

STİREN-BUTADİEN-STİREN MODİFİYELİ BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN SUPERPAVE SİSTEMİNE GÖRE YÜKSEK SICAKLIK PERFORMANS SEVİYESİNİN VE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet YILMAZ ve Baha Vural KÖK

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ
mehmetyilmaz@firat.edu.tr, bvural@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 05.12.2007 ; Kabul/Accepted: 23.10.2008)

ÖZET

Bitümlü sıcak karışım tabakalarında uygun bağlayıcı kullanılmaması sonucu yüksek sıcaklıklarda başlıca tekerlek izi olmak üzere birçok bozulma meydana gelmektedir. Kaplamanın yüksek performans sergilemesi için bitümlü sıcak karışımın belirli sıcaklıklarda karıştırılıp sıkıştırılması gerekmektedir. Kaplamada oluşacak bozulmaları engelleyerek kaplamanın servis ömrünü uzatmak amacıyla başlıca polimer kökenli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Superpave sisteminde bulunan dinamik kayma reometresi ve dönel viskozimetre deneyleri ile yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım parametreleri belirlenerek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada bitüm modifikasyonunda kullanılan stiren-butadien-stiren (SBS) katkı maddesinin bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık performansına ve işlenebilirliğine etkisi araştırılmıştır. Üç farklı oranda (%2, 4 ve 6) SBS, 100/150 penetrasyonlu bitüme ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcılar, dönel viskozimetre (RV) deneyine tabi tutularak karışımların sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcılar dönel ince film halinde ısıtma deney (RTFOT) yöntemi ile yaşlandırılmıştır. Bağlayıcılara yaşlandırma işleminden önce ve sonra DSR deneyi uygulanarak bağlayıcıların Superpave sistemine göre yüksek sıcaklık performans seviyeleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, SBS oranı arttıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca DSR deneyleri sonucunda yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış bağlayıcılarda SBS oranı artması ile yüksek sıcaklık dayanım parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değerinin arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitüm, SBS, dönel viskozimetre, dinamik kayma reometresi, superpave.

DETERMINING THE HIGH TEMPERATURE PERFORMANCE GRADE AND WORKABILITY OF STYRENE-BUTADIENE-STYRENE MODIFIED BITUMINOUS BINDERS ACCORDING TO SUPERPAVE SYSTEM

ABSTRACT

Various deterioration primarily rutting occurs on hot mix asphalt at high temperatures unless using suitable binder. Hot mix asphalts have to be mixed and compacted at specific temperatures in order to exhibit high performance. The polymer originated additives have been used to extend the service life of pavement by preventing the failures which will occur in pavement. The mixing and compaction temperatures can be identified by determining the resistance to rutting parameter at high temperatures using the experiments of dynamic shear rate (DSR) and rotational viscosimeter (RV) which are in superpave system. In this study the effect of styrene-butadiene-styrene (SBS), which is used for bitumen modification, on high temperature performance and workability of bitumen binders was investigated. The modified binders were obtained with adding three different SBS content (2%,4%,6%) to 100/150 penetration grade bitumen. The mixing and compaction temperature of mixtures were determined applying the rotational viscometer (RV) experiment to neat and modified asphalt. The neat and modified binders were aged according to RTFOT method. The high temperature performance levels of binders were determined according to Superpave system by carried out dynamic shear rheometer (DSR) test on

binders before and after aging processes. Based on the obtained results it was determined that the mixing and compaction temperatures increased with the increase of SBS content. Furthermore it was determined that the $G^*/\sin\delta$ which is a parameter of high temperature resistance increased with the increase of SBS content for both aged and unaged binders according to results of DSR test.

Keywords: Bitümen, SBS, rotational viscosimeter, dynamic shear rheometer, superpave.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karayolu ve havaalanı üstyapıları bir çok ülkede olduğu gibi ülkemizde de sıklıkla esnek üstyapı olarak projelendirilmekte ve uygulanmaktadır. Esnek üstyapılar alttan üste doğru alt temel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır. Ülkemizde kullanılan esnek kaplama çeşitleri; bitümlü sathi kaplama, soğuk karışım asfalt kaplama ve bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama olarak üçe ayrılmaktadır [1]. Esnek kaplamalar içerisinde en yüksek dayanımı, uygun miktarda bitüm ve uygun gradasyona sahip agreganın ısıtılıp karıştırılması sonucu elde edilen bitümlü sıcak karışımlar göstermektedir.

Bitümlü sıcak karışımlarda kohezyon, bitümlü bağlayıcı tarafından karşılanırken agrega ise karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcı, ayrıca agrega tanelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmasını önlemekte, oluşturdukları düzgün yüzeyler ile sürüş konforunu sağlamakta, kohezyonu ile karışımın stabilitesini arttırmakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcılar, BSK'larda ağırlıkça % 5-7 gibi düşük bir oranında kullanılmasına rağmen karışım performansı üzerinde çok büyük etkiye sahiptir [2].

Geçmişten bugüne bağlayıcıların özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli katkı maddeleri (modifiyerler) kullanılmakta, böylece kaplamanın daha uzun süre performansını koruyarak hizmet ömrünün artması sağlanmaktadır. Bu amaçla kullanılan katkı maddeleri amaca bağlı olarak çeşitlilik arz etmektedir. Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların ısıya ve trafik yüklerine karşı dayanımını arttırmak amacıyla genellikle bitüme polimer kökenli katkı maddeleri ilave edilmektedir. Bu katkı maddeleri içerisinde en çok Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Blok Kopolimerleri kullanılmaktadır. SBS modifiyeli bitümlerde modifikasyonun etkili şekilde oluşabilmesi; SBS konsantrasyonu ve yapısına, bitümün yapısına, karıştırma sıcaklığı ve süresi gibi birçok faktöre bağlıdır. Yapılan bir çok çalışma sonucunda SBS'nin karışımın düşük sıcaklıklarda çatlama, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımı arttırdığı belirlenmiştir [3-7].

Günümüzde bitümlü bağlayıcıların uygunluğu ve kullanılabilirliği, birçok Avrupa ülkesinde olduğu gibi Ülkemizde de TS 1081 EN 12591 standardına göre tespit edilmektedir. Bu standartta penetrasyon veya viskozite gibi sabit sıcaklıkta yapılan deneyler kullanılarak bağlayıcı kıvamları ve sınıfları belirlen-

mekte, uygulanan diğer standart bağlayıcı deneyleri (yumuşama noktası, Fraas kırılma noktası vb.) ile de kullanılabilirlikleri belirlenmektedir. Amerika'da bitümlü bağlayıcıları değişik sıcaklıklardaki performanslarına göre değerlendirmek, ayrıca uygulama bölgesi iklim ve coğrafi şartlarını dikkate alarak bağlayıcıların kullanılabilirliğini tespit etmek amacıyla Superpave adı altında bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistemde arazi şartlarını yansıtmakta yetersiz kalan bağlayıcı deneylerinin yerine, performansa dayalı deneyler kullanılmıştır. Sistemde bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyelerini belirlemek amacıyla dinamik kayma reometresi (DSR), düşük sıcaklık performans seviyelerini belirlemek amacıyla kırılganlık reometresi (BBR) ve direk çekme deneyleri (DTT), işlenebilirlik için dönel viskozimetre (RV) ve yaşlanma özellikleri için dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) yöntemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada saf bitüme üç farklı oranda (%2,0 – 4,0 ve 6,0) SBS ilave edilerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Dönel viskozimetre deneyi ile saf ve modifiye bağlayıcıların işlenebilirlikleri belirlenmiştir. Saf ve modifiye bitümler dönel ince film halinde ısıtma deney (RTFOT) yöntemi ile yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma işleminden önce ve sonra bitümlü bağlayıcılara dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi uygulanarak bağlayıcıların Superpave yöntemine göre yüksek sıcaklık performans seviyeleri belirlenmeye çalışılmıştır.

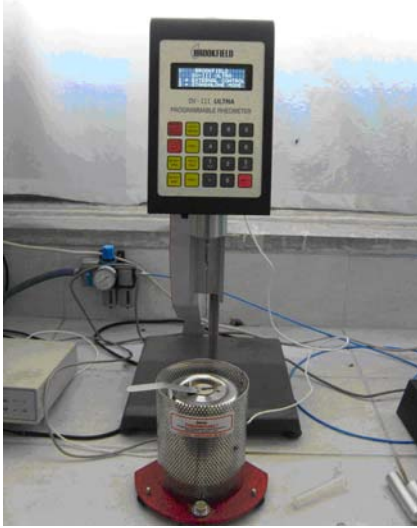
2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada TÜPRAŞ rafinerisinden elde edilen B 100/150 sınıfı bitüm ve Shell Bitümen şirketi tarafından üretilen ve Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Blok Kopolimer ihtiva eden KRATON D 1101 katkı maddesi kullanılmıştır. Katkı maddesi saf bitüme %2,0 – 4,0 ve 6,0 oranlarında ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi, 500 rpm. hıza sahip bir karıştırıcı ile 170°C sıcaklıkta saf bitüm ve katkı malzemesinin 90 dakika süreyle karıştırılması sonucu elde edilmiştir.

2.1. Dönel Viskozimetre ile Bağlayıcı İşlenebilirliklerinin Belirlenmesi (Determining the Workability of Binder with Rotational Viscosimeter)

Dönel viskozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak "Brookfield Viskozimetresi" kullanılmaktadır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri,

pompalama ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Deneyde, bağlayıcı içerisinde 20 rpm hızla dönen bir milin, dönmeye karşı gösterdiği direnç ile viskozite değerleri elde edilmektedir (Şekil 1). Orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C'deki viskozite değerlerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir [8,9].



Şekil 1. Brookfield viskozimetresi. (Brookfield viscosimeter)

Deney için bağlayıcıdan yaklaşık olarak 30 gr. numune alınmakta ve sıcaklığı 150°C'den daha düşük olan etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilmektedir. Bu malzemeden yaklaşık olarak 11 gr. numune bölmesine doldurulmakta, numune bölmesi sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilmektedir. Numune 15 dakika sabit sıcaklıkta bekletildikten sonra deney yapılmaktadır. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten itibaren üç adet okuma yapılmakta ve bu üç değer ortalamasından bağlayıcının viskozitesi elde edilmektedir.

Bitümlü sıcak karışımların (BSK) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla viskozite değerleri kullanılmaktadır. Bu amaçla 135°C ve 165°C sıcaklıklarda RV deneyi uygulanmaktadır. Çizilen sıcaklık-viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmektedir. BSK'ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 0,170 ± 20 Pa.s, sıkıştırılmasında ise 0,280 ± 30 Pa.s viskozite değerine sahip olması istenmektedir [8]. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır.

2.2. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Yöntemiyle Bağlayıcıların Kısa Süreli Yaşlandırılması (The Short-Term Aging of Binders by Rolling Thin Film Oven Test Method)

Karıştırma süresince bağlayıcının yaşlanması, laboratuarda RTFOT (dönel ince film halinde ısıtma

deneyi) ile simüle edilmektedir. Bu deneyde, asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın birleşik etkisi değerlendirilmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimi tespit etmek amacıyla gerekli malzeme elde edilebilmektedir. TS EN 12607-1'de belirtilen bu deney, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Dönel ince film halinde ısıtma deney aleti (Rolling thin film oven test device)

Deneyde, her bir şişeye 35 gram bitüm doldurulup düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişeleri tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır. Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek için, geri kalan altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmek için kullanılmaktadır. Kütle kaybı formül (1) kullanılarak belirlenmektedir. Denklemden M_1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M_2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir [10].

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = [(M_1 - M_2) / M_1] * 100 \quad (1)$$

2.3. Bağlayıcıların Performans Seviyelerinin Belirlenmesi (Determining the Performance Grades of Binders)

Bitümün aşırı sert olması durumunda kaplamada düşük sıcaklıklarda çatlama ve aşırı yumuşak olması durumunda ise yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu ve terleme gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu istenmeyen durumları ortadan kaldırmak maksadıyla bölge iklim şartlarına uygun bağlayıcılar tercih edilmesi gerekmektedir. Superpave sisteminde,

uygulama bölgesinin uzun süreli sıcaklık verilerinden faydalanılarak kaplama sıcaklıkları tespit edilmekte ve kaplama sıcaklıklarına bağlı olarak ta bağlayıcı sınıfı belirlenmektedir. Bu sistemde, bağlayıcı sınıfının yüksek ve düşük sıcaklık değerlerinde, bağlayıcıya performans deneyleri uygulanmakta ve elde edilen sonuçlar şartname limitleriyle karşılaştırılmaktadır.

Superpave sistemi bağlayıcı performans seviyelerinin belirlenmesinde, meteoroloji istasyonlarından elde edilen en az 20 yıllık veriler baz alınmaktadır. 20 yıllık süre içerisinde bölgede tespit edilen en yüksek 7 günlük hava sıcaklığı ortalamasından ($T_{maks.hava}$) faydalanılarak yüzeyden 20 mm derinlikteki en yüksek kaplama sıcaklığı (T_{maks}), en soğuk 1 günlük hava sıcaklığından ($T_{min.hava}$) faydalanılarak ta kaplama yüzeyindeki en düşük kaplama sıcaklığı ($T_{min.}$) tespit edilmektedir. Bu değerlerin bulunmasında bölgenin enlemi de (E) dikkate alınmaktadır. Kaplamanın en yüksek ve en düşük sıcaklık değerlerinin belirlenmesinde formül (2) ve formül (3) kullanılmaktadır [11]:

$$T_{maks.}(^{\circ}C) = (T_{maks.hava} - 0,00618 \times E^2 + 0,2289 \times E + 42,2) \times 0,9545 - 17,7 \quad (2)$$

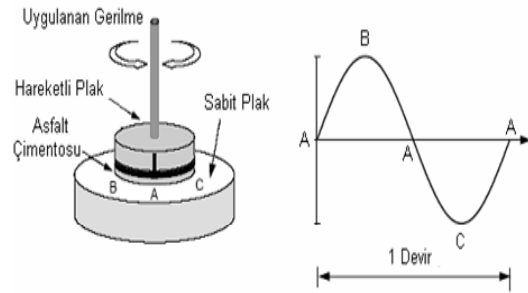
$$T_{min.}(^{\circ}C) = 0,859 \times T_{min.hava} + 1,17 \quad (3)$$

Uygulama bölgesi iklim şartları göz önünde bulundurularak tespit edilen en yüksek kaplama sıcaklığından daha yüksek olan sıcaklık sınıfı ve en düşük kaplama sıcaklığından daha düşük olan sıcaklık sınıfı alınarak bağlayıcı performans seviyesi tespit edilmektedir. Superpave sisteminde bağlayıcı türü iki değişkenli olarak PG X-Y şeklinde gösterilmektedir. Burada birinci değişken (X), bağlayıcının gerekli performans şartlarını sağladığı yüksek sıcaklık sınıfını, ikinci değişken (Y) ise bağlayıcının gerekli performans şartlarını sağladığı düşük sıcaklık sınıfını belirtmektedir. Kullanılması düşünülen bağlayıcıların tespit edilen bu sıcaklıklarda Superpave deneylerine tabi tutulmakta ve uygunlukları belirlenmektedir. Tablo 1’de Superpave bağlayıcı performans seviyeleri verilmiştir.

2.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi ile Bitümlü Bağlayıcıların Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin Belirlenmesi (Determining the High Temperature Performance Grade of Bituminous Binders by Dynamic Shear Rheometer (DSR))

Dinamik Kayma Reometresi deneyi, bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna ve normal sıcaklıklarda yorulmaya karşı dayanımını tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla işlem görmemiş (yaşlandırılmamış) ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken, bağlayıcıların yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla PAV (basıncılı yaşlandırma kabı) yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını tespit etmek için ise 8 mm çapında ve 2000 mikron yüksekliğindedir.

Bölge iklim şartlarına göre belirlenmiş deney sıcaklıklarında bağlayıcılar Şekil 3’te görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasında yerleştirilmektedir. Hareketli üst plaktaki A noktası, B noktasına gitmekte geri dönerek tekrar A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonra tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir/saniye’dir. Deneyde ortam şartlarını yansıtması amacıyla ön koşullandırma yapılmakta ve daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır [8,9].

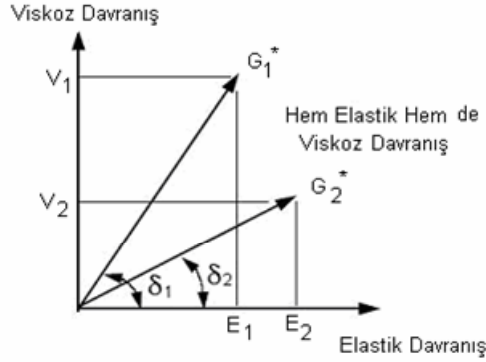


Şekil 3. DSR deneyinde deformasyon yönleri [8]. (The deformation directions at DSR test)

Tablo 1. Superpave bağlayıcı sınıfları (Superpave binder grades)

| 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 |

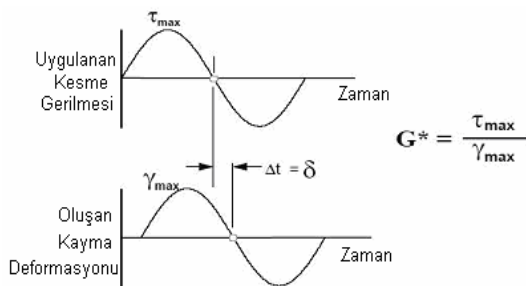
Dinamik kayma deneyi, asfalt çimentosunun kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir. G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı asfalt çimentosunun gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem G^* hem de δ değerleri asfalt çimentosunun sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir (Şekil 4) [8,9].



Şekil 4. Asfalt Çimentosunun visko-elastik özelliği [8]. (The viscoelastic properties of asphalt cement)

Visko-elastik davranışı ifade eden Şekil 4'te görüldüğü gibi yatay eksen elastik davranışı (yükleme hızı yüksek ve sıcaklık düşük) ifade ederken dikey eksen ise viskoz davranışı (yükleme hızı düşük ve sıcaklık yüksek) ifade etmektedir. Ancak normal kaplama ısı ve normal yükleme durumlarında asfalt çimentosu hem elastik hem de viskoz davranış sergilemektedir. Asfalt çimentosunun visko-elastik özelliğe sahip olması ve her bir asfalt çimentosunun birbirinden farklı olması nedeniyle 1 ve 2 numaralı asfaltların yük altındaki viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklı olmaktadır. Şekilden görüleceği gibi visko-elastik özellik hem G^* 'a hem de δ 'a bağlıdır. Bu nedenle asfalt çimentosunun visko-elastik özelliği, G^* ve δ birlikte göz önüne alınarak belirlenmelidir. Faz açısı (δ), uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman farkına (Δt) eşit olmaktadır. Faz açısı Şekil 5'te gösterilmiştir [8,9].

AASHTO T5 standardına uygun olarak yapılan bu deneyde yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım limitleri Tablo 2'de verilmiştir [8,9].



Şekil 5. Visko-elastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi [8,9]. (The stress-strain relation of viscoelastic materials)

Tablo 2. DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri [8,9]. (The specification limits according to binder type used in DSR test)

| Bağlayıcı Türü | Aranan Şart | Deney Amacı | Şartname Limitleri |
|----------------|------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Orijinal | $G^*/\sin\delta$ | Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım | Minimum 1,00 kPa |
| RTFOT | $G^*/\sin\delta$ | Yorulmaya karşı dayanım | Minimum 2,2 kPa. |
| PAV | $G^*\sin\delta$ | Yorulmaya karşı dayanım | Maksimum 5000 kPa |

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada saf ve modifiye bağlayıcılar, dönel viskozimetre deneyine tabi tutularak işlenebilirliği belirlenmiştir. Bağlayıcılar RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmıştır. Yaşlandırılmamış ve yaşlandırılmış bağlayıcılar DSR deneyine tabi tutularak tekerlek izi dayanımı parametresi olan yüksek sıcaklık performans seviyeleri belirlenmiştir. Ayrıca bağlayıcılarda kısa süreli yaşlanma sonucu oluşan kütle kayıpları belirlenmiştir.

3.1. Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları (Results of rotational viscosimeter test)

Saf ve modifiye bağlayıcılar 135 ve 165°C sıcaklıkta dönel viskozimetre deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyde 27 numaralı mil ve 20 rpm hız kullanılmıştır. Modifikasyon indisi değerleri modifiye bitümlün viskozite değerinin saf bağlayıcının viskozite değerine oranından elde edilmiştir. Uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar ve modifikasyon indisi ($\eta_{\text{modified}} / \eta_{\text{neat}}$) değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda (135 ve 165°C) belirlenen viskozite ve modifikasyon indisi değerlerinden SBS'nin bağlayıcıların sertliğini arttırdığı, yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirliğini ise azalttığı tespit edilmiştir.

Belirlenen viskozite değerleri viskozite-sıcaklık grafiğinde işaretlenerek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir (Şekil 6). Belirlenen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

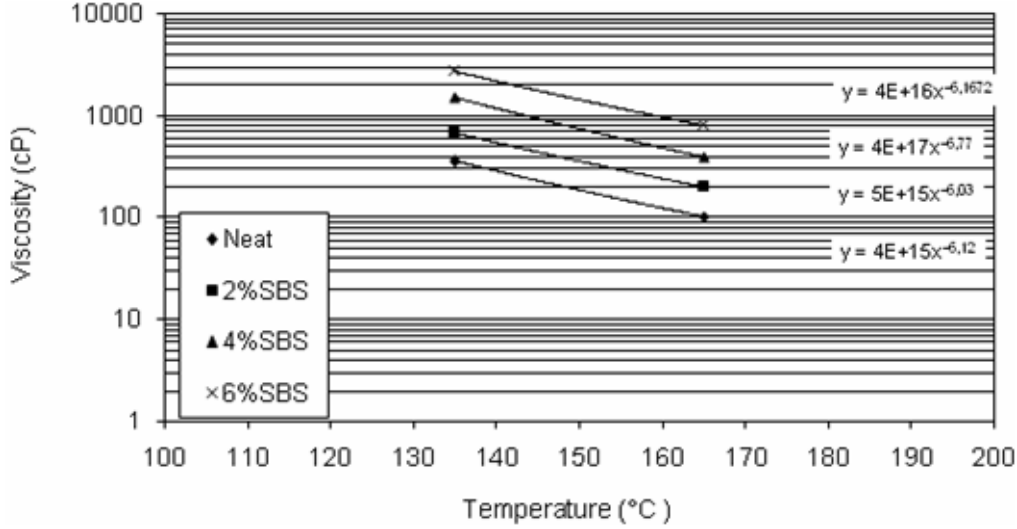
Elde edilen sonuçlardan, SBS oranı arttıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı değerlerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda 180°C'nin üstündeki sıcaklıklarda modifiye bağlayıcılarda

Tablo 4. SBS modifiyeli bitümlerde karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları (The mixing and compaction temperatures for SBS modified bitumens)

| Bağlayıcı Türü | Karıştırma Sıcaklığı Aralığı | Sıkıştırma Sıcaklığı Aralığı |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| B 100/150 | 151–157 | 138–144 |
| B 100/150 +2% SBS | 168–174 | 155–161 |
| B 100/150 +4% SBS | 182–187 | 171–176 |
| B 100/150 +6% SBS | 200–206 | 188–193 |

Tablo 3. Dönel viskozimetre deney sonuçları (Results of rotational viscosimeter test)

| Bağlayıcı Cinsi | Viskozite (cP) | | $\eta_{\text{modified}} / \eta_{\text{neat}}$ | |
|---------------------|----------------|--------|---|-------|
| | 135°C | 165°C | 135°C | 165°C |
| B 100/150 | 350 | 106,25 | 1.00 | 1.00 |
| B 100/150+ %2 SBS | 675 | 212,5 | 1.93 | 2.00 |
| B 100/150+ %4,0 SBS | 1494 | 400 | 4.27 | 3.76 |
| B 100/150+ %6,0 SBS | 2719 | 793,75 | 7.77 | 7.47 |

**Şekil 6.** SBS modifiyeli bitümlerde viskozite-sıcaklık ilişkisi (The viscosity-temperature relation for SBS modified bitumen)

ayırışma olabileceği belirlenmiştir. Bu nedenle modifiye bağlayıcılarda karıştırma ve sıkıştırma sırasında sıcaklığın 180°C'nin üzerine çıkmaması tavsiye edilmektedir [12]. Deney sonuçlarından %4 SBS modifiyeli bağlayıcının karıştırma, %6 SBS modifiyeli bağlayıcının ise hem karıştırma hem de sıkıştırma sıcaklığının bu değerlerin üstünde olduğu tespit edilmiştir.

3.2. RTFOT Yöntemiyle Yaşlandırılmış Bağlayıcıların Kütle Kayıplarının Belirlenmesi (Determining the Mass Loss of Binders Aged with RTFOT Method)

Bitümlü bağlayıcılarda oluşan kısa süreli yaşlanmayı laboratuvar ortamına taşımak amacıyla RTFOT yöntemi kullanılmıştır. Deneyde kullanılan 8 şişeden 2'si kütle kaybının tespitinde 6'sı ise deneylerde kullanılacak malzemelerin temininde kullanılmıştır. Formül (1) kullanılarak kütle kaybı belirlenmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcılarda meydana gelen kütle kaybı değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, SBS oranı arttıkça kütle kayıplarının azaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 5. Bağlayıcılarda kısa süreli yaşlanma sonrası meydana gelen kütle kayıpları (The mass loss of binders after short-term aging processes)

| Bağlayıcı Türü | Kütle Kaybı |
|-------------------|-------------|
| B 100/150 | 0,53 |
| B 100/150 +2% SBS | 0,48 |
| B 100/150 +4% SBS | 0,46 |
| B 100/150 +6% SBS | 0,39 |

3.3. Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları (The Results of Dynamic Shear Rheometer Test)

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyi Bohlin DSR II aleti kullanılarak yapılmıştır. Deney gerilme kontrollü olarak yapılmış olup yaşlandırılmamış bağlayıcılara 120 Pa, RTFOT yöntemi ile yaşlandırılmış bağlayıcılara 220 Pa sabit gerilme uygulanmıştır. Deneyde 25 mm. çapında paralel plaklar ve 1000 mikron numune kalınlığı kullanılmıştır. Bütün yaşlandırılmamış bağlayıcılar 52–82°C sıcaklık aralığında 6°C artışla deneye tabi tutulmuştur. Yaşlandırılmamış bağlayıcılara uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.

Yaşlandırılmamış bağlayıcıların şartname kriterini (1000 Pa) en son sağlayabildiği sıcaklık değerlerinde RTFOT yöntemiyle yaşlandırılan bağlayıcılar DSR deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar şartname kriteriyle (2200 Pa) karşılaştırılmıştır (Tablo 7). Bağlayıcıların her iki şartname kriterini sağladığı sıcaklık değeri tekerlek izi dayanım parametresi bakımından, yüksek sıcaklık performans seviyesi olarak seçilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan, SHRP şartlarına göre tekerlek izi dayanım parametresi olan $G^*/\sin \delta$ şartlarını (yaşlandırılmamış numuneler için minimum 1000 Pa, yaşlandırılmış bağlayıcılar için 2200 Pa) saf bağlayıcının 64°C'de, %2 ve %4 SBS içeren bağlayıcıların 70°C'de ve %6 SBS içeren bağlayıcının 82°C sıcaklıkta sağladığı belirlenmiştir. Bu verilere dayanılarak SHRP şartnamesine göre tekerlek izi

Tablo 6. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR deney sonuçları (The DSR test results of unaged binders)

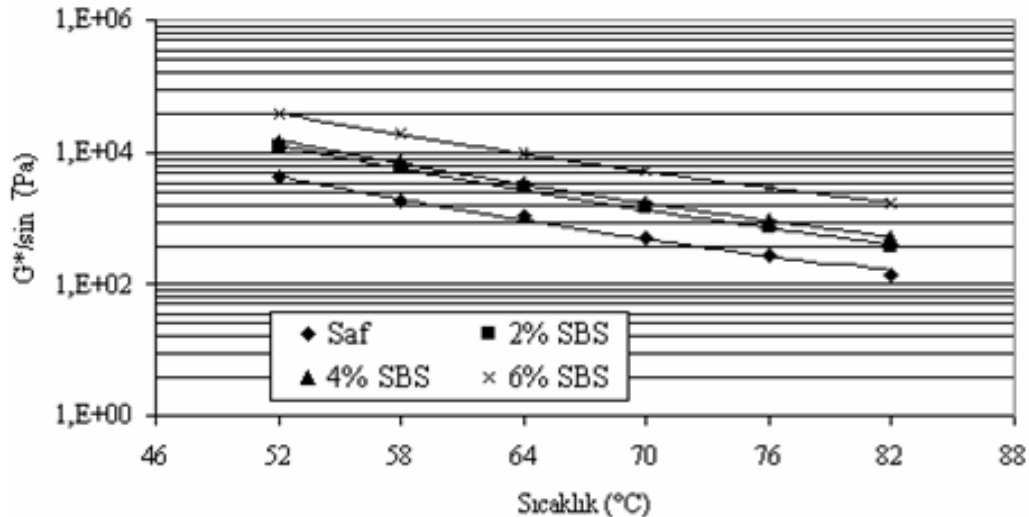
| | | Sıcaklık (°C) | | | | | |
|------------------------|-------------------------|---------------|---------|----------------|----------------|---------|----------------|
| | | 52 | 58 | 64 | 70 | 76 | 82 |
| B 100/150 | G*, Pa | 4231,71 | 1868,62 | 1070,10 | 527,476 | 279,119 | 149,294 |
| | Faz Açısı, δ , ° | 78,43 | 80,64 | 82,38 | 83,02 | 83,90 | 86,97 |
| | G*/sin δ , Pa | 4319,48 | 1893,84 | 1079,63 | 531,415 | 280,708 | 149,503 |
| B 100/150 + % 2 SBS | G*, Pa | 11567,5 | 5545,91 | 2821,27 | 1453,98 | 740,032 | 382,619 |
| | Faz Açısı, δ , ° | 68,90 | 72,85 | 76,24 | 78,80 | 80,51 | 81,62 |
| | G*/sin δ , Pa | 12398,8 | 5803,98 | 2904,63 | 1482,21 | 750,300 | 386,748 |
| B 100/150 + % 4 SBS | G*, Pa | 13495,1 | 6738,98 | 3382,61 | 1765,59 | 948,318 | 516,121 |
| | Faz Açısı, δ , ° | 66,93 | 70,86 | 74,31 | 76,80 | 78,57 | 79,67 |
| | G*/sin δ , Pa | 14668,2 | 7133,31 | 3513,53 | 1813,50 | 967,51 | 524,625 |
| B 100/150 + % 6 SBS | G*, Pa | 31575,7 | 16941,4 | 9026,41 | 4879,94 | 2796,29 | 1660,4 |
| | Faz Açısı, δ , ° | 56,71 | 60,63 | 64,57 | 67,44 | 69,47 | 70,89 |
| | G*/sin δ , Pa | 37774,4 | 19440,0 | 9994,80 | 5284,30 | 2985,93 | 1757,24 |

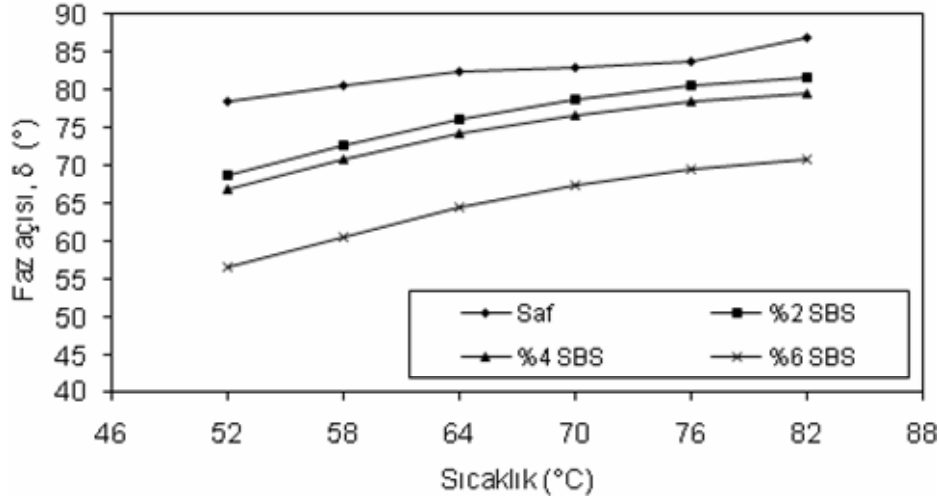
Tablo 7. Yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları (The DSR test results of aged binders)

| Sıcaklık, °C | G*, Pa | Faz Açısı, δ , ° | G*/sin δ , Pa | Şartname Limiti, Pa |
|-----------------------------|---------|-------------------------|----------------------|---------------------|
| B 100/150 | | | | |
| 64 | 5115,29 | 74,82 | 5300,23 | min.2200 |
| B 100/150+ % 2,0 SBS | | | | |
| 70 | 9562,84 | 65,00 | 10551,43 | min.2200 |
| B 100/150+ % 4,0 SBS | | | | |
| 70 | 11683,7 | 63,42 | 13064,48 | min.2200 |
| B 100/150+ % 6,0 SBS | | | | |
| 82 | 6216,22 | 65,84 | 6813,00 | min.2200 |

dayanım parametresi bakımından saf bağlayıcının performans seviyesi PG 64, %2 ve %4 SBS içeren bağlayıcıların performans seviyeleri PG 70 ve %6 SBS içeren bağlayıcının performans seviyesi PG 82 olarak belirlenmiştir. Şartnameye göre en yüksek bağlayıcı sınıfı PG 82 olduğundan %6 SBS içeren

bağlayıcı, en son bu sıcaklıkta denenmiştir. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların G*/sin δ ve faz açısı (δ) değerlerinde sıcaklıkla meydana gelen değişim Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.

**Şekil 7.** Bağlayıcıların G*/sin δ değerinin sıcaklıkla değişimi (The variation of G*/sin δ value of binders with temperature)



Şekil 8. Bağlayıcıların faz açısının sıcaklıkla değişimi (The variation of binders's phase angle with temperature)

Şekil 7'de görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça $G^*/\sin\delta$ değeri düşmüştür. Ayrıca bütün sıcaklıklarda tekerlek izi dayanım parametresi olan $G^*/\sin\delta$, bağlayıcılardaki SBS içeriği ile artmıştır. Yaşlandırılmamış bağlayıcılar için tekerlek izi dayanım parametresi sınır değeri (1000 Pa) SBS içeriği arttıkça daha yüksek bir sıcaklık değerine tekabül etmiştir. Yaşlandırılmamış bağlayıcılar için sınır değere karşılık gelen sıcaklıklar Tablo 8'de verilmiştir. Bağlayıcılardaki SBS içeriği arttıkça yaşlandırılmamış bağlayıcıların tekerlek izi dayanım sınır şartının sağlandığı sıcaklık değeri artmıştır.

DSR deneyinden elde edilen faz açısı değeri, bağlayıcının elastikiyetinin bir göstergesidir. Faz açısı değerinin düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlardan sıcaklık değeri arttıkça faz açısının da arttığı dolayısıyla bağlayıcının elastikiyetinin azaldığı belirlenmiştir. Bağlayıcılardaki SBS içeriğinin artması sonucu bütün sıcaklıklarda faz açısı düşmüştür. Dolayısıyla SBS, bağlayıcıların elastik özelliğini arttırmıştır. %2 ve %4 SBS içeriklerinde faz açısında meydana gelen azalmaya nazaran %6 SBS içeriğinde, bağlayıcının faz açısı değerinde bariz bir azalma meydana gelmiştir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bağlayıcıların performanslarına göre değerlendirildiği Superpave sisteminde tekerlek izine karşı dayanımı belirlemek amacıyla dinamik kayma Reometresi (DSR) ve işlenebilirliğini tespit etmek amacıyla dönel viskozimetre (RV) deneyleri kullanılmaktadır. RV deney sonuçlarından, SBS oranı arttıkça bağlayıcı rijitliklerinin arttığı dolayısıyla işlenebilirliğin

azaldığı belirlenmiştir. Buna rağmen %6 SBS kullanılması durumunda dahi RV deneyi için sınır değer olan 3000 cP değerinin aşılmadığı bu nedenle bütün bağlayıcıların işlenebilirlik açısından uygun olduğu tespit edilmiştir. DSR sonuçlarından artan SBS içeriği ile tekerlek izine karşı dayanımın arttığı belirlenmiştir. Yaşlandırılmadan önce ve sonra saf bitümün 64°C'de, %2 ve %4 SBS içeren bağlayıcının 70°C'de ve %6 SBS içeren modifiye bitümün 82°C sıcaklıkta Superpave şartnamelerini sağladığı tespit edilmiştir. %2 ve %4 SBS içeren bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansları aynı çıkmasına karşın %4 SBS içeren bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değeri %2 SBS modifiyeli bağlayıcının sahip olduğu değerden yüksek çıkmıştır. Faz açısı değerlerinden, sıcaklık artışı ile faz açısının arttığı, bağlayıcılardaki SBS oranının artmasıyla ise düştüğü belirlenmiştir. Bu sonuçlardan sıcaklık artışı ile bağlayıcıların daha fazla viskoz özellik göstereceği, SBS kullanılması sonucu ise yüksek sıcaklıklarda daha fazla elastik davranış gösterecekleri söylenebilmektedir. Sonuç olarak bitüm modifikasyonunda SBS kullanılması durumunda işlenebilirlik açısından bitümün pompalanması ve agregayla karıştırılması sırasında daha fazla enerji ve süre gerekse dahi tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım ve yüksek sıcaklıklarda elastiklik bakımından avantaj sağlanacağı düşünülmektedir. Ülkemiz açısından değerlendirildiği takdirde tekerlek izi oluşumunun başlıca problem olduğu özellikle sıcak iklimli bölgelerde SBS kullanımı bağlayıcıdan kaynaklanan bozulmaların engellenmesine yardımcı olacak dolayısıyla maliyeti yüksek bakım yada yeniden yapımların geciktirilmesini sağlayabilecektir.

Tablo 8. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ sınırındaki sıcaklık değerleri (Temperature of unaged binders at the limit of $G^*/\sin\delta$)

| Bağlayıcı Türü | B 100/150 | B 100/150+ %2 SBS | B 100/150+ %4 SBS | B 100/150+ %6 SBS |
|--|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1000 Pa değerine karşılık gelen sıcaklık, °C | 65 | 74 | 75 | 86 |

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. <http://www.kgm.gov.tr/fr5.asp?tt=0009>
2. Tunç, A., **Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı**, Asil Yayın Dağıtım, 352 s, 2004.
3. Lu, X., Isacson, U., “Laboratory Study on the Low Temperature Physical Hardening of Conventional and Polymer Modified Bitumens”, **Constr Build Mater**, 14, 79-88, 2000.
4. Navarro, F.J., Partal, P., Martinez-Boza, F., Valencia, C. And Gallegos, C., “Rheological Characteristics of Ground Tire Rubber-Modified Bitumens”, **Chemical Engineering Journal**, 89, 53-61, 2002.
5. Airey, G. D., “Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens”, **Fuel**, Volume 82, Issue 14, 1709-1719, 2002.
6. Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L. and Rollings, R., “Effect of Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer on Fatigue Crack Propagation Behavior of Asphalt Concrete Mixtures”, **Transportation Research Record**, 1417, 178-186, 1993.
7. Khattak, M. J. and Baladi, G. Y., “Engineering Properties of Polymer – Modified Asphalt Mixtures”, **Transportation Research Record**, 1638, 12-22, 1998.
8. Zaniewski, J. P., Pumphrey, M. E., “Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol”, **Asphalt Technology Program**, p. 107, 2004.
9. McGennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U., 1994, “Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods”, **No. FHWA-SA-94-069**, p. 104, 1994.
10. [TS EN 12607-1, “Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar – Sıcaklık ve havanın etkisiyle sertleşmeye karşı direncin tayini – Bölüm 1: RTFOT (Etüvde hareket halinde ince film deneyi) yöntemi”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara. 12 s, 2003.
11. Yang H., “**Pavement Analysis And Design**”, Pearson Education, New Jersey, U.S.A, 1993.
12. Cortizo MS, Larsen DO, Bianchetto H, Alessandrini JL., “Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts”, **Polym Degrad Stab**, 86(2), 275–282, 2004.