği kararlı hal (steady state) durumuna ulaşmanın 8-10 saat gibi çok uzun zaman alabildiği, böyle bir süre beklense bile kararlı hal durumunun her zaman garanti edilemediği, malzemenin kararlı hale gelmeden yenilebildiği tespit edilmiştir. Bu bakımdan ZSV değeri kalıcı deformasyonlarla daha iyi korelasyon vermesine rağmen deneyin kendi içerisinde tekrarlanabilirlik problemi mevcut olup, oldukça fazla sayıda sapan değer elde edilebilmektedir. Sonuç olarak, ZSV değerinin bitümlü bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı direncinin belirlenmesinde kullanılabileceği; ancak, bu değer tespiti için sünme deneyi yerine, deney sonuçlarının daha güvenilir bir şekilde elde edildiği çok küçük frekans değerlerindeki viskozite gibi farklı deney metotları üzerinde çalışılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Bınard, C., Anderson, D., Lapalu, L., Planche, J.P., (2004) Zero Shear Viscosity Of Modified And Unmodified Binders, 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna Paper 236
2. Tia, M., Ruth, B.E., (1987) Asphalt Rheology :Relation to mixtures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 118-145
3. Zhang, X., Zou, G., Xu, J., (2009) Measurement of Zero-Shear Viscosity in Asphalt, International Journal of Pavement Research and Technology, 2(1):33-36