



Superpave Sisteminde Bölge Meteorolojik Hava Verileri Kullanılarak Performans Dereceli (PG) bağlayıcı sınıfı seçimi

Tacettin GEÇKİL^{1*}, Taner ALATAŞ², Perviz AHMEDZADE³

¹İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, TÜRKİYE

³Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

ÖZET

Bu çalışmada, uygulama bölgesi olarak seçilen Elazığ için, Meteoroloji İl Müdürlüğü hava sıcaklık veri tabanı kullanılarak Superpave sistemine göre bölgeye uygun Performans Dereceli (PG) bağlayıcı sınıfı seçilmiş ve seçilen bağlayıcının performans seviyesi ölçülerek uygunluğu araştırılmıştır. Bu amaçla, bölgenin son 20 yıldaki en yüksek ve en düşük hava sıcaklıkları, coğrafi konumu ve trafik şartları dikkate alınarak bağlayıcı sınıfı belirlenmiştir. TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 70/100 ve B 160/220 penetrasyon dereceli iki bitümlü bağlayıcı Dönel İnce Film Etüvü Deney (RTFOT) yöntemiyle yaşlandırılmış ve ayrıca Dönel Viskozimetre (RV) deneyine tabi tutularak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Yaşlandırma işleminden önce ve sonra Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyi ile bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyeleri belirlenmiştir. Yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar Kiriş Eğme Reometresi (BBR) deneyine tabi tutulmuş ve kaplamanın inşaatından hemen sonraki düşük sıcaklık performans seviyeleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre B 70/100 bağlayıcısının Elazığ bölge iklim şartlarında, tekerlek izi ve düşük sıcaklık çatlakları dayanımı bakımından uygun performans özellikleri gösterdiği ancak B 160/220 bağlayıcısının performans özelliklerinin yetersiz olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

Superpave, performans dereceli bağlayıcı, yaşlanma, tekerlek izi, düşük sıcaklık çatlakları.

Selection of Performance Graded (PG) Binder Class In Superpave System Using Region Meteorological Weather Data

ABSTRACT

In this study, appropriate performance graded (PG) binder class for region according to Superpave system was selected by using Meteorology Nation Directorate weather temperature database Elazığ application region and the suitability of selected binder was investigated by measuring performance level. At this aim, the binder class was determined by considering the highest and low temperatures for recent 20 years, geographical location and traffic conditions of region. Penetration graded which are B 70/100 and B 160/220 bituminous binders obtained from TÜPRAŞ refinery was aged with Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) method and furthermore their mix and pressing temperatures were fixed by applying Rotational Viscometer (RV) experiment. The low temperature performance levels of binders were determined by applying Dynamic Shear Rheometer (DSR) experiment before and after aging processes. The aged bituminous binders were fixed applying Bending Beam Rheometer (BBR) experiment and the low temperature performance levels pavement just builded were determined. It was determined with respect to obtained results the 70/100 binder has suitable performance properties for Elazığ region climate conditions, resistance to running and low temperature cracking and on contrary, performance properties of B 160/220 binder was determined as unqualified.

Keywords

Superpave, performance graded binder, aging, rutting, low temperature cracking.

* Sorumlu yazar (Corresponding author) e-posta: tageckil@inonu.edu.tr

1. Giriş

Bitümlü sıcak karışımların ağırlıkça %5-7'sini, hacimce %13-15'ini oluşturan bitümlü bağlayıcılar, karışımların performansı üzerinde en önemli rolü olan malzemelerdir [1]. Birçok ülkede karışımlarda kullanılacak bağlayıcıların uygunluğu penetrasyon, viskozite ve düktilite gibi çoğu ampirik olan fiziksel özellik deneyleri çerçevesinde geliştirilmiştir. Bu deneyler standart deney sıcaklıklarında yapılarak bağlayıcı kıvamı belirlenir ve deney sonuçları bağlayıcının şartname kriterlerine uygun olup olmadığının tespitinde kullanılır [2]. Türkiye'de KGM tarafından kıvamı yüksek olan bitümlerin sıcak iklimli bölgelerde, kıvamı düşük bitümlerin ise soğuk iklimli bölgelerde kullanılması tavsiye edilmektedir [3]. Geleneksel şartnameler, bağlayıcının kıvamını 25°C sabit sıcaklıkta yapılan Penetrasyon deneyi ile belirler ve bağlayıcının orta sıcaklık davranışı ile ilgili fikir verir. Ancak, standart sıcaklıklarda aynı penetrasyona sahip birçok bitümlü bağlayıcı kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki farklı sıcak ve soğuk iklim koşullarında farklı davranışlar gösterebilir. Aynı penetrasyona sahip oldukları için farklı bağlayıcılar aynıymış gibi sınıflandırılabilirler ve bu bağlayıcıların her şartta aynı performansı göstereceği hatasına düşülebilmektedir [2,4,5,6,7]. Karayollarında, öngörülen hizmet seviyesinden önce meydana gelen bozulmalar, farklı hava ve iklim şartları altında kaplamanın gerçek performansını koruyamaması, laboratuvar şartlarının arazi şartlarını tam olarak yansıtamaması, ülkeleri yeni tasarım yöntemleri geliştirmeye sevk etmiştir. Bu amaçla Amerika'da 1987 yılında SHRP çerçevesinde "Superpave" olarak isimlendirilen Üstün Performanslı Asfalt Kaplama yöntemi geliştirilmiştir. Bünyesinde asfalt bağlayıcı şartnamesi, karışım dizaynı ile analiz sistemi ve bilgisayar yazılım sistemi olmak üzere üç ana bileşeni bulunan Superpave yöntemi, Amerika'daki yolların performansı ve durabilitesini arttırmak ayrıca yolları

daha güvenli hale getirmek amacıyla, beş yıl süreli ve 150 milyon dolar bütçeli bir araştırma programı ile oluşturulmuştur. Bu araştırma fonunun 50 milyon doları, laboratuvar analizi ve arazi performansı ile ilgili performans esaslı bağlayıcı şartnamesi çalışmaları için kullanılmıştır. Diğer 100 milyon doları ile de bir deneme yolu yapılarak kaplamanın davranışı incelenmiştir. Araştırma sonucunda, bitümlü bağlayıcıların doğrudan arazi koşullarındaki performanslarıyla ilgili fiziksel özelliklerini ölçen Superpave bağlayıcı şartnamesi geliştirilmiştir [4,5,8,9]. Superpave performans esaslı bağlayıcı şartnamesi, kaplamada meydana gelen kalıcı deformasyon, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı bağlayıcı özelliklerini sınırlayarak, uygulama bölgesi çevre koşulları altındaki kaplamanın performansını en üst düzeye çıkarmak için tasarlanmıştır. Yöntemin en önemli özelliği, deneylerin standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki düşük ve yüksek sıcaklıklarda yapılarak bitümlü bağlayıcının saha performansıyla doğrudan ilgili fiziksel ve reolojik özelliklerinin analitik deneylerle tespit edilmesi ve genel olarak saha performansının daha iyi ve gerçekçi olarak yansıtılmasıdır [4,10,11].

Bu çalışmada, kaplamanın hizmet vereceği coğrafi bölgenin konumu ve uzun süreli meteorolojik hava sıcaklık verileri kullanılarak Superpave bağlayıcı şartnamesi çerçevesinde bağlayıcı sınıfı belirlenmiş ve seçilen bağlayıcının uygunluğu performans deneyleriyle değerlendirilmiştir.

2. Superpave Yöntemine Göre Bağlayıcı Dizaynı

Superpave bağlayıcı şartnamesi, sıcak karışımlarda oluşması muhtemel olan yorulma ile düşük sıcaklık çatlaklarına ve kalıcı deformasyonlara karşı bitümlü bağlayıcının özelliklerini Tablo 1'de ifade edilen deneyler yardımıyla sınırlayarak performansını arttırmayı amaçlamaktadır [2,12].

Tablo 1. Superpave Bağlayıcı Deneyleri ve Kullanım Amaçları [4,6,12,13]

Deney Adı	Kullanım Amacı	Performans Parametresi
Dönel İnce Film Fırını (RTFOT)	BSK üretimi ve yapımı süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Yapım süresince yaşlanma direnci
Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)	BSK hizmet ömrü süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Hizmet ömrü süresince yaşlanma direnci
Dinamik Kayma (Kesme) Reometresi (DSR)	Bağlayıcının yüksek ve orta sıcaklık özelliklerini belirlemek	Kalıcı deformasyon ve yorulma çatlakları direnci
Dönel Viskozimetre (RV)	Bağlayıcının yüksek sıcaklık özelliklerini belirlemek	Aktarma ve pompalama
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci
Doğrudan Çekme (DTT)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 27(1): 88-106 (2011)

Şartnamede, bağlayıcının yapım esnasında kısa süreli yaşlanmasını temsil eden RTFOT ve hizmet ömrünün ilk 5–10 yılı boyunca meydana gelen uzun süreli yaşlanmasını temsil eden PAV deneyleri gerekli görülmektedir [14,15]. Şartnamede bağlayıcılar, hizmet vereceği bölgenin sıcaklık koşullarında gösterdikleri performansa dayalı olarak sınıflandırıldıklarından bu tür bağlayıcılara “performans sınıfı” (Performance Grade) denilmiş ve PG simgesi ile tanımlanmıştır. Sistemde, bitümlü

bağlayıcının tanımlanması için yapılan deneylerde bütün bağlayıcılardan beklenen özellikler aynıdır ancak, bu özelliklerin beklendiği en düşük ve en yüksek sıcaklıklar farklılık gösterir [2,4,5,9]. Şekil 1’de bağlayıcı şartnamesinin bir bölümü görülmektedir. Burada PG 52–40 olarak tanımlanan performans dereceli bağlayıcının, en yüksek kaplama sıcaklığının 52°C ve en düşük kaplama sıcaklığının ise -40°C olacağı iklim şartlarına uygun olacağını göstermektedir [2,12].

PERFORMANS SINIFI	PG 46-			PG 52-						
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	< 46			< 52						
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	-22	> -28	> -34	> -40	> -46
ORJİNAL BAĞLAYICI										
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230									
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s (3000cP), Test Sıcaklığı, °C	135									
Dinamik Kayma, TP5, $G^*/\sin\delta$, minimum, 1,00 kPa, 10 rad/s’de Test sıcaklığı, °C	46			52						

Şartname gerekleri sabit kalır

Deney sıcaklıkları değişir

Şekil 1. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi Örneği [12]

2.1. Performans Dereceli (PG) Bağlayıcı Sınıfı Seçimi

Superpave yönteminde bağlayıcılar iki değişkenli olarak PG X-Y gibi bir terminoloji kullanılarak ifade edilmektedir. Burada birinci değişken (X),

bağlayıcının performans şartlarını sağladığı yüksek kaplama dizayn sıcaklığını, ikinci değişken (Y) ise bağlayıcının performans şartlarını sağladığı düşük kaplama dizayn sıcaklığını belirtmektedir [11,12,14]. Tablo 2’de kaplama dizayn sıcaklıkları ve bunlara karşılık gelen bağlayıcı sınıfı verilmiştir.

Tablo 2. Kaplama Dizayn Sıcaklıkları ve Bağlayıcı Sınıfı [5,12,14]

Yüksek Sıcaklık Sınıfları (X), °C	Düşük Sıcaklık Sınıfları (Y), °C	Gösterim
46	-34, -40, -46	PG 46-Y
52	-10, -16, -22, -28, -34, -40, -46	PG 52-Y
58	-16, -22, -28, -34, -40	PG 58-Y
64	-10, -16, -22, -28, -34, -44	PG 64-Y
70	-10, -16, -22, -28, -34, -44	PG 70-Y
76	-10, -16, -22, -28, -34	PG 76-Y
82	-10, -16, -22, -28, -34	PG 82-Y

Yöntemde, bağlayıcı sınıfı belirlenirken geniş bir meteorolojik veri tabanını kullanan ve istatistik kabullerle tahminde bulunabilen bir bilgisayar yazılım sistemi kullanılmaktadır. Sistemde coğrafi bölge, kaplama sıcaklığı ve hava sıcaklığı bilgileri esas alınmaktadır [2,4,5,12].

Meteorolojik veri tabanı: Meteorolojik veri tabanı oluşturmak üzere, son 20 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük ve en düşük bir günlük hava sıcaklık değerleri tespit edilir. Bu değerlerin ortalaması alınarak yüksek ve düşük hava sıcaklıkları ve bunların standart sapmaları hesaplanır. Bu sıcaklıklar, tasarım koşullarını en iyi temsil eden yöntem olarak

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 27(1): 88-106 (2011)

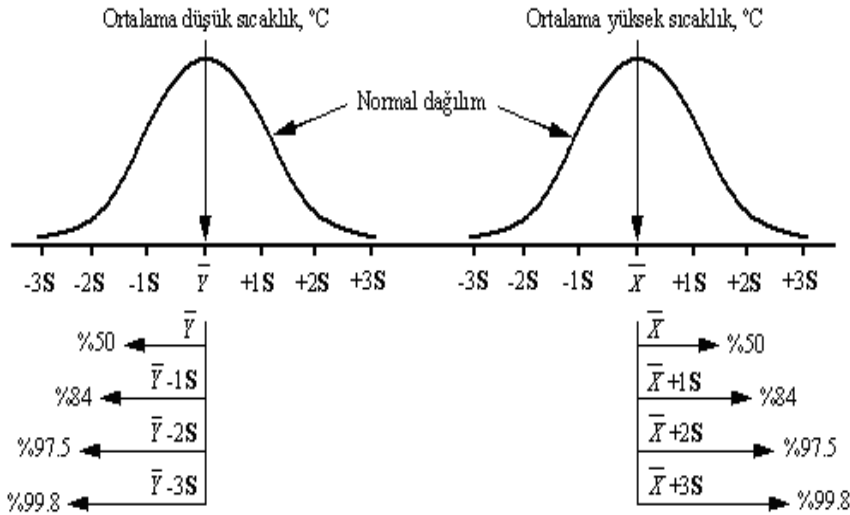
tanımlanmıştır. Hesaplamalarda 20 yıldan az veriye sahip istasyonlar dikkate alınmaz [4,5,7,11,12].

Güvenirlilik: Superpave yöntemi, bağlayıcı sınıfının tespit edilmesinde bir tasarım riski kabul edilmesine ve istatistikî güvenirlilik hesaplama yöntemlerinin kullanılmasına imkân tanımaktadır. Güvenirlilik, bir yıl içerisinde mevcut çevre sıcaklığının proje sıcaklığını geçmeme ihtimali olarak tanımlanmaktadır [5,12]. İstenilen güvenirlilik derecesinde bağlayıcı seçmek için yüksek ve düşük sıcaklık değerlerinin standart sapma değeri kullanılmaktadır [5,9,11,16]. Bir örneği meydana getiren n sayıdaki gözlemler x_1, x_2, \dots, x_n ve bunların aritmetik ortalaması $x_{ort} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n$ ise

standart sapma (S) değeri aşağıdaki bağıntı yardımı ile bulunur [17].

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ort})^2}{n-1}} \quad (1)$$

Düşük ve yüksek sıcaklık değerlerinin güvenirlilik derecelerinin, standart sapma ile değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Buna göre, ortalama yüksek sıcaklığa 1 standart sapma ilavesi ile %84; 2 standart sapma ilavesi ile %97,5 (98 alınmaktadır) ve 3 standart sapma ilavesi ile %99,8 güvenirlilik elde edilmektedir.



Şekil 2. Düşük ve Yüksek Hava Sıcaklığı Normal Dağılımı ve Güvenirlilik Kabulleri [11,16]

Hava sıcaklığı seçimi: Normal bir yaz mevsiminde yüksek sıcaklık ortalaması 36°C ve standart sapması 2°C olan bir bölgede, iki standart sapma ilavesiyle elde edilen 40°C 'lik sıcaklığa, çok sıcak geçen bir yaz mevsiminde ulaşılma ihtimali %2'dir ve bu durumda güvenirlilik %98 olarak kabul edilir. Benzer şekilde, düşük sıcaklık ortalaması -23°C ve standart sapması 4°C olduğunda, çok soğuk bir kış mevsiminde sıcaklığın -31°C olması ihtimali %2, dolayısıyla güvenirlilik %98 olacaktır [5,12].

Hava sıcaklıklarının kaplama sıcaklıklarına dönüştürülmesi:

$$T_{20\text{mm}} = (T_{\text{havmaks}} - 0,00618E^2 + 0,2289E + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 \quad (2)$$

Burada;

$T_{20\text{mm}}$: Yüzeyden 20 mm derinlikteki yüksek kaplama dizayn sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$),

T_{havmaks} : En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$),

E: Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemidir.

Superpave yazılımı, bağlayıcı sınıfının seçilmesinde tasarım sıcaklığı olarak kaplamanın kendi sıcaklığını ele almaktadır. Sistem, ortalama yüksek hava sıcaklığını esas alarak kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki yüksek dizayn sıcaklığını ve ortalama düşük sıcaklığı esas alarak kaplama yüzeyindeki düşük dizayn sıcaklığını hesaplamaktadır [4,5,7,18]. Yüksek kaplama dizayn sıcaklığı ($T_{20\text{mm}}$), SHRP tarafından geliştirilen aşağıdaki bağıntı yardımı ile bulunmaktadır [4,5,9,18].

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 27(1): 88-106 (2011)

Superpave yönteminde düşük kaplama dizayn sıcaklığı iki yöntemle tespit edilebilmektedir. SHRP tarafından kullanılan ve tavsiye edilen birinci yöntem, en düşük hava sıcaklığının düşük kaplama dizayn sıcaklığı olarak alınmasıdır. İkinci yöntemde ise Kanada SHRP tarafından geliştirilen aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmasıdır [4,5,18].

$$T_{\min} = 0,859T_{\text{havamin}} + 1,17^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

Burada; T_{\min} : En düşük kaplama dizayn sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$),

T_{havamin} : En düşük bir günlük ortalama hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)'dir.

Yukarıda (2) ve (3) bağıntıları ile bulunan kaplama dizayn sıcaklıkları %50 güvenilirlik derecesinde elde edilmektedir. Bu sıcaklıkların Superpave sisteminde

$$T_{\text{maks}} = 54,32 + 0,78T_{\text{havamaks}} - 0,0025E^2 - 15,14\log(H+25) + z(9 + 0,61S_{\text{maks}}^2)^{0,5} \quad (6)$$

$$T_{\min} = -1,56 + 0,72T_{\text{havamin}} - 0,004E^2 + 6,26\log(H+25) - z(4,4 + 0,52S_{\min}^2)^{0,5} \quad (7)$$

Burada;

T_{maks} : Yüzey altındaki yüksek kaplama sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

T_{\min} : Yüzey altındaki düşük kaplama sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

T_{havamaks} : En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

T_{havamin} : En düşük bir günlük ortalama hava sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

E: Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemi,

H: Yüzeye olan derinlik, mm

S_{maks} : En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığının standart sapması, $^{\circ}\text{C}$

S_{\min} : En düşük bir günlük ortalama hava sıcaklığının standart sapması, $^{\circ}\text{C}$

z: Standart sapma dağıtım tablosundan %98 güvenilirlik için alınan katsayı ($z=2,055$)'dir.

Kaplama sıcaklıklarına göre bağlayıcı seçimi:

Yukarıda düşük ve yüksek hava sıcaklıkları ve standart sapmaları verilen ve enlem derecesi ($40,63^{\circ}$) olan bir bölgenin %50 güvenilirlikteki kaplama dizayn sıcaklık değerleri yüksek sıcaklık için 56°C , düşük sıcaklık için -23°C olacaktır. Buna göre, 56°C 'de bağlayıcı sınıfı mevcut olmadığından bir üst sınıf seçilir ve %50 güvenilirlik için yüksek sıcaklık derecesi PG 58-Y olmalıdır. Bu durumda seçilen PG 58-Y sınıfı yaklaşık %85 güvenilirliktedir. Daha düşük bir derece olan 52°C seçilirse güvenilirlik %50'den daha az olacaktır. Benzer şekilde, -23°C 'den daha düşük sıcaklıklardan korunmak için düşük sıcaklık derecesi PG X-28 olmalıdır. Buna göre bağlayıcının

esas alınan %98 güvenilirlik değerleri aşağıdaki bağıntılarla bulunmaktadır [16].

$$T_{20\text{mm}\%98} = T_{20\text{mm}\%50} + 2S_{\text{maks}} \quad (4)$$

$$T_{\min\%98} = T_{\min\%50} + 2S_{\min} \quad (5)$$

Yapılan çalışmalarda, orijinal SHRP düşük kaplama sıcaklığı algoritmasının düşük kaplama sıcaklığını tespit etmede isabetsiz görülmesi, FHWA (Federal Karayolu İdaresi) bünyesindeki LTPP (Uzun Dönem Kaplama Performansı) programını yeni araştırmalara sevk etmiştir. Araştırma kapsamında, daha fazla çevresel parametreler yardımıyla bir dönüştürme modeli hazırlanarak önerilmiştir. Buna göre yüksek ve düşük kaplama dizayn sıcaklıkları aşağıdaki bağıntılarla belirlenmektedir [7,9,16].

%98 güvenilirlikteki yüksek sıcaklık derecesi PG 64-Y; düşük sıcaklık derecesi ise PG X-34 olacaktır [5,12].

Trafik hızına ve sayısına göre bağlayıcı seçimi:

Bitümlü bağlayıcı seçimi bir yolun 90 km/saat hızda ve 80,0 kN ağırlıkta transit trafiğe maruz kalacağı varsayılarak teşkil edilmektedir. Şartname, yüksek trafik sayısı, yavaş hareket eden ve duran taşıtlar için bağlayıcı yüksek sıcaklık seçiminde ilave değişiklikleri gerekli görmektedir. Bunun için trafik hızına göre yüksek sıcaklık derecesi en az bir veya iki derece arttırılmaktadır [2,4,5,9,12]. Tablo 3'de AASHTO MP-2 standardı tarafından tavsiye edilen düzeltme sayıları verilmiştir.

Tablo 3. Trafik Hızı ve Sayısı Esas Alınarak Bağlayıcı Seçilmesi [9,16,19]

Dizayn ETDY Sayısı, Milyon (20 Yıllık)	Bağlayıcı PG Derecesi Ayarlama		
	Trafik Hızı (Yük Oranı)		
	Duran Trafik (<20 km/saat)	Yavaş Trafik (20–70 km/saat)	Standart Trafik (>70 km/saat)
<0,3	-	-	-
0,3–3	2	1	-
3–10	2	1	-
10–30	2	1	-
≥30	2	1	1

3. Materyal ve Metot

3.1. Bağlayıcıların Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Yöntemiyle Yaşlandırılması

Asfalt bağlayıcının karıştırma ve yapım sırasındaki kısa süreli yaşlanmasını temsil eden Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT), AASHTO T240 standardına

göre Şekil 3'de görülen cihaz kullanılarak yapılmaktadır. Deneyde, ince bir film halinde hareket eden asfalt bağlayıcıda, sıcaklık ve havanın etkisiyle uçucu madde kaybının tespit edilmesi ve deneyden sonra yaşlanmış olarak elde edilen bağlayıcının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır [1,6,14,20].



(a)



(b)

Şekil 3. Dönel İnce Film Etüvü (RTFOT) Cihazı (a) ve Şişelerin Yerleştirilmesi (b)

Deneyde kullanılacak 8 adet şişenin her birine $35 \pm 0,5$ gr asfalt bağlayıcı doldurularak cihazın dönen tablasına yerleştirilir ve tabla dakikada 15 devir yapacak şekilde 85 dakika döndürülür. Dönme esnasında bir hava üfleyici yardımıyla şişelere akışı 4000 ± 200 ml/dakika olacak şekilde hava püskürtülür. Sıcaklık, dönme hareketi ve hava üfleme etkisiyle asfalt bağlayıcı şişe içerisini tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede bağlayıcının yaşlanması sağlanmaktadır [2,6,20,21,22]. Deneyden sonra, şişelerden 6 tanesi bir kaba boşaltılarak PAV ve DSR deneylerinde kullanılmak üzere saklanır. Kalan iki şişe, bağlayıcıda oluşan kütle kaybının tespit edilmesi amacıyla kullanılır. Kütle kaybı, yaşlanmadan önceki ağırlık (M_1) ve sonraki ağırlık (M_2) yardımıyla aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [1,2,6,21,22]. Kütle kaybı; asfalt bağlayıcı içerisindeki uçucu maddelerin kaybindan ibaret olup bağlayıcının taşıma, depolama,

ısıtılma, kaplamanın inşası ve kullanımı esnasında sertleşmesinin bir göstergesidir [1].

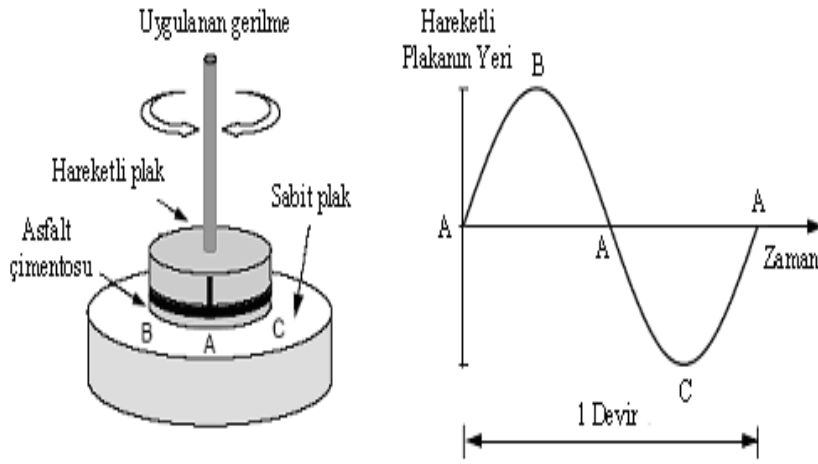
$$\text{Kütle Kaybı, \%} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100 \quad (8)$$

3.2. Bağlayıcıların Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi ile Yüksek Sıcaklık Hassasiyetlerinin Belirlenmesi

DSR deneyi ile, yapımdan hemen sonraki yüksek servis sıcaklıklarında kaplamanın tekerlek izi oluşumuna karşı direnci ve ilerleyen dönemlerde orta servis sıcaklıklarında kaplamanın yorulma çatlağı oluşumuna karşı dayanımı belirlenmektedir [6]. Ölçümler, farklı sıcaklık, farklı gerilme ve deformasyon düzeyleri ve farklı frekanslarında elde edilebilmektedir [6,23]. DSR deneyinde, asfalt numunenin sinüsoidal gerilmelere karşı davranışı belirlenerek bitümlü bağlayıcının kompleks kayma

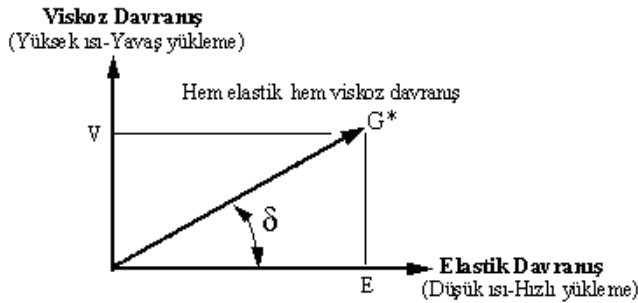
modülü (kayma sertliği) (G^*) ve faz açısı (δ) hesaplanmaktadır. Viskoelastik bölgede bitümlü bağlayıcıların kayma deformasyonuna karşı dayanımının göstergeleri olan G^* ve δ , sıcak kaplamaların tekerlek izi oluşumu ve yorulma ömrü potansiyelini belirlemeye yardımcı olmaktadır [6]. DSR deneyinde asfalt numunesi Şekil 4'de görüldüğü gibi, sabit bir plaka ile sola ve sağa küçük dönme hareketleri (salınım) yapabilen bir plaka arasına sabit kalınlıkta yerleştirilerek belirli bir ısı altında ve belirli bir hızda döndürülmeye çalışılır. Döner tablaya

uygulanan gerilme ile tabla A noktasından B noktasına kadar hareket ettirilir. Sonra tabla B noktasından A noktasına ve C noktasına kadar döndürülür. Daha sonra C noktasından tekrar A noktasına kadar döndürülür. Döner tablanın bu hareketine bir devir denilir ve bu salınım deney süresince aynı şekilde tekrar edilir [6,12]. Deney, saniyede 10 radyanlık sabit bir frekansta 10 devir yapılarak gerçekleştirilmektedir [14].



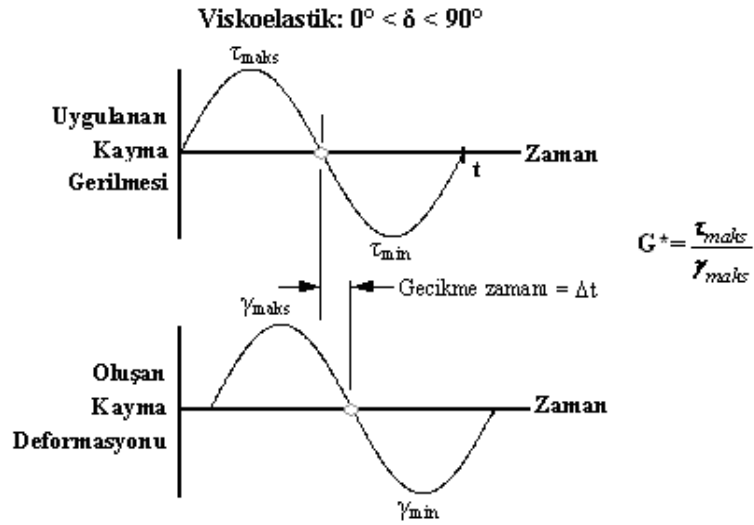
Şekil 4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Çalışma Şekli [6,12]

DSR ile bağlayıcıların G^* ve δ parametreleri ölçülerek viskoz ve elastik davranışları tanımlanmaktadır. Kayma modülü (G^*), malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulmasıyla deformasyona karşı gösterdiği toplam direncin bir ölçüsüdür ve elastik ve viskoz olmak üzere Şekil 5'de görüldüğü gibi iki bileşeni bulunmaktadır.



Şekil 5. Viskoelastik Davranış [1,2,24]

Faz açısı (δ) ise viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının göstergesidir ve uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır (Şekil 6). Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özelliği sebebiyle, normal sıcaklıklarda faz açısı 0° ile 90° arasında değişecektir. Faz açısının düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir [12,14]. Kesme modülü ve faz açısı yükleme frekansı ve sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Asfalt bağlayıcı, yüksek sıcaklıklarda viskoz bir sıvı gibi davranır. Yani faz açısı $\delta = 90^\circ$ iken malzemenin kayma modülü elastik bir özellik göstermez. Çok düşük sıcaklıklarda ise bağlayıcı, oluşan deformasyonların tamamen geri döndüğü elastik katılar gibi davranmaktadır. Bu da faz açısı $\delta = 0^\circ$ iken malzemenin kayma modülünün viskoz bir özellik taşımadığı anlamına gelir [1,2,6,12].



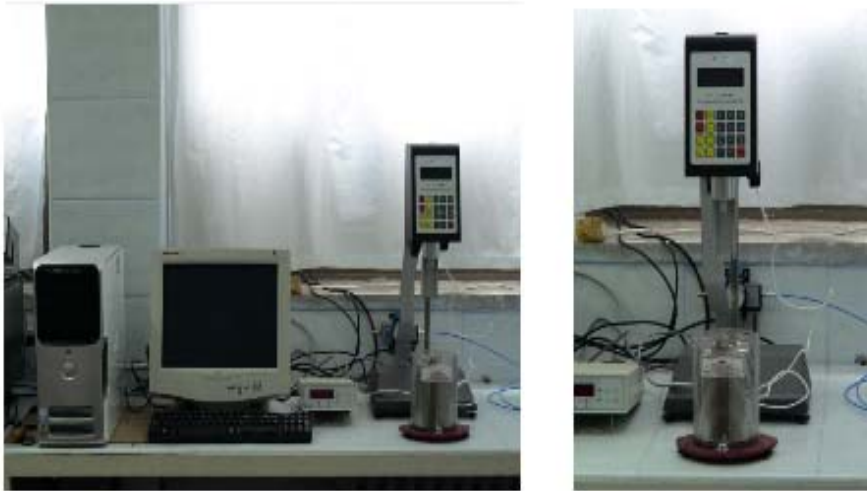
Şekil 6. Viskoelastik Malzemelerde Gerilme-Deformasyon İlişkisi [12,14]

DSR deneyinde, işlem görmemiş ve RTFOT ile yaşlandırılmış asfalt bağlayıcılarda 1000 mikron (1 mm) aralık ve 25 mm çaplı plakalar, PAV ile yaşlandırılmış numunelerde ise 2000 mikron aralık ve 8 mm çaplı plakalar kullanılmaktadır. Deneyin gerilme veya deformasyon kontrollü yapılmasına bağlı olarak gerekli değerler hedef verisi olarak bilgisayara girilmektedir [6,12,22,23].

Deney sonucunda belirlenen G^* ve δ değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değeri tespit edilmektedir. Yüksek tekerlek izi direnci için $G^*/\sin\delta$ değeri orijinal bağlayıcılar için en az 1,00 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise en az 2,20 kPa olmalıdır. Yüksek G^* ve düşük δ değerleri tekerlek izi direncine karşı artışı ifade eder [6,12].

3.3. Bağlayıcıların Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi ile Akıcılıklarının Belirlenmesi

RV deneyi, bitümlü bağlayıcının sıcak karışım tesisinde ne derece işlenebilirlik ve pompalanabilirliğe sahip olduğunun tespiti için yüksek sıcaklıklardaki akıcılığının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu amaçla Şekil 7'de görülen ve ASTM D 4402 standardına uygun olan "Brookfield Viskozimetresi" kullanılmaktadır [2,6,12,23]. Dönel viskozite değeri, silindirik bir milin sabit bir sıcaklıkta asfalt numunesi içinde kendi etrafında sabit 20 rpm. hızla döndürülürken burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir [12]. Orijinal bağlayıcılara uygulanan RV deneyinde şartnameye göre bağlayıcının 135°C sıcaklıkta ölçülen viskozite değerinin 3 Pa.s'yi aşmaması istenmektedir [2,6,12].



Şekil 7. Brookfield Dönel Viskozimetresi

Viskozimetre ayrıca, karışım tasarımında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılan sıcaklık-viskozite grafiğinin hazırlanmasında yardımcı olmaktadır. Şartnamede karıştırma için $0,17 \pm 0,02$ Pa.s (170 ± 20 cP), sıkıştırma için ise $0,28 \pm 0,03$ Pa.s (280 ± 30 cP) viskozite aralıkları tavsiye edilmiştir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının belirlenebilmesi için RV deneyinin iki farklı sıcaklıkta (135°C ve 165°C) yapılması gerekmektedir. Farklı iki sıcaklıkta belirlenen viskozite değerleri viskozite-sıcaklık grafiğinde işaretlenerek karıştırma ve sıkıştırma için tavsiye edilen viskozite değerlerini sağlayacak sıcaklık aralıkları belirlenmektedir [6,23,25].

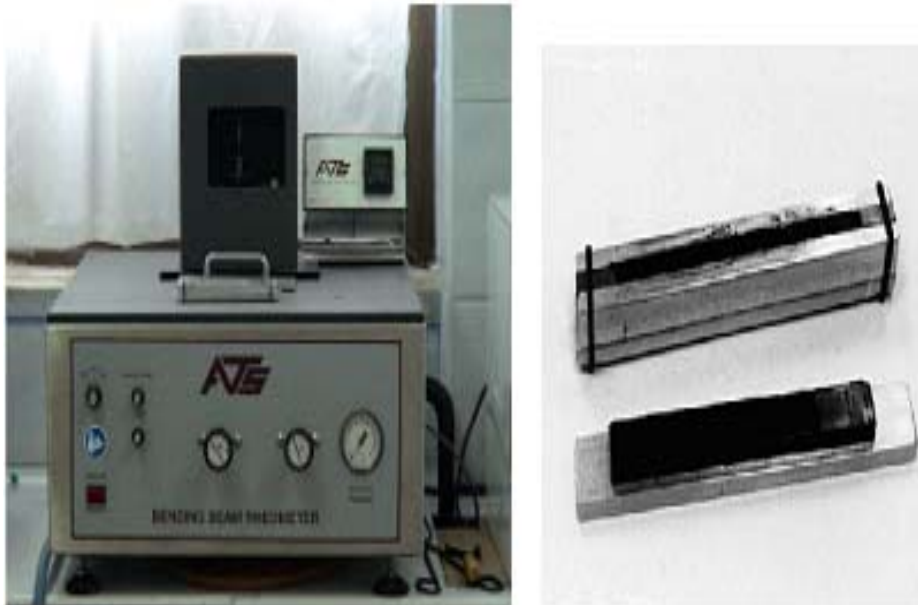
3.4. Bağlayıcıların Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi ile Düşük Sıcaklık Hassasiyetlerinin Belirlenmesi

Soğuk iklimli bölgelerde inşa edilen esnek kaplamalarda, yüke bağlı olmayan ancak iklim ve çevre şartlarından kaynaklanan ve termal çatlak olarak da isimlendirilen düşük sıcaklık çatlaklarının gözlenmesi amacıyla Şekil 8'de görülen kiriş eğme reometresi (BBR) geliştirilmiştir.

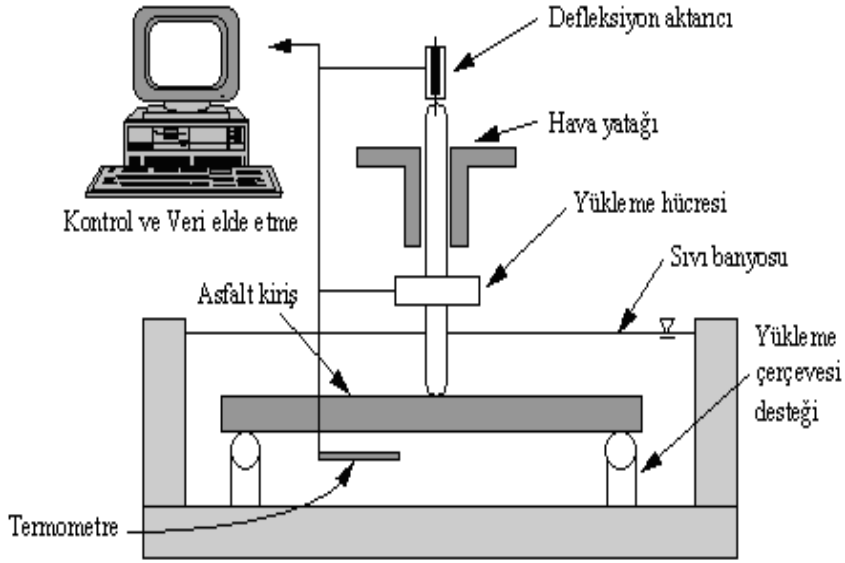
Bu deney, belirli ısıda ve sabit bir yük altında asfalt bağlayıcının ne kadar sünme veya defleksiyon yapacağını ölçer ve asfalt kaplamanın karşılaşılabileceği en düşük sıcaklıklardaki elastik davranışını belirlemeye çalışır [6,7,12]. Deney RTFOT ve PAV testleri ile yaşlandırılmış

bağlayıcılar üzerinde de yapılabildiğinden, bağlayıcıların zaman içindeki değişimi de saptanabilmektedir. Ayrıca, bağlayıcının yüksek ve düşük sıcaklıklarda nasıl bir sertlik davranışı gösterdiği, DSR ve BBR deney sonuçları birlikte ele alınarak geniş bir sıcaklık aralığında değerlendirilmektedir [1]. Adını numunenin geometrisinden ve uygulanan yükün şeklinden alan BBR deney aletinin şematik görünüşü Şekil 9'da verilmiştir.

Deneyde, standart ölçülerdeki ($12,5 \times 125 \times 6,25$ mm) kiriş şeklindeki asfalt çubuğa sabit bir tekil kuvvet (980 ± 5 mN) uygulanır ve 240 saniyelik deney süresi boyunca çubuğun ortasında oluşan defleksiyon ölçülerek sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) hesaplanır. Deney sırasındaki yükleme, çok düşük sıcaklıklarda kaplamanın yavaş yavaş maruz kaldığı termal gerilmeleri temsil etmektedir. Sünme sertliği, bağlayıcının sünme gerilmelerine karşı gösterdiği direnç, sünme oranı ise yükleme süresince bağlayıcının sertliğindeki değişim olarak değerlendirilmektedir [1,6,7,12,22]. SHRP araştırmacıları, düşük kaplama sıcaklığındaki S değerine iki saatlik yükleme sonucu ulaşılmasına rağmen, deney sıcaklığının 10°C arttırılması sonucu aynı sünme değerinin 60 saniye sonra elde edildiğini belirlemişlerdir. Superpave şartnamesine göre 60 sn yükleme süresi için sünme S değerinin en fazla 300 MPa olması istenmektedir.

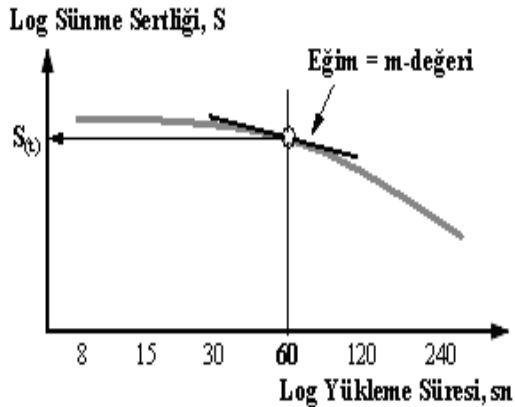


Şekil 8. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Aleti ve Asfalt Kiriş Numune



Şekil 9. Kiriş Eğme Reometresinin (BBR) Şematik Görünüşü [7,12,14,26]

Deney sonucunda elde edilen ikinci parametre olan m -değer, zamana bağlı olarak $S(t)$ değerinin değişimini ifade etmektedir (Şekil 10). Bu değeri elde etmek için, farklı yükleme zamanlarındaki sertlik ölçülerek elde edilen sertlik-zaman eğrisinde 60. sn'deki teğetin eğimi m -değer olarak alınmaktadır [6,12,14,23]. Sıcaklık düştükçe ve termal gerilmeler devam ettikçe, bağlayıcıdaki sertlik zamanla değişeceğinden, yüksek m -değer'leri tercih edilmektedir. Yüksek m -değeri, daha az sert bağlayıcı anlamına geleceğinden kaplamada oluşacak çekme gerilmeleri azalacak ve termal çatlaklar oluşmayacaktır. Bu nedenle, bağlayıcı şartnamesi 60 sn yükleme sonunda m -değer'inin en az 0,300 olması şartını getirmiştir [1,12].



Şekil 10. Sünme Oranı (m -değer) Değerinin Grafiklerle Belirlenmesi [1,6,12,14].

4. BULGULAR ve DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmanın ilk aşamasında, uygulama bölgesi olarak seçilen ve $38^{\circ}41'$ enlem derecesine sahip olan Elazığ'ın son 20 yıldaki en yüksek ve en düşük hava sıcaklıkları tespit edilmiştir. Bölgenin coğrafi konumu dikkate alınarak %50 ve %98 güvenilirlik derecelerindeki hava ve kaplama dizayn sıcaklıkları belirlenmiş ve bölgeye uygun bağlayıcı performans sınıfı tespit edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise kullanılan iki farklı bitümlü bağlayıcı (B 70/100 ve B 160/220), yaşlandırılmadan önce RV ve DSR, RTFOT yöntemiyle yaşlandırıldıktan sonra DSR ve BBR performans deneylerine tabi tutularak elde edilen sonuçlara göre tekerlek izi ve düşük sıcaklık dayanımı bakımından Elazığ için uygun olan bağlayıcı seçilmiştir.

4.1. Performans Dereceli (PG) Bağlayıcı Sınıfı Seçimi

Meteorolojik veri tabanı Kullanılarak Proje Hava Şartlarının Tespit Edilmesi:

Çalışmada, temin edilen 20 yıllık en yüksek 7 günlük ve en düşük 1 günlük hava sıcaklıkları Tablo 4'de verilmiştir. Bu sıcaklıkların ortalaması alınarak yüksek ve düşük hava sıcaklıkları belirlenmiş ve her iki sıcaklık değerinin standart sapması hesaplanarak tabloda gösterilmiştir.

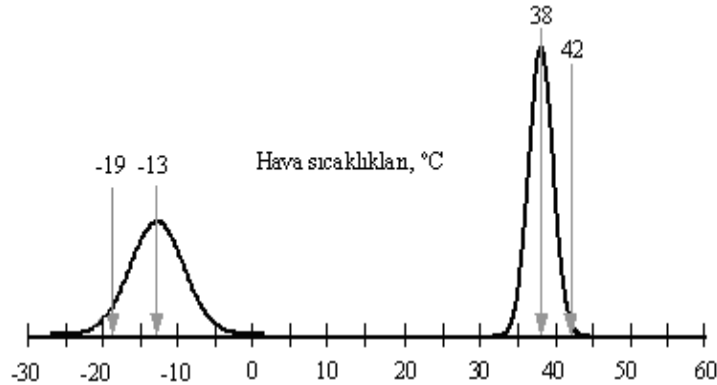
Tablo 4. Elazığ'ın 20 Yıllık En Yüksek ve En Düşük Hava Sıcaklık Değerleri

Yıllar	Yüksek Sıcaklık (°C)							Düşük Sıcaklık (°C)	
	Gün								
	1	2	3	4	5	6	7		
1	36,0	35,5	37,6	38,1	40,1	40,0	39,0	-10,8	
2	35,0	36,3	36,3	35,5	36,5	36,6	34,7	-8,7	
3	35,0	35,4	36,0	36,7	37,5	38,0	36,2	-11,2	
4	37,7	35,0	37,2	37,6	40,4	40,4	36,0	-15,8	
5	38,2	38,0	36,0	36,4	39,8	39,0	39,2	-14,6	
6	33,0	34,2	34,2	36,8	37,0	35,2	34,4	-19,1	
7	34,5	36,8	39,4	40,2	40,2	40,0	38,0	-18,6	
8	37,0	37,4	37,8	38,8	38,4	37,4	35,4	-15,3	
9	36,0	36,2	37,0	37,6	37,0	35,4	35,6	-10,4	
10	37,0	37,8	37,8	38,4	38,8	37,4	36,2	-10,4	
11	35,0	33,2	36,0	35,8	35,4	36,6	36,6	-13,0	
12	39,0	39,6	39,8	37,9	38,5	40,1	39,7	-10,3	
13	35,0	35,2	35,8	37,3	38,8	38,8	37,3	-8,0	
14	38,3	39,4	39,8	40,7	42,2	41,8	40,0	-16,5	
15	40,0	41,4	40,5	39,6	39,3	38,0	40,1	-11,4	
16	35,4	36,0	36,2	36,3	36,5	36,8	35,2	-17,7	
17	35,5	33,2	35,0	39,2	35,6	37,0	37,2	-14,4	
18	36,0	36,0	36,6	37,3	38,3	39,0	38,5	-12,4	
19	37,6	37,3	37,3	39,6	38,6	38,8	37,8	-10,0	
20	39,2	40,6	41,2	40,6	40,2	40,2	38,7	-13,0	
Ortalama Sıcaklık (°C)								38	-13
Standart Sapma (°C)								2	3

Güvenirlilik ve Hava sıcaklığının seçilmesi:

Bölgenin düşük ve yüksek hava sıcaklık değerleri kullanılarak Şekil 11'de bir frekans dağılım eğrisi temsili olarak gösterilmiştir. Buna göre, yüksek

sıcaklık ortalaması 38°C olan Elazığ'da, çok sıcak geçen bir yaz mevsiminde sıcaklığın 42°C'ye ulaşma ihtimali %2'dir ve bu durumda güvenirlilik %98 olarak kabul edilir.



Şekil 11. Elazığ için En Düşük ve En Yüksek Hava Sıcaklıklarının Dağılımı

Hava sıcaklıklarının kaplama sıcaklıklarına dönüştürülmesi:

(T_{\min}) dizayn sıcaklıkları SHRP, Kanada SHRP ve LTPP yöntemlerine göre aşağıdaki gibi hesaplanarak sonuçları Tablo 5’de verilmiştir.

Ortalama yüksek ve düşük hava sıcaklıkları esas alınarak kaplama yüksek ($T_{20\text{mm}}, T_{\text{maks}}$) ve düşük

SHRP yöntemine göre;

$$T_{20\text{mm}} = (T_{\text{havamaks}} - 0,00618E^2 + 0,2289E + 42,2) \times (0,9545) - 17,78$$

$$T_{20\text{mm}} = (38 - 0,00618 \times 38,41^2 + 0,2289 \times 38,41 + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 = 59 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$T_{\min} = T_{\text{havamin}} = -13 \text{ }^\circ\text{C' dir.}$$

Kanada SHRP yöntemine göre kaplama yüzeyi düşük dizayn sıcaklığı;

$$T_{\min} = 0,859T_{\text{havamin}} + 1,17 \text{ }^\circ\text{C} = 0,859 \times (-13) + 1,17 = -10 \text{ }^\circ\text{C' dir.}$$

Kaplama dizayn sıcaklıklarının %98 güvenirlilik değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{20\text{mm}\%98} = T_{20\text{mm}\%50} + 2S_{\text{maks}} = 59 + 2 \times 2 = 63 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$T_{\min\%98} = T_{\min\%50} + 2S_{\min} = -13 + 2 \times (-3) = -19 \text{ }^\circ\text{C}$$

LTPP yöntemine göre kaplama dizayn sıcaklıkları %98 güvenirlilikte aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$T_{\text{maks}} = 54,32 + 0,78T_{\text{havamaks}} - 0,0025E^2 - 15,14 \log(H+25) + z(9+0,61S_{\text{maks}}^2)^{0,5}$$

$$T_{\text{maks}} = 54,32 + 0,78 \times 38 - 0,0025 \times 38,41^2 - 15,14 \times \log(20+25) + 2,055 \times (9+0,61 \times 2^2)^{0,5}$$

$$T_{\text{maks}} = 62 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\min} = -1,56 + 0,72T_{\text{havamin}} - 0,004E^2 + 6,26 \log(H+25) - z(4,4+0,52S_{\min}^2)^{0,5}$$

$$T_{\min} = -1,56 + 0,72 \times (-13) - 0,004 \times 38,41^2 + 6,26 \times \log(0+25) - 2,055 \times (4,4+0,52 \times 3^2)^{0,5}$$

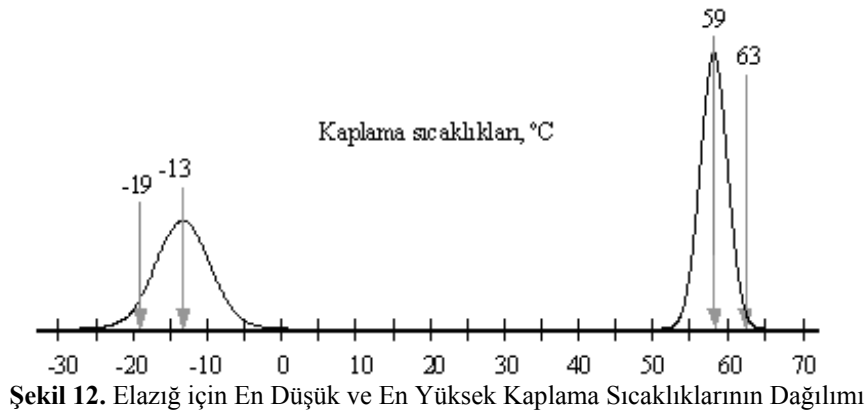
$$T_{\min} = -14 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tablo 5. Farklı Yöntemlere Göre Hesaplanan Kaplama Dizayn Sıcaklıkları

Hesaplama Yöntemi	% 50 Güvenirlilik				% 98 Güvenirlilik			
	T_{havamaks}	$T_{20\text{mm}}$	T_{havamin}	T_{\min}	T_{havamaks}	$T_{20\text{mm}}$	T_{havamin}	T_{\min}
SHRP	38	59	-13	-13	42	63	-19	-19
K. SHRP	38	-	-13	-10	42	-	-19	-16
LTPP	38	-	-13	-	42	62	-19	-14

Tablo 5’de verilen sıcaklıklara bakıldığında en olumsuz olması sebebiyle çalışmada, SHRP yöntemi ile elde edilen sıcaklık değerleri esas alınmıştır. Buna

göre %50 ve %98 güvenirlilikteki kaplama dizayn sıcaklıkları Şekil 12’de grafik olarak gösterilmiştir.

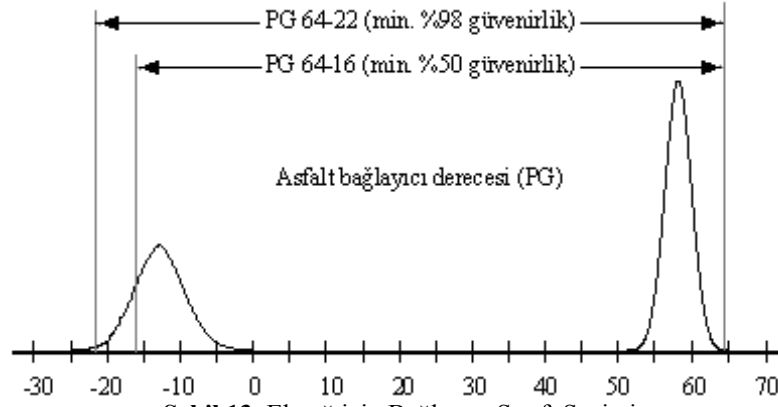


Şekil 12. Elazığ için En Düşük ve En Yüksek Kaplama Sıcaklıklarının Dağılımı

Kaplama sıcaklıklarına göre bağlayıcı seçimi:

Tablo 5’de, SHRP yöntemine göre %50 güvenilirlikte hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 59°C, düşük sıcaklık değeri -13°C’dir. Bu güvenilirlik değeri için seçilecek olan bağlayıcı sınıfı PG 64-16 olacaktır.

Aynı yöntemle %98 güvenilirlik derecesi için hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 63°C, düşük sıcaklık değeri -19°C olduğundan bağlayıcı sınıfı PG 64-22 olarak seçilmiştir. Seçilen bu bağlayıcı sınıfının güvenilirlik derecesine göre sıcaklık dağılım grafiği Şekil 13’de verilmiştir.



Şekil 13. Elazığ için Bağlayıcı Sınıfı Seçimi

Benzer şekilde, Kanada SHRP yöntemine göre bağlayıcı sınıfı %50 güvenilirlik için PG 64-10, %98 güvenilirlik için PG 64-16 ve LTPP yöntemine göre %98 güvenilirlik için PG 64-16 olmaktadır. Bu sonuçlara göre yüksek sıcaklık değerleri bütün yöntemler için 64°C olarak tespit edilmiştir. Ancak düşük sıcaklık bakımından Kanada SHRP ve LTPP yöntemleriyle %98 güvenilirlik derecesi için bulunan bağlayıcı sınıfı, SHRP yöntemine göre %50 güvenilirlik derecesindeki bağlayıcı sınıfına eşit olmaktadır.

Trafik hızına ve sayısına göre bağlayıcı seçimi:

Elazığ için 20 yıllık trafik sayısı tahmini olarak 15 milyon eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısı alınmış

ve trafiğin standart hızda (>70 km/saat) seyrettiği kabul edilmiştir. Superpave yöntemine göre trafik sayısı 30 milyona kadar olan yollarda yüksek sıcaklık derecesinin artırılmasına gerek görülmediğinden bağlayıcı sınıfı PG 64-22 olarak seçilmiştir.

4.2. Bağlayıcı Performans Seviyesinin Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi

Çalışmada kullanılan B 70/100 ve B 160/220 penetrasyon dereceli iki bitümlü bağlayıcının bazı fiziksel özellikleri ve bunların AASHTO T240 standardına göre RTFOT ile yaşlandırıldıktan sonraki kütle kaybı sonuçları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Bitümlü Bağlayıcıların Fiziksel Özellikleri ve RTFOT Kütle Kayıpları

Özellikler	Deney Standardı	B 70/100		B 160/220	
		Sonuç	Şartname Sınırı	Sonuç	Şartname Sınırı
Özgül Ağırlık (gr/cm ³), 25 °C	TS 1087	1,030	1,0-1,1	1,028	1,0-1,1
Düktilite (cm), 25 °C	TS 119	114	min. 100	132	min. 100
Penetrasyon (0,1 mm), 100gr, 5 sn, 25 °C	EN 1426 (TS 118)	94	70-100	172	160-220
Yumuşama Noktası (°C)	EN 1427 (TS 120)	48,2	43-51	40,6	35-43
Parlama Noktası (°C)	EN 22719	322	min. 230	304	min. 230
Kütle Kaybı (%)	AASHTO T240	0,539	maks. 1,0	0,796	maks. 1,0

4.2.1. Bağlayıcıların dönel viskozimetre (RV) deneyi ile akıcılıklarının belirlenmesi

Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespiti için DV-III Ultra Brookfield viskozimetresi kullanılarak gerekli olan 135 ve

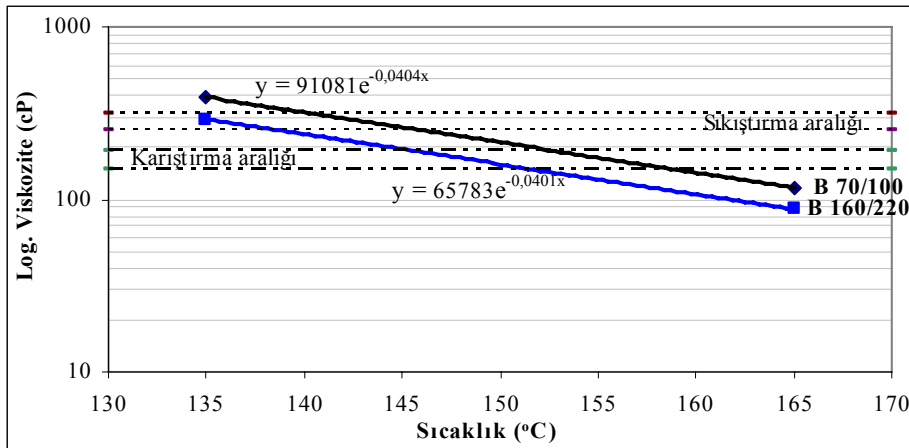
165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri bulunmuştur. Deney, 27 numaralı silindirik mil kullanılarak 20 rpm. hızda yapılmış ve sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Bağlayıcıların Viskozite Değerleri

Bağlayıcı	Viskozite, cP	
	135°C	165°C
B70/100	391,7	116,7
B160/220	291,7	87,5

İki farklı sıcaklıkta elde edilen viskozite değerleri yardımıyla çizilen viskozite-sıcaklık grafikleri (Şekil 14) yardımıyla, şartnamede ifade edilen karıştırma (170±20 cP) ve sıkıştırma (280±30 cP) viskozite değerlerinin viskozite-sıcaklık grafiğini kestiği aralıklar belirlenerek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları bulunmuş ve sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 7 ve Tablo 8 incelendiğinde daha sert bir kıvama sahip olan B 70/100 bağlayıcısının yüksek sıcaklıklardaki akıcılığı, daha yumuşak kıvamlı olan B 160/220 bağlayıcısından daha düşük bulunmuştur.



Şekil 14. Bağlayıcıların Viskozitesinin Sıcaklıkla Değişimi

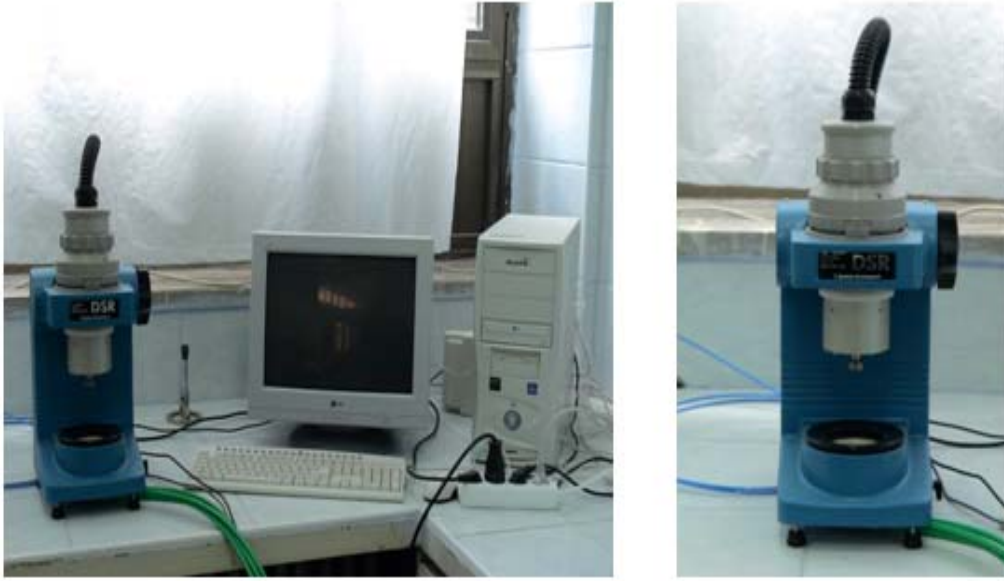
Tablo 8. Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıkları

Bağlayıcı	Karıştırma Aralığı, °C	Karıştırma Sıcaklığı, °C	Sıkıştırma Aralığı, °C	Sıkıştırma Sıcaklığı, °C
B 70/100	156–161	158,5	143–150	146,5
B 160/220	149–155	152,0	133–141	137,0

4.2.2. Bağlayıcıların dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi ile yüksek sıcaklık hassasiyetlerinin belirlenmesi

Çalışmada, Elazığ için performans derecesi PG 64–22 olarak seçilen bağlayıcı sınıfının, 64°C yüksek sıcaklıktaki performans özelliklerini sağlaması

amacıyla kullanılan B 70/100 ve B 160/220 bağlayıcılarının yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri (G^* , δ) ve dolayısıyla $G^*/\sin \delta$ tekerlek izi parametresi belirlenerek şartname kriterleri ile kıyaslanmış ve uygunlukları araştırılmıştır. Bu amaçla Şekil 15'de görülen Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi kullanılmıştır.



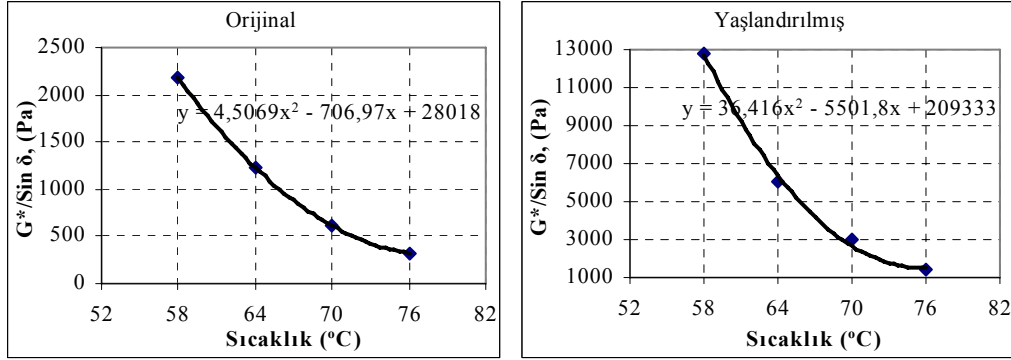
Şekil 15. Bohlin DSR II Dinamik Kayma Reometresi

Bağlayıcıların yüksek sıcaklık özelliklerinin tespiti için, yaşlandırılmamış (orijinal) ve RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılardan B 70/100 bitümü 58-76°C, B 160/220 bitümü ise 52-70°C sıcaklık aralığında 6°C artışla 4 farklı sıcaklıkta deneylere tabi tutulmuştur. Deney, 1000 mikron aralık ve 25 mm çaplı plakalar kullanılarak salınım hızı 10 rad/sn frekansta gerilme kontrollü olarak yapılmış olup, orijinal numunelere 120 Pa, yaşlandırılmış numunelere 220 Pa sabit gerilme uygulanmıştır.

Deney sonucunda, orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki DSR deney sonuçları sırasıyla Tablo 9 ve Tablo 10'da verilmiştir. Bağlayıcıların “ $G^*/\sin \delta$ ” tekerlek izi parametresi, şartname kriterleri (AASHTO MP1) ile kıyaslanmış ve yüksek servis sıcaklıklarındaki performans dereceleri belirlenmiştir. Ayrıca bu sonuçlara göre, bağlayıcıların “ $G^*/\sin \delta$ ” tekerlek izi parametresinin sıcaklıkla değişim grafikleri yine sırasıyla Şekil 16 ve Şekil 17'de gösterilmiştir.

Tablo 9. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 64–22 Numunelerinin DSR Deney Sonuçları

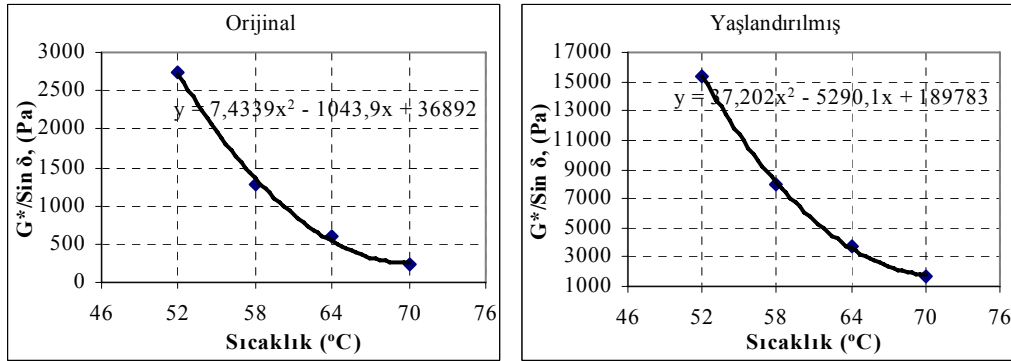
Sıcaklık / Özellik	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\sin \delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa)	Performans Derecesi
58 °C Orijinal	2144,97	80,57	2174,3		
64 °C Orijinal	1219,1	81,65	1232,2	≥ 1000	
70 °C Orijinal	608,81	83,63	612,6		
76 °C Orijinal	317,99	83,98	319,8		
58 °C Yaşlandırılmış	11791,7	66,72	12836,8		PG 64-Y
64 °C Yaşlandırılmış	5726,1	70,32	6081,3	≥ 2200	
70 °C Yaşlandırılmış	2836,9	73,97	2951,7		
76 °C Yaşlandırılmış	1404,4	77,14	1440,5		



Şekil 16. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 64–22 Numunelerinin G*/sin δ-Sıcaklık İlişkisi

Tablo 10. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28 Numunelerinin DSR Deney Sonuçları

Sıcaklık / Özellik	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	Şartname Limiti (Pa)	Performans Derecesi
52 °C Orijinal	2692,9	79,55	2738,3		
58 °C Orijinal	1268,9	81,89	1281,7	≥1000	
64 °C Orijinal	605,9	83,29	610,1		
70 °C Orijinal	223,1	84,83	224,0		PG 58-Y
52 °C Yaşlandırılmış	14244,2	68,43	15316,9		
58 °C Yaşlandırılmış	7597,2	70,96	8037,0	≥2200	
64 °C Yaşlandırılmış	3509,3	73,12	3667,30		
70 °C Yaşlandırılmış	1695,33	76,28	1745,10		



Şekil 17. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28 Numunelerinin G*/sin δ-Sıcaklık İlişkisi

DSR deney sonuçlarına göre; Tablo 9 ve Şekil 16 incelendiğinde B 70/100 bağlayıcısının tekerlek izi parametresinin ($G^*/\sin\delta$) orijinal bağlayıcı için 1232,12 Pa ile şartname limiti olan min.1000 Pa değerini sağladığı, ayrıca RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcı için 6081,35 Pa değeri ile şartname limiti olan min. 2200 Pa değerini sağladığı görülmektedir. Buna göre, B 70/100 bağlayıcısının 64°C yüksek sıcaklıktaki performans özelliklerini sağlaması sebebiyle PG 64-Y sınıfı bir bağlayıcı olduğu; ayrıca bu bağlayıcının şartname limitlerini yaklaşık 66°C sıcaklığa kadar sağladığı ve Elazığ bölgesi için

yüksek sıcaklık performans seviyesi bakımından uygun olduğu tespit edilmiştir. Tablo 10 ve Şekil 17 incelendiğinde, B 160/220 bağlayıcısının şartname limitlerini yaklaşık 60°C sıcaklığa kadar sağladığı ve dolayısıyla bu bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfının ise PG 58-Y olduğu görülmektedir. Bu durumda, B 160/220 bağlayıcısının yüksek sıcaklık performans seviyesi bakımından Elazığ için uygun olmadığı ancak daha düşük sıcaklığa sahip bölgelerde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

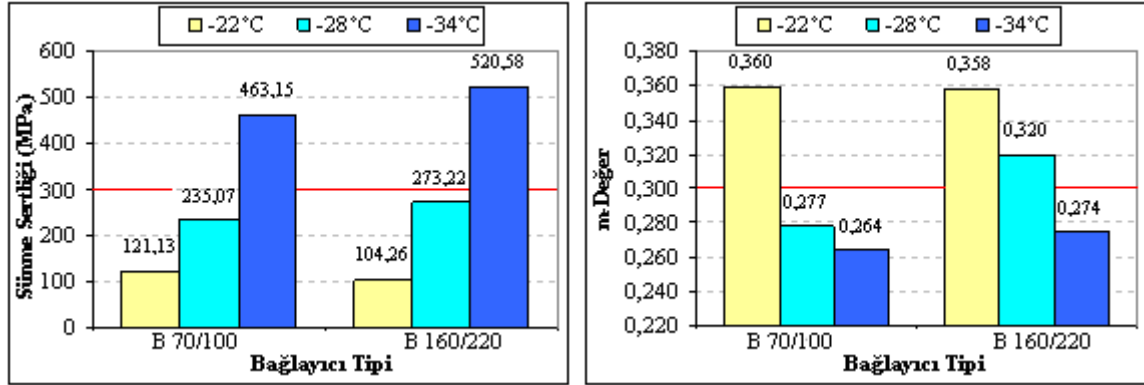
4.2.3. Bağlayıcıların kırılgan eğme reometresi (BBR) deneyi ile düşük sıcaklık hassasiyetlerinin belirlenmesi

Çalışmada, bağlayıcıların kaplamanın inşaatından hemen sonraki düşük sıcaklıklarda göstereceği performans özellikleri tespit edilerek, bu özelliklerin kaplamanın uzun süreli servis koşullarındaki düşük sıcaklık performans seviyesi tahmin edilmeye çalışılmıştır. Deneyde, uygulama bölgesi için -22°C olarak tespit edilen düşük sıcaklıktaki performans

özelliklerinin tespiti için bağlayıcılar -22 , -28 ve -34°C 'de BBR deneyine tabi tutulmuştur. Deney, kırılgan numuneye 240 sn süreyle 980 ± 5 mN yük uygulanarak yapılmıştır. Bağlayıcıların 60 saniye sonra elde edilen sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) değerleri elde edilerek Tablo 11'de verilmiştir. Bu değerlerin sıcaklıkla değişimi Şekil 18'de gösterilmiş ve bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda termal çatlaklara karşı gösterdikleri direnç tespit edilmiştir.

Tablo 11. Bağlayıcıların Farklı Sıcaklıklardaki BBR Deney Sonuçları

Bağlayıcı	-22 (-12)		-28 (-18)		-34 (-24)	
	S (MPa)	m-değer	S (MPa)	m-değer	S (MPa)	m-değer
PG 64-22	121,1300	0,35970	235,0700	0,277400	463,1500	0,263900
PG 58-28	104,2600	0,358100	273,2200	0,319900	520,5800	0,274100



Şekil 18. Bağlayıcıların Sünme Sertliği (S) ve Sünme Oranı (m-değer) Değerleri

BBR deney verilerine göre, Şekil 18 grafiği incelendiğinde; B 70/100 bağlayıcısının -22°C 'deki sünme sertliği değerinin 121,13 MPa ile şartname limiti olan maks.300 MPa değerini sağladığı, yine aynı sıcaklıktaki m-değer'in 0,360 değeri ile min.0,300 limitini sağladığı, dolayısıyla bu bağlayıcının kaplamanın inşaatından sonraki düşük sıcaklık performans derecesinin PG X-22 olduğu görülmektedir. B 70/100 bağlayıcısının yüksek ve düşük sıcaklık performans dereceleri birlikte değerlendirildiğinde PG 64-22 performans derecesini sağladığı ve Elazığ bölgesi için uygun olduğu görülmektedir. Benzer şekilde B 160/220 bağlayıcısının -28°C gibi çok düşük sıcaklıkta şartname limit değerlerini sağladığı, yüksek ve düşük sıcaklık performans dereceleri birlikte değerlendirildiğinde bu bağlayıcının PG 58-28 performans derecesine sahip olduğu görülmektedir. Bu durumda B 160/220 bağlayıcısının düşük sıcaklık performans seviyesi bakımından uygun olduğu ancak

yüksek sıcaklık bakımından uygun olmadığı için Elazığ bölgesinde kullanılmayacağı tespit edilmiştir.

5.SONUÇ

Superpave yönteminde, deneylerin kaplamanın hizmet vereceği coğrafi bölgedeki en düşük ve en yüksek sıcaklıklarda yapılması, kaplamada meydana gelen yorulma çatlaklarına, kalıcı deformasyonlara ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı bağlayıcı özelliklerinin sınırlandırılması, kaplamanın saha performansının daha iyi ve gerçekçi olarak yansıtılması üstün bir özelliktir.

Bu çerçevede, Elazığ'ın son 20 yıldaki Meteorolojik hava veri tabanı kullanılarak SHRP, Kanada SHRP ve LTPP yöntemlerine göre hesaplanan kaplama dizayn sıcaklıkları sonuçlarına göre; üç yöntem karşılaştırıldığında, en yüksek dolayısıyla en olumsuz ve sonuç olarak en güvenli tarafta kalan sıcaklıkların SHRP yöntemi ile elde edilen sıcaklık değerlerinin olduğu tespit edilmiştir. Buna göre

Elazığ için SHRP yöntemine göre tespit edilen PG 64-22 performans sınıfı bağlayıcı seçilmiştir. Bu bağlayıcı sınıfına uygunluğunu araştırmak amacıyla, çalışmada kullanılan B 70/100 ve B 160/220 bağlayıcılarının yüksek ve düşük sıcaklık performans özellikleri, Dinamik Kayma Reometresi (DSR) ve Kiriş Eğme Reometresi (BBR) deneyleri ile belirlenmiştir.

DSR deney sonuçlarına göre, B 70/100 bağlayıcının tekerlek izi parametresinin ($G^*/\sin\delta$) 64°C yüksek sıcaklıktaki performans özelliklerini sağladığı ve ayrıca bu bağlayıcının, şartname limitlerini yaklaşık 66°C yüksek sıcaklığa kadar karşılayabildiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde, B 160/220 bağlayıcısının şartname limitlerini yaklaşık 60°C sıcaklığa kadar sağlayabileceği, ancak 64°C yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direncinin yetersiz olduğu görülmüştür. Bu durumda bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıflarının sırasıyla PG 64-Y ve PG 58-Y olduğu tespit edilmiştir.

BBR deney sonuçlarına göre; B 70/100 bağlayıcısının, -22°C'deki sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) değerlerinin şartname limitlerini sağladığı, dolayısıyla bu bağlayıcının düşük sıcaklık performans özelliklerini -22°C'ye kadar sağladığı görülmektedir. B 160/220 bağlayıcısının ise -28°C gibi çok daha düşük sıcaklıkta performans limit değerlerini sağladığı görülmüştür. Bağlayıcıların düşük sıcaklık performans sınıflarının sırasıyla PG X-22 ve PG X-28 olduğu tespit edilmiştir. Yüksek ve düşük sıcaklık performansları birlikte değerlendirildiğinde; bağlayıcı performans derecelerinin sırasıyla PG 64-22 (B 70/100) ve PG 58-28 (B 160/220) olduğu görülmektedir. Bu durumda Elazığ bölge sıcaklıkları altında, B 70/100 bitümünün tekerlek izi ve termal çatlak direnci bakımından uygun olarak kullanılabilirliği, ancak B 160/220 bitümünün termal çatlak direnci bakımından uygun olmasına rağmen tekerlek izi direncinin yetersiz olduğu ve kullanılamayacağı tespit edilmiştir.

Yüksek maliyetleri nedeniyle yol üstyapılarının daha uzun ömürlü, trafik ve çevre şartlarının aşındırıcı etkilerine karşı daha dirençli olarak, öngörülen sürede ve konfor düzeyinde hizmet verecek şekilde tasarlanması ve üstün performanslı olarak inşa edilmesi önemli hale gelmektedir. Superpave sisteminin ülkemiz şartlarında değerlendirilerek uygulanması durumunda, karayolu ağımızın hizmet ömrü, maliyeti ve trafik güvenliği bakımından üstün niteliklere sahip olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Tunç, A., 2001, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.
2. Altaş, Ö.Y., 2002, Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 150s.
3. Kaşak, S., Orhan, F., Eribol, S., Güngör, A.G., 2004, Yeni Bitüm Standardı, 4.Ulusal Asfalt Sempozyumu, K.G.M., Ankara, 405-413.
4. The Asphalt Institute, 1996, Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2), U.S.A., 100p.
5. McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W., Solaimanian, M., 1995, Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-95-003, 172p.
6. Zaniewski, J.P., Pumphrey, M.E., 2004, Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, West Virginia University, Morgantown, 109p.
7. Loh, S., Olek, J., 1999, Contributions of PG Graded Asphalt to low Temperature Cracking Resistance of Pavement, Joint Transportation Research Program, Final Report FHWA/IN/JHRP-96/22, Perdue University, Indiana, 172p.
8. Orhan, F., 2000, Asfaltın Geleceği Superpave, 3.Ulusal Asfalt Sempozyumu, K.G.M., Ankara, 146-160.
9. Lavin, P.G., 2003, Asphalt Pavements, Spon Pres, London and New York, 444p.
10. Zaniewski, J.P., Padula, M., 2003, Automation of the Superpave Mix Design Process for the West Virginia Division of Highways, Asphalt Technology Program, West Virginia, 154p.
11. Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W., Anderson, M., 1994, The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays, SHRP-A-407, National Research Council, Washington, DC, 184p.
12. McGennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U., 1994, Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington, KY, 104p.
13. Zaniewski, J.P., Nallamothe, S.H., 2003, Evaluation of Binder Grades on Rutting Performance, Asphalt Technology Program Department of Civil and Environmental Engineering Morgantown, West Virginia, 76p.

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 27(1): 88-106 (2011)

14. Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Quintus, H.V., Moulthrop, J.S., 1994, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC, 170p.
15. Öztürk, E.A., Çubuk, M.K., 2004, Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 19, No 2, 175-184.
16. Harman, T., D'Angelo, J., Bukowski, J., 2002, Superpave Asphalt Mixture Design Workshop, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington, 78p.
17. Ünver, Ö., 1995, Uygulamalı İstatistik Yöntemler, Siyasal Kitabevi, Ankara, 545s.
18. Huber, G.A., 1994, Weather Database for the SUPERPAVE™ Mix Design System, SHRP-A-648A, Strategic Highway Research Program National Research Council, Washington, DC, 149p.
19. Superpave 2000 – Improved Standards for a New Millennium, 1999, Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP), C-SHRP Technical Brief # 17, Ontario, 8p.
20. http://bitval.fehrl.org/fileadmin/bitval/BitVal_final_report.pdf, Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests, Report on Phase 1 of the BitVal Project, FEHRL, 213p, Erişim Tarihi. 28.12.2007.
21. Dinç, E., 1999, Performans Sınıfı Asfaltlar, Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyleri, T.C.K. 16. Bölge Müdürlüğü, Sivas, 45s.
22. Warren, R.S., McGennis, R.B., Bahia, H.U., 1994, Superpave Asphalt Binder Test Methods an Illustrated Overview, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-068, Asphalt Institute, Lexington, 164p.
23. Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., et.al., 1994, Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, SHRP-A-370, Strategic Highway Research Program National Research Council, Washington, DC, 197p.
24. Asfalt El Kitabı, 2002, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:2, İstanbul, 573s.
25. Yildirim, Y., Solaimanian, M., Kennedy, T.W., 2000, Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete, Report No. 1250-5, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, 99p.
26. Reubush, S.D., 1999, Effects of Storage on the Linear Viscoelastic Response of Polymer-Modified Asphalt at Intermediate to High Temperatures, Master of Science in Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 351p.