

## Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına etkisi

**Burak ŞENGÖZ\*, Emine AĞAR**

*İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul*

### Özet

*Trafik hacmindeki ve dingil yüklerindeki artışlar ve üretim hataları, yollardan beklenen performansı ve hizmet ömrünü düşürmekte, tekerlek izi oluşumu, yorulma ve düşük sıcaklık çatlakları gibi bozulmalara sebep olmaktadır. Kaplamanın öngörülen ömür ve konfor düzeyinin sağlanması, büyük ölçüde karışımlarda kullanılan bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır. Bu özelliklerin en önemlilerinden biri yaşlanmadır. Yaşlanma, özellikle oksidasyon nedeni ile asfaltın sertleşmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, bitümlü karışımlarda yaşlanma üzerinde asfalt film kalınlığının etkisini incelemek üzere kısa (135°C, 4 saat) ve uzun dönem (85°C, 120 saat) yaşlandırılmış numuneler üzerine esneklik modülü deneyi uygulanmıştır. Esneklik modülü model eğrileri film kalınlığına bağlı olarak incelendiğinde yaşlanmaya ilişkin optimum asfalt film kalınlığının 9-10µ aralığında değiştiği görülmüştür.*

**Anahtar Kelimeler:** *Asfalt film kalınlığı, bozulmalar, oksitlenme, yaşlanma.*

### The effect of asphalt film thickness on the aging of hot mix asphalt

#### Abstract

*The increase in the level of living conditions and social and economic development during the last three decades increased the demand for safe and comfortable pavements with a higher driving quality. It is obvious that this demand can only be satisfied with pavement design procedures aiming pavements resistant to deformations with longer service life. Nevertheless the commonly encountered distresses such as rutting, fatigue and low temperature cracking occurring in pavements due to increase in axle loads, heavy traffic decrease the expected performance and service life of the roads which is related to the aging property of the asphalt binder. Aging phenomenon, which is the primary factor for contributing to the above mentioned failures, is defined as the hardening of asphalt binder due to volatilization and oxidation. This study is aimed at determining the relationship between the asphalt film thickness and the short-term (aging of asphalt binder during mixing with aggregate, transportation to job-site, compaction) and long-term (during service life of the road) aging characteristics of hot mix asphalt. Resilient modulus test is conducted on the compacted specimens using Superpave Gyratory Compactor in order to obtain optimum film thickness for satisfactory mix durability. From the figures plotted between asphalt film thickness and resilient modulus of the aged samples, accepted quadratic functions and an optimum asphalt film thickness of 9-10µ is obtained.*

**Keywords:** *Aging, asphalt film thickness, failures, oxidation.*

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Burak ŞENGÖZ. burak.sengoz@deu.edu.tr; Tel: (232) 453 10 08.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış "Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına ve suya duyarlılığına etkisi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 02.10.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 23.10.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.06.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Ekonomik kalkınma ve yaşam standartlarının yükselmesi ile toplumların konforlu, güvenli sürüş kalitesi talebi, yol üstyapılarının daha yüksek performanslı ve bozulmalara karşı daha dirençli olarak tasarlanmasını zorunlu hale getirmektedir. Trafik hacmindeki ve dingil yüklerindeki artışlar, üretim hataları ve iklim koşulları, yollarda tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık çatlakları ve suya karşı duyarlılık gibi bozulmalara sebep olmakta, bu durum da yolun öngörülen ömür ve konfor düzeyini düşürmektedir. Yollardan beklenen hizmet düzeyi de büyük ölçüde yol üstyapılarında kullanılan bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır. Bu özelliklerin en önemlilerinden biri yaşlanmadır. Yaşlanma, kaplamanın yapımı sırasında bağlayıcının hafif bileşenlerinin buharlaşması ve oksidasyonudur. Oksidasyon, yolun servis ömrü boyunca da devam etmektedir. Her iki durum da, bağlayıcının viskozitesinin artmasına, penetrasyon değerinin düşmesine ve karışımın sertleşmesine neden olmaktadır (Vallegra, 1981). Araştırmacılar, bitümlü bağlayıcının yaşlanma özelliğinin bozulma sınıfları içinde değerlendirilmesinin, bozulma karakterleri hakkında bilgilere katkıda bulunacağını belirtmektedirler.

Bu çalışmada, asfalt film kalınlığının ve hava boşluk oranının, bitümlü sıcak karışımların, kısa dönem (karıştırma, taşıma ve sıkıştırma sırasında) ve uzun dönem (servis ömrü boyunca) yaşlanma özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve optimum asfalt film kalınlığı saptanmıştır.

## Yaşlanma

Bitümlü bağlayıcının asfalt kaplama performansını doğrudan etkileyen en önemli özelliği dayanıklılığıdır. Bitümlü bağlayıcının dayanıklılığı sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Bitümlü bağlayıcının çeşitli nedenlerden dolayı sertleşmesi ve kırılğan hale gelmesine de “yaşlanma” veya “zamana bağlı yaşlanma” denilmektedir (Bell vd., 1994). Yapılan ayrıntılı çalışmalar yaşlanmanın iki aşamada oluştuğunu göstermektedir:

- 1-Kısa dönem yaşlanma
- 2-Uzun dönem yaşlanma

Kısa dönem yaşlanma, sıcak karışımın depolanma, plente taşınma, plente karıştırılma, şantiyeye taşınma, serilme ve sıkıştırılma işlemleri sırasında; uzun dönem yaşlanma ise, yolun servis ömrü boyunca oluşmaktadır.

## Yaşlanmayı etkileyen faktörler

Bitümlü bağlayıcının zamanla sertleşmesine ve giderek özelliklerini kaybetmesinde etkili faktörler ilk kez Dow (1903) tarafından ortaya atılmıştır. Yapılan çalışmada, sıcak karışımın geri kazanılan bitümlü bağlayıcının ağırlık ve penetrasyon özellikleri incelenmiştir. Traxler (1961), bağlayıcının yaşlanma özelliklerini etkileyen faktörleri dört sınıfta incelemiştir. Bunlar:

- 1-Oksidasyon,
- 2-Buharlaşma veya uçucu madde kaybı,
- 3-Polimerizasyon (aktif ışığa bağlı),
- 4-Yoğunlaşma polimerizasyon (ısıya bağlı),

Traxler, yukarıda sayılan etkilerin zaman içinde değiştiğini belirtmiştir.

Yukarıda sayılan faktörlerin en önemlileri oksidasyon ve buharlaşmadır. Bu iki faktör bağlayıcının yapısındaki kimyasal değişiklik nedeni ile oluşmaktadır. Diğer faktörler ise sadece fiziksel nedenlere bağlıdır. Fiziksel yaşlanmaya maruz kalmış bağlayıcılar orijinal viskozite değerine kadar ısıtılacak olursa yaşlanma büyük ölçüde giderilmekte ancak oksidasyon sertleşmesi kesinlikle giderilememektedir.

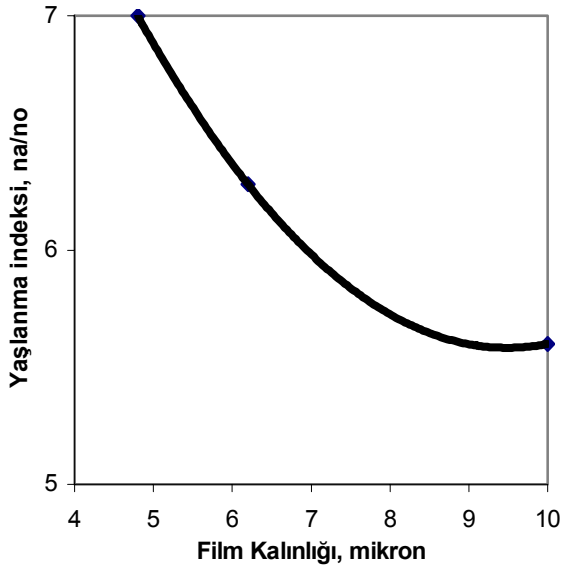
## Kaplama yapımının değişik aşamalarında bitümlü bağlayıcı yaşlanması

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan bitümlü bağlayıcı, rafineriden çıkışından yol üzerinde hizmete başlayıncaya kadar yapılan işlemlerde önemli derecede oksidasyona uğramaktadır. Bu durum bağlayıcının reolojik davranışını, performansını ve dayanıklılığını büyük ölçüde etkilemektedir. Bitümlü bağlayıcının kaplama yapımının değişik aşamalarında gösterdiği özellikler aşağıda sıralanmıştır.

*Depolanma sırasındaki bitümlü bağlayıcı yaşlanması-* Bağlayıcı tank içinde yüksek sıcaklıkta ve büyük bir kütle halinde iken çok az bir

oksidasyon oluşmaktadır. Bu durum, oksijene maruz kalan asfalt yüzeyinin tüm kütleyle oranla çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak bağlayıcı tank üstündeki taşıyıcı borudan geçip, bağlayıcı yüzeyine belli bir mesafeden düştüğünde önemli miktarda oksidasyon meydana gelmektedir. Bunun sebebi, bir borudan tanka düşen asfaltın yüzey alanının daha geniş olması sebebi ile oksijenin asfaltla kolayca reaksiyona girebilmesidir (The Shell Bitumen Handbook, 1990).

*Agrega ile karıştırma sırasındaki bitümlü bağlayıcı yaşlanması-* Karıştırma işlemi sırasında tüm agrega daneleri ve filler, kalınlığı 5 ile 15µ arasında değişen bağlayıcı filmi ile kaplanmaktadır. Bu durumda, karıştırıcı (mikser) içindeki karışım, oksidasyon ve buharlaşmadan kaynaklanan yaşlanmaya oldukça duyarlıdır. Karışımlar için uygun bir bağlayıcı seçiminde karıştırma sırasındaki yaşlanma gözönüne alınmaktadır. Agrega ile karıştırma işlemi sırasındaki yaşlanma, sıcaklık, karıştırma süresi, bağlayıcı yüzdesi ve film kalınlığı gibi birçok faktöre bağlıdır (The Shell Bitumen Handbook, 1990). Şekil 1’de film kalınlığına bağlı olarak yaşlanma indeksi değeri verilmektedir. Yaşlanma indeksi, yaşlanmış bağlayıcının viskozitesinin ( $\eta_a$ ), orijinal bağlayıcının viskozitesine oranıdır ( $\eta_o$ ).



Şekil 1. Film kalınlığının yaşlanma indeksi üzerindeki etkisi (Griffin vd., 1955)

$$\text{Yaşlanma İndeksi} = \frac{\eta_a}{\eta_o} \quad (1)$$

Şekilden de görüleceği gibi agrega danelerini saran film kalınlığı azaldıkça yaşlanma indeksi artmaktadır (Griffin vd., 1955).

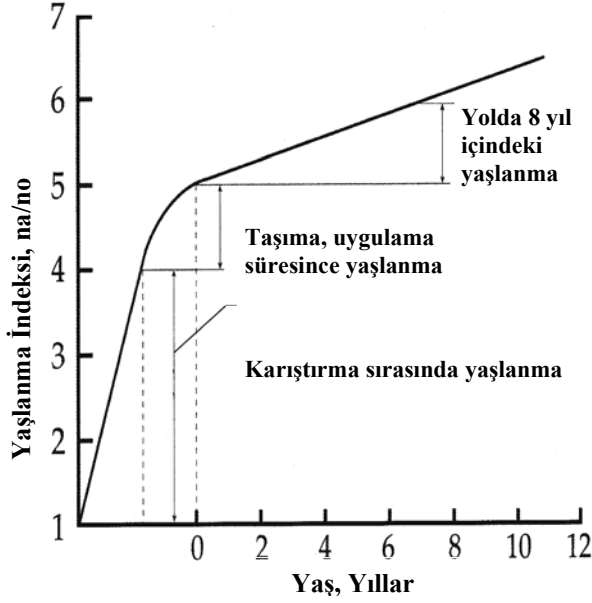
*Sıcak karışımın depolanması, taşınması ve serilmesi sırasındaki bitümlü bağlayıcı yaşlanması-* Karışımın depolanması sırasında meydana gelen yaşlanma karışımın sıcaklığına, film kalınlığına ve oksijene maruz kalma süresine bağlıdır. Karışımların depolanması için kullanılan siloların yükleme ve boşaltma kapaklarının hava geçirmez olması gereklidir.

Aksi halde, silo bir baca gibi çalışarak içinden sürekli hava geçirir, bunun sonucunda da malzeme oksitlenir ve soğur.

*Servis ömrü boyunca bitümlü bağlayıcı yaşlanması-* Şekil 2’de bitümlü bağlayıcının yıllara bağlı yaşlanma indeksi değerleri görülmektedir. Kısa dönem yaşlanma süresince oksidasyonun yaklaşık %70’inin meydana geldiği; uzun dönem yaşlanma süresince de oksidasyonun yavaşlayarak 8 yılda yalnızca %30 civarında gerçekleştiği görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi hızlı yaşlanma karışımın hazırlanması, serilmesi ve sıkıştırılması sırasında meydana gelmekte, bu süreç yolda düşük sıcaklıklarda yavaşlamaktadır. Servis ömrü boyunca meydana gelen yaşlanma, karışımın sıkıştırılma derecesi (hava boşluk oranı), geçirgenliği ve agrega danelerini saran bağlayıcı film kalınlığı gibi faktörlere bağlıdır.

### Bitümlü sıcak karışımların yaşlanmasında etkili karışım parametreleri

Bitümlü sıcak karışımlarda yüksek hava boşluğu oranı, yüksek hava geçirgenliği ve agrega danelerini saran bağlayıcı filminin inceliği, kaplamanın dayanıklılığını azaltan yaşlanmanın en önemli nedenlerindedir. Karışımın yaşlanmasına etki eden parametrelerden biri olan hava boşluk oranına ilişkin ilk çalışmalar Heithaus ve Johnson (1958) tarafından yapılmıştır. Uygulanan deneyler, hava boşluğu oranının artışı ile yaşlanmanın arttığını göstermiştir.



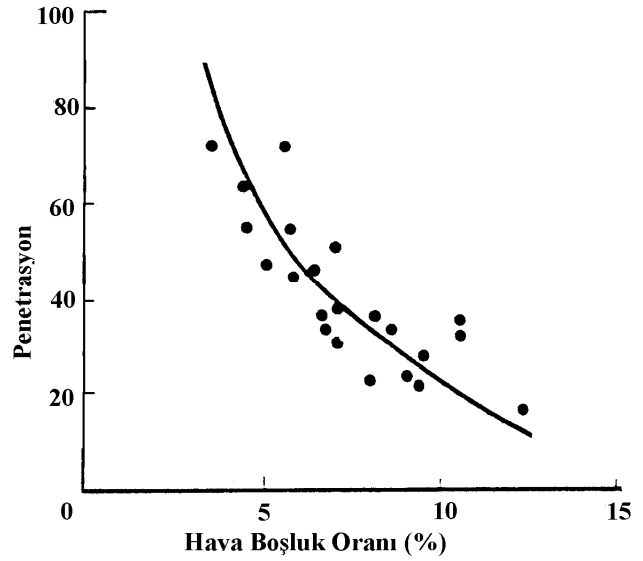
Şekil 2. Agrega ile karıştırmadan itibaren göreceli viskozite artışı (The Shell Bitumen Handbook, 1990)

Campen ve diğerleri (1959), yoğun gradasyonlu karışımlarda bağlayıcı film kalınlığı ile karışımın stabilite değerleri arasında ilişki kurmuşlardır. Kalın bağlayıcı filmi içeren karışımların daha esnek ve dayanıklı oldukları; buna karşılık ince bağlayıcı filmi içeren karışımların daha gevrek, kırılğan oldukları ve yolun servis ömrünü düşürdükleri yaptıkları çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır. Deney sonuçlarına göre ortalama 6-8 $\mu$  film kalınlığı içeren sıcak karışımların ideal karışımlar olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, film kalınlığının, agreganın yüzey alanı artışı ile azaldığını ve aralarında doğrusal ilişki bulunmamakla birlikte gerekli bağlayıcı içeriğinin de yüzey alanı ile arttığını bulmuşlardır.

Lubbers (1985), %3 ile %12 hava boşluk oranına sahip karışımlardan geri kazanılan bağlayıcı penetrasyonu ile hava boşluk oranı arasında ilişki kurmuş, hava boşluk yüzdesinin artışı ile penetrasyonun düştüğü başka bir deyişle, yaşlanma etkisinin arttığı sonucuna varmıştır (Şekil 3).

Hava geçirgenliğinin yaşlanma üzerinde etkisine ilişkin çalışmalara kaynaklarda sık rastlanmamaktadır. Kaplama içinden geçen havanın akma hızının yaşlanmayı arttırdığına, düşük

geçirgenliğin bitümlü tabakayı, buna bağlı olarak da alt tabakaları koruduğuna inanılmaktadır (Kumar ve Goetz, 1977).



Şekil 3. Hava boşluk oranının yaşlanma üzerindeki etkisi (Lubbers, 1985)

Kandhal ve Chakraborty (1996), bağlayıcı film kalınlığının karışımların kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlar, yüksek hava boşluk oranına ( $8 \pm 1$ ) ve değişik asfalt film kalınlıklarına sahip numuneler üzerine esneklik modülü deneyi, ayrıca geri kazanılan bağlayıcı üzerine viskozite deneyleri uygulamışlardır. Araştırmacılar, esneklik modülü model eğrilerini film kalınlığına bağlı olarak incelemişler ve 9-10 $\mu$  film kalınlıklarının bir özellik taşıdığı; eğrinin 9-10 $\mu$ 'nun altındaki kalınlıklarda dikleştiği, başka bir deyişle, yaşlanma etkisinin arttığı, 9-10 $\mu$ 'nun üstündeki kalınlıklarda yatıklaştığı, başka bir deyişle, yaşlanmanın etkilerinin azaldığı sonucuna varmışlardır. Yukarıda belirtilen çalışmalar, bağlayıcı film kalınlığının karışımların yaşlanma özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Film kalınlığı, karışım içindeki bağlayıcı içeriği ile ilişkilidir ve bu kalınlığın optimum değerinin saptanması son derece önemlidir. Çünkü film kalınlığının gerekenden fazla olması, kaplamanın deformasyon direncini azaltacak; film kalınlığı gerekenden az ise, kaplama kırılğan olacaktır.

## Deneysel çalışmalar

### Agrega ve uygulanan deneyler

Deneysel çalışmalarda kullanılan agreganın özelliklerini belirlemek amacı agrega grupları üzerine ilk olarak özgül ağırlık, Los Angeles aşınma, sağlamlık, kum eşdeğerlik, köşelilik, kırılma oranı ve yassılık indeksi deneyleri uygulandıktan sonra elek analizi işlemine geçilmiş ve uygun gradasyon saptanmıştır. Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) karışımlarında agrega cinsi olarak Redland Genstar firmasına ait Frederick Taşocağı'ndan temin edilen kireçtaşı kullanılmış olup, agregalar 7#, 8#, 10# ve yıkanmış 10# olmak üzere dört gruba ayrılmıştır. Agrega grupları üzerine uygulanan deneylerin sonuçları, yararlanılan şartname ve sınır değerleri Tablo 1'de verilmektedir. Deneylerden elde edilen tüm sonuçlar Superpave'in öngördüğü şartname koşullarını sağlamaktadır.

Agrega özelliklerinin belirlenmesine ilişkin deneyler uygulandıktan sonra agrega grupları üzerine elek analizi deneyi uygulanmış ve 12.5 mm nominal maksimum dane boyutu için, Superpave'in öngördüğü kontrol noktaları ve yasak bölge dikkate alınarak karışım oranları belirlenmiştir. Bu oranlar sırası ile 7#, 8#, 10# ve yıkanmış 10# için %28, %15, %17 ve %40'tır. Tablo 2'de belirlenen oranlar kullanılarak hazırlanan sıcak karışımlara ilişkin gradasyon değerleri verilmektedir.

### Bitümlü bağlayıcı ve uygulanan deneyler

Bitümlü bağlayıcı olarak CITGO Refinig Company-Poulsboro'dan temin edilmiş PG 64-22 performans dereceli (performance graded) modifiye edilmemiş bağlayıcı kullanılmıştır.

Orijinal bağlayıcı üzerinde özgül ağırlık ve dönel viskozite deneylerinden sonra, Superpave karışım tasarımında gerekli görüldüğü üzere, kısa dönem yaşlanma ve uzun dönem yaşlanma deneyleri ile hem orijinal bağlayıcı hem de RTFO (döner ince film halinde etüv deneyi) ve PAV (basınçlı oksidasyon kabı deneyi) kalıntısı üzerine Dinamik Kesme ve Asfalt Kiriş Eğilme deneyleri uygulanmıştır. Tablo 3'te bitümlü bağlayıcı üzerine uygulanan deneylerin sonuçları verilmektedir. Deneylerden elde edilen tüm sonuçlar Superpave'in öngördüğü şartname koşullarını sağlamaktadır.

### Bitümlü sıcak karışım tasarımı ve hazırlanması

Bitüm ve agrega özelliklerinin Superpave Şartnamesine uygunluğunun saptanmasından sonra bitümlü sıcak karışımların hazırlanması işlemine geçilmiştir. Öncelikle karışımlarda kullanılacak agreganın yüzey alanı Asphalt Institute Manual Series (1996)'te verilen yüzey alanı faktörleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değer 5.18707 m<sup>2</sup>/kg olarak bulunmuştur. Daha sonra asfalt film kalınlıklarına bağlı bağlayıcı yüzdeleri saptanmıştır.

Tablo 1. Agrega grupları üzerine uygulanan deneyler ve sonuçları

Test	7#	8#	10#	Yıkanmış 10#	Yararlanılan Şartname	Şartname Sınırları
Hacim Özgül Ağırlık	2.701	2.700	2.586	2.663	AASHTO T84/T85	-
Yaş Özgül Ağırlık	2.717	2.710	2.646	2.687	AASHTO T84/T85	-
Zahiri Özgül Ağırlık	2.736	2.730	2.729	2.729	AASHTO T84/T85	-
Absorbsiyon yüzdesi	0.4	0.4	0.9	0.9	AASHTO T84/T85	-
Los Angeles Aşınma yüzdesi	26	26	-	-	AASHTO T96	%45 (maks.)
Sağlamlık yüzdesi	0.1	0.1	1.2	1.2	AASHTO T104	%10-20 (maks.)
Köşelilik	-	-	45.6	45.6	AASHTO TP33	%40 (min.)
Kırılmışlık Oranı	100	100	100	100	PTM 621	-
Kum Eşdeğerlik Katsayısı	-	-	89	89	AASHTO T176	%40 (min.)
Yassılık İndeksi	7.5	9.7	-	-	ASTM D4791	%10 (maks.)

Tablo 2. Sıcak karışımda kullanılacak gradasyon değerleri

Elek Açıklığı	%Geçen
19.0 mm	100
12.5 mm	97
9.5 mm	87
4.75 mm	58
2.36 mm	35
1.18 mm	21
0.600 mm	13
0.300 mm	9
0.150 mm	8
0.075 mm	6.1

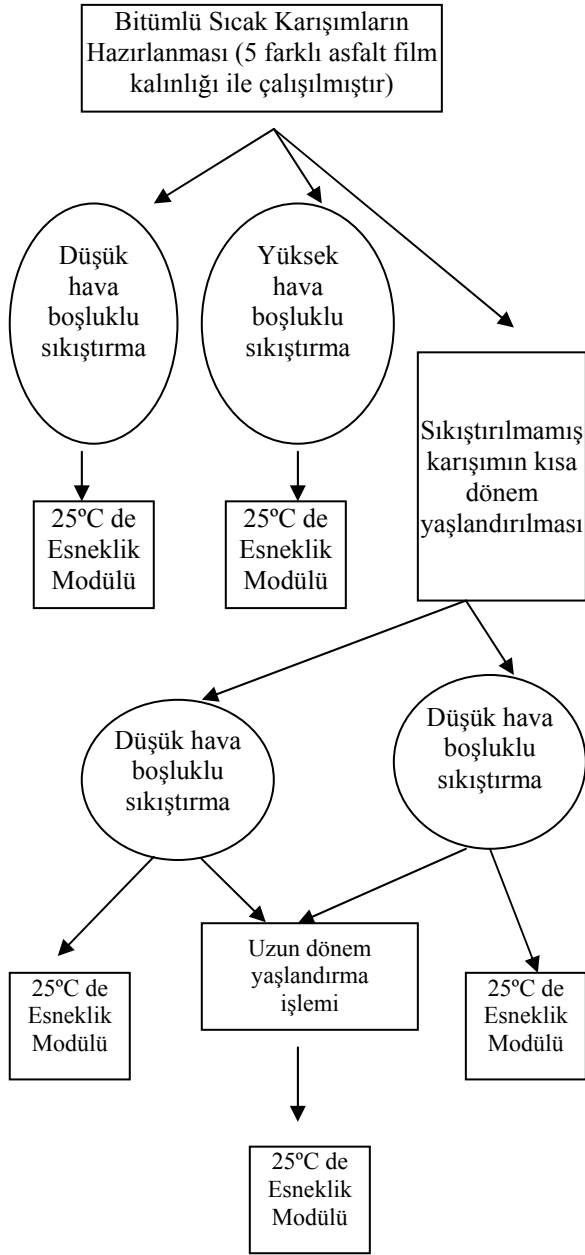
The Shell Bitumen Handbook (1990)'da belirtildiği gibi, karışımlarda ortalama asfalt film kalınlığı 5 $\mu$  ile 15 $\mu$  aralığında değişmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda 4.9 $\mu$ , 5.8 $\mu$ , 7.7 $\mu$ , 9.6 $\mu$  ve 11.4 $\mu$  asfalt film kalınlıkları ile çalışılmıştır. Bu değerlere karşılık gelen bağlayıcı yüzdeleri sırası ile %3.08, %3.58, %4.56, %5.59 ve %6.45 olarak hesaplanmıştır. Bu işlemlerden sonra, Superpave yoğurmalı pres aleti kullanılarak, farklı asfalt film kalınlıklarında, düşük ve yüksek hava boşluk oranlarında sıkıştırılan, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin yaşlanma özellikleri incelenmiştir.

Tablo 3. Bitümlü bağlayıcı üzerine uygulanan deneyler ve sonuçları

Bitümün Durumu	Uygulanan Test	Yararlanılan Şartname	Sonuç	Şartname Sınırları
<b>Orjinal Bitüm</b>	Özgül Ağırlık (25 °C)	AASHTO T228	1.021	-
	Viskozite, 135°C	ASTM D4402	0.420 Pa.s	-
	Viskozite 165 °C	ASTM D4402	0.114 Pa.s	-
	Dinamik Kesme Deneyi (G*/sin $\delta$ ), 10 rad/sn., 64 °C (tekerlek izi oluşmasına karşı direnç göstergesi)	AASHTO TP5	1.260 kPa	1.00 kPa (min.)
<b>RTFOT Kalıntısı</b>	Kütle Değişimi	AASHTO T240	0.14 %	-
	Dinamik Kesme Deneyi (G*/sin $\delta$ ), 10 rad/sn., 64 °C (tekerlek izi oluşmasına karşı direnç göstergesi)	AASHTO TP5	2.516 kPa	2.200 kPa (min.)
<b>PAV K</b>	Dinamik Kesme Deneyi (G*/sin $\delta$ ), 10 rad/sn., 25 °C (yorulma çatlaklarına karşı direnç göstergesi)	AASHTO TP5	4154 kPa	5000 kPa (maks.)
	Asfalt Kiriş Eğilme Deneyi 60 sn, -12 °C (termal çatlaklara karşı direnç göstergesi)	AASHTO TP1	209.0 MPa	300 Mpa (maks.)
	m eğim değeri 60 sn., -12 °C	AASHTO TP1	0.342	0.300 (min.)

### Yaşlanma etkisinin incelenmesi

Bu bölümde, hava sirkülasyonlu etüv kullanılarak kısa (135°C, 4 saat) ve uzun (85°C, 120 saat) dönem yaşlandırılmış, düşük (%3-5) ve yüksek (%6-7) hava boşluk oranına sahip bitümlü karışım numunelerine esneklik modülü (resilient modulus) deneyleri uygulanmıştır. Şekil 4'te karışımların yaşlandırılma etkilerinin incelenmesine ilişkin akış şeması, Tablo 5, 6, 7'de, sırasıyla, deney tasarım değişkenleri ile esneklik modülü deneyine ilişkin sonuçlar görülmektedir.



Şekil 4. Karışımların kısa ve uzun dönem yaşlandırılmalarına ilişkin akış şeması

Tablo 4. Deneysel tasarım değişkenleri

Bitümlü Bağlayıcı Tipi	PG 64-22
Agrega Cinsi	Kireçtaşı
Asfalt Film Kalınlığı	4.9µ – 5.8µ – 7.7µ – 9.6µ – 11.4µ
Yaşlandırma Durumu	
<b>Hiç Yaşlandırma İşlemi Uygulanmamış</b>	-
<b>Kısa Dönem Yaşlandırma İşlemi Uygulanmış</b>	135°C/4 saat
<b>Uzun Dönem Yaşlandırma İşlemi Uygulanmış</b>	85°C/120 saat
Hedeflenen Hava Boşluk Oranları	Düşük – Yüksek (%3-%5) – (%6-%7)
Uygulanan Deneyler	Esneklik Modülü,
Deney Tekrarı	2

Tablo 5. Yaşlandırılmamış, düşük ve yüksek hava boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri

Numune No	Asfalt film kalınlığı (µ)	M <sub>RYaşdüş</sub> (Mpa)	M <sub>RYaşyük</sub> (Mpa)
1	4.9	5654	4165
2	5.8	4504	3601
3	7.7	3415	2870
4	9.6	3160	2677
5	11.4	2961	2335

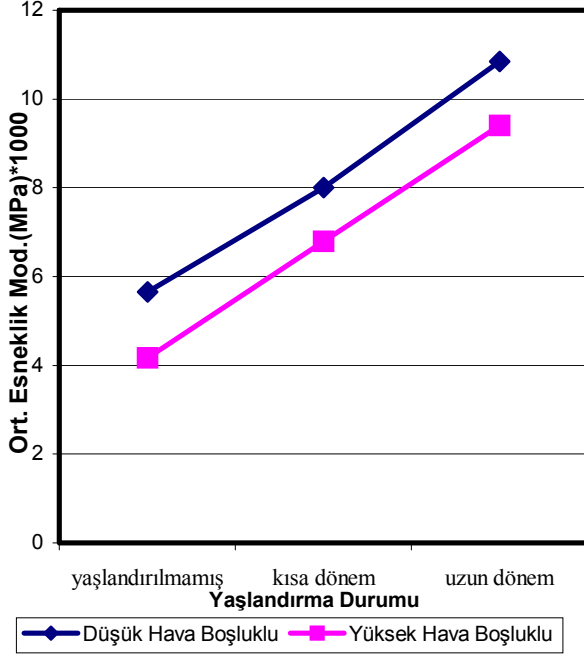
Tablo 6. Kısa dönem yaşlandırılmış, düşük ve yüksek hava boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri

Numune No	Asfalt film kalınlığı (µ)	M <sub>RStdüş</sub> (MPa)	M <sub>RStyük</sub> (MPa)
1	4.9	8011	6800
2	5.8	6364	5569
3	7.7	4713	4168
4	9.6	4171	3616
5	11.4	3324	3095

Tablo 7. Uzun dönem yaşlandırılmış, düşük ve yüksek hava boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri

Numune No	Asfalt film kalınlığı (µ)	M <sub>Rltüş</sub> (MPa)	M <sub>Rltyük</sub> (MPa)
1	4.9	10843	9400
2	5.8	8489	7258
3	7.7	6530	5642
4	9.6	5389	4934
5	11.4	4238	3887

Aynı boşluk oranı ve 4.9µ asfalt film kalınlığına sahip numunenin yaşlandırılma süresi (yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış) ile esneklik modülü arasındaki ilişki Şekil 5’de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, bitümlü karışımların yaşlandırılma süresi arttırıldıkça esneklik modülü değerleri artmaktadır.



Şekil 5. 4.9µ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-esneklik modülü ilişkisi

Benzer sonuçlar diğer asfalt film kalınlıkları için de elde edilmiştir. Bu durum, esneklik modülü değerlerinin artmasının, yaşlanmanın bir göstergesi olarak kabul edilmesini ortaya koymaktadır.

AASHTO 93 Üstyapı Projelendirme Rehberi’nde (AASHTO, 1993) kaplama tabakasında kullanılacak asfalt betonlarının 20°C (68°F)’deki esneklik modülü değerlerinin 3100 Mpa (450.000 psi)’ı geçmemesi tavsiye edilmiştir. Yüksek esneklik modülüne sahip asfalt betonları daha sert ve eğilmeye karşı daha dirençli olmalarına karşın, yorulma ve termal çatlaklara karşı daha duyarlıdır. Bu nedenle yaşlanma sonunda esneklik modülünün artması, kaplama tabakasında sorunlar yaratacak olumsuz bir gelişme olarak değerlendirilmelidir.

Esneklik modülü deneyi sonuçlarına ilişkin modeller- Aşağıdaki şekillerde (Şekil 6,7) asfalt film kalınlığına bağlı hesaplanmış ortalama esneklik modülü grafikleri verilmektedir. Elde edilen eğriler üzerinde regresyon analizleri yapılmış ve film kalınlığına bağlı olarak uygun modeller geliştirilmiştir.

Film kalınlığı ile yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış, düşük ve yüksek hava boşluk oranlarına sahip numunelerin esneklik modülleri arasında çizilen eğrilerden elde edilen bağıntılar aşağıda verilmiştir.

Kısa dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluklu,

$$M_{Rst_{düş}} = 101.88h^2 - 2320.4h + 16692$$

$$R^2=0.977 \quad (2)$$

Kısa dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluklu,

$$M_{Rst_{yük}} = 87.52h^2 - 1961.5h + 14171$$

$$R^2=0.988 \quad (3)$$

Uzun dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluklu,

$$M_{Rlt_{düş}} = 124.59h^2 - 2964.1h + 22007$$

$$R^2=0.980 \quad (4)$$

Uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluklu,

$$M_{Rlt_{yük}} = 111.32h^2 - 2574.1h + 18959$$

$$R^2=0.978 \quad (5)$$

Esneklik modülü deneyi sonuçlarından farklı boşluk oranları ve değişik yaşlandırma süreleri için film kalınlığına bağlı olarak elde edilen regresyon katsayılarının ortalama 0.98 olduğu görülmektedir.

Esneklik modülü model eğrileri film kalınlığına bağlı olarak incelendiğinde; eğrinin 9-10µ’nun altındaki kalınlıklarda dikleştiği, bir başka deyişle, yaşlanmanın etkisinin arttığı; 9-10µ’nun üstündeki kalınlıklarda ise yatıklaştığı, başka bir deyişle yaşlanmanın etkisinin değişmediği gözlenmiştir. Bu durum 9-10µ’luk asfalt film kalınlığına bağlı olarak elde edilen regresyon katsayılarının ortalama 0.98 olduğu görülmektedir.



lığının optimum değer olarak kabul edilmesinin uygun olduğunu göstermektedir.

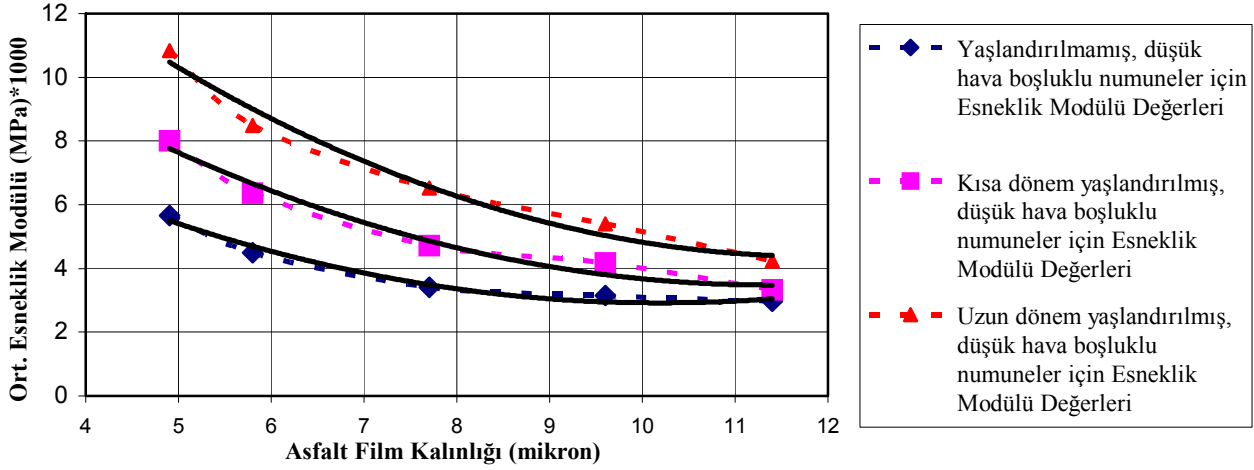
Düşük ve yüksek hava boşluk oranına sahip numuneler üzerinde yaşlanmanın etkisini görmek amacıyla kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış, düşük ve yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri ile yaşlandırılmamış düşük ve yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülleri arasında indislerin tanımlanması öngörülmüştür. Aşağıdaki formül ile hesaplanan bu değerler, deney başlangıç koşullarını referans almaktadır.

$$A_1 = \frac{M_{Rst_{düş}} - M_{Ryaş_{düş}}}{M_{Ryaş_{düş}}} \quad (6)$$

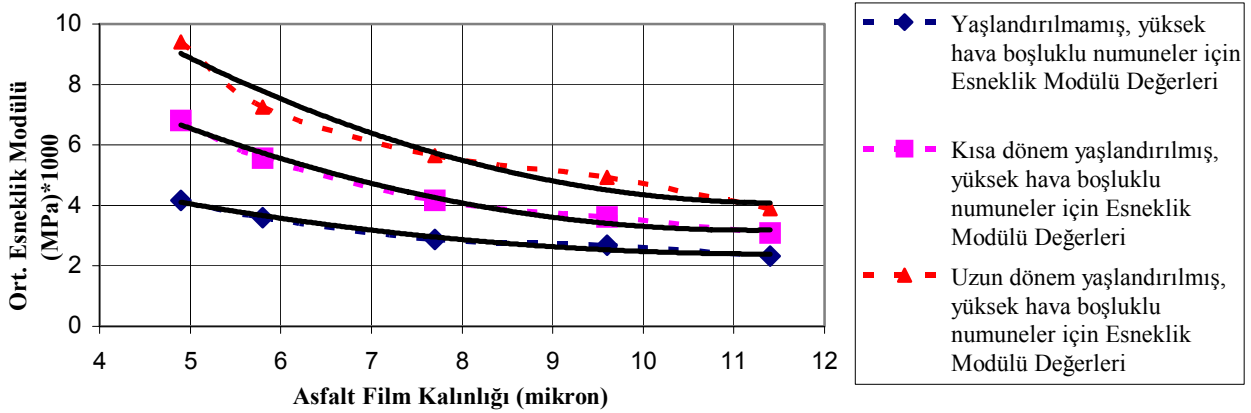
$A_1$ =Kısa dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü değeri ile yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü değeri arasındaki farkın, yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülüne oranı şeklinde tanımlanan indis değeridir.

$$A_2 = \frac{M_{Rst_{yük}} - M_{Ryaş_{yük}}}{M_{Ryaş_{yük}}} \quad (7)$$

$A_2$ =Kısa dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü değeri ile yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü değeri arasındaki farkın, yaşlandırılmamış yüksek hava



Şekil 6. Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip numunelere ilişkin film kalınlığı-esneklik modülü ilişkisi



Şekil 7. Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelere ilişkin film kalınlığı-esneklik modülü ilişkisi

boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülüne oranı şeklinde tanımlanan indis değeridir.

$$A_3 = \frac{M_R I_{t_{düş}} - M_R y a s_{düş}}{M_R y a s_{düş}} \quad (8)$$

$A_3$ =Uzun dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü değeri ile yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü değeri arasındaki farkın, yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülüne oranı şeklinde tanımlanan indis değeridir.

$$A_4 = \frac{M_R I_{t_{yük}} - M_R y a s_{yük}}{M_R y a s_{yük}} \quad (9)$$

$A_4$ = Uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü değeri ile yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü değeri arasındaki farkın, yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülüne oranı şeklinde tanımlanan indis değeridir.

Hesaplanan indis değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi, asfalt film kalınlığı arttıkça, tüm hava boşluk oranları için A katsayıları azalmaktadır. Bir başka deyişle, film kalınlığının artışı ile yaşlanma etkileri azalmaktadır. Ayrıca kısa dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin, düşük hava boşluk oranına sahip numunelere kıyasla yaşlanmaya karşı daha duyarlı oldukları görülmektedir ( $A_2 > A_1$ ). Aynı durum uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numuneler ile düşük hava boşluk oranına sahip numuneler arasında da görülmektedir ( $A_4 > A_3$ ).

Ayrıca aynı asfalt film kalınlığına sahip düşük ve yüksek hava boşluk oranı ile sıkıştırılan numunelerin kısa dönem ile uzun dönem yaşlanma özelliklerine ilişkin esneklik modülleri değerleri birbirine bağlı olarak incelenmiş ve aşağıdaki bağıntılar elde edilmiştir.

$$M_R I_{t_{düş}} = 1.3956 M_R s t_{düş} - 321.5 \quad (10)$$

$$R^2=0.996$$

$$M_R I_{t_{yük}} = 1.4183 M_R s t_{yük} - 370.49 \quad (11)$$

$$R^2=0.992$$

Tablo 8. Asfalt film kalınlığına bağlı indis değerleri

Asfalt Film Kalınlığı (µ)	Kısa Dönem		Uzun Dönem	
	A <sub>1</sub> (düşük hava boşluklu)	A <sub>2</sub> (yüksek hava boşluklu)	A <sub>3</sub> (düşük hava boşluklu)	A <sub>4</sub> (yüksek hava boşluklu)
4.9	0.417	0.633	0.918	1.257
5.8	0.413	0.547	0.885	1.016
7.7	0.380	0.452	0.912	0.966
9.6	0.320	0.351	0.705	0.843
11.4	0.123	0.325	0.431	0.665

Numunelerin esneklik modülü değerlerine bağlı olarak elde edilen bağıntılar kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri arasında çok sıkı bir ilişki olduğunu ( $R^2 \sim 1$ ) ve film kalınlıklarının karışımların kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri üzerinde benzer etkisi olduğunu göstermektedir.

## Sonuçlar

Bitümlü karışımlarda asfalt film kalınlığının yaşlanma üzerine etkisinin incelenmesi ve optimum asfalt film kalınlığının saptanması bu çalışmanın ana amacını oluşturmaktadır.

Çalışmada yaşlanma, asfalt film kalınlığı ile birlikte hava boşluk oranına bağlı olarak esneklik modülünün değişimi açısından incelenmiştir. Bu amaçla yapılan deneysel çalışmalarda, farklı asfalt film kalınlıkları (4.9µ, 5.8µ, 7.7µ, 9.6µ ve 11.4µ) ile düşük (%3-%5) ve yüksek (%6-%7) hava boşluk oranına sahip, kısa (135°C, 4 saat) ve uzun dönem (85°C, 120 saat) yaşlandırılmış numunelerin esneklik modülü arasında regresyon analizleri yapılmıştır.

Çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1) Aynı boşluk oranı ve aynı asfalt film kalınlığı için yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin yaşlandırılma sürelerine bağlı esneklik modülü grafikleri incelendiğinde (Şekil 5), bitümlü karışımların yaşlandırılma süresi arttırıldıkça esneklik modülü değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu durum,

esneklik modülü değerlerinin artmasının yaşlanmanın bir göstergesi olarak kabul edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

2) Hava boşluğunun numunelerin yaşlanma özelliklerine etkisini incelemek amacıyla film kalınlığına bağlı olarak indisler tanımlanmıştır ( $A_1, A_2, A_2, A_4$ ). Bu indisler deney başlangıç koşullarını referans almaktadır. Hesaplanan bu indis değerleri incelendiğinde (Tablo 11) yüksek hava boşluk oranlarına sahip numunelerin, düşük hava boşluk oranlarına sahip numunelere kıyasla yaşlanmanın etkilerine daha duyarlı oldukları görülmektedir ( $A_2 > A_1, A_4 > A_3$ ).

3) Esneklik modülü model eğrileri film kalınlığına bağlı olarak incelendiğinde (Şekil 6-7), 9-10 $\mu$ 'luk film kalınlıklarının bir özellik taşıdığı; eğrinin 9-10 $\mu$ 'nun altındaki kalınlıklarda dikleştiği, 9-10 $\mu$ 'dan büyük kalınlıklarda ise yatıklaştığı gözlenmiştir. Başka bir deyişle, belirtilen film kalınlığından küçük değerlerde yaşlanmanın etkisi artmakta, büyük değerlerde ise yaşlanmanın etkisi değişmemektedir. Bu durum da, 9-10 $\mu$ 'luk film kalınlığının optimum değer olarak kabul edilmesinin uygun olduğunu göstermektedir.

4) 9-10 $\mu$  optimum film kalınlığı aralığına karşılık gelen bağlayıcı yüzdesi %5.1 ve %5.5 olarak hesaplanmıştır. Bu değer Yollar Fenni Şartnamesi'nin (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2000) aşınma tabakaları için esas aldığı tasarım ölçütlerine (%4-%7) uygundur.

5) Aynı film kalınlığına sahip numunelerin kısa dönem yaşlanma ile uzun dönem yaşlanma özellikleri arasında çok sıkı bir ilişki olduğu ( $R^2 \sim 1$ ) regresyon analizi sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu durum film kalınlığının, karışımların kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri üzerinde benzer biçimde etkisi olduğunu göstermiştir.

Bu çalışma yalnızca bir çeşit agrega ve bağlayıcı kullanımı ile ilgili sonuçları kapsamaktadır. Bu konudaki araştırmalar, yaşlanma olayının hem agrega hem de karışım özellikleri tarafından etkilendiğini göstermektedir. Bu nedenle

farklı mineorolojik kökenli agrega, gradasyon ve farklı özellikteki bitümlü bağlayıcı kullanılarak çalışma kapsamının geliştirilmesi gereklidir. Ayrıca yaşlanma sonunda esneklik modülünün artması kaplamanın yorulmaya ve termal çatlaklara karşı duyarlılığını arttırdığından adı geçen konuların da araştırılmasında yarar vardır.

## Semboller

$M_{R\text{Yaş.düş}}$	: Yaşlandırılmamış, düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü (MPa)
$M_{R\text{Yaş.yük}}$	: Yaşlandırılmamış, yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü (MPa)
$M_{R\text{St.düş}}$	: Kısa dönem yaşlandırılmış, düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü (MPa)
$M_{R\text{St.yük}}$	: Kısa dönem yaşlandırılmış, yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü (MPa)
$M_{R\text{lt.düş}}$	: Uzun dönem yaşlandırılmış, düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü (MPa)
$M_{R\text{lt.yük}}$	: Uzun dönem yaşlandırılmış, yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü (MPa)
$h$	: Asfalt film kalınlığı ( $\mu$ )
$\eta_a$	: Yaşlandırılmış bağlayıcının viskozite değeri (poise)
$\eta_o$	: Orijinal bağlayıcının viskozite değeri (poise)
$G^*$	: Bağlayıcının kompleks modülü (kpa)

## Kaynaklar

- AASHTO, (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- Asphalt Institute Manual Series No.2, (1996). *For asphalt concrete and other hot mix types, (MS-2)*, 255.
- Bell, C. A., Sosnovske, D. ve Wieder J. A., (1994). *Aging, binder validation, SHRP A-384*, National Research Council, Washington D.C.
- Blokker, P. C. ve Von Hoom, H., (1959). Durability of bitumen in theory and practice, *Proceedings of the V.th World Petroleum Congress*, New York, Haziran 1959, 141-157.
- Campen, W. H., Smith, J. R., Mertz, L. R. ve Erickson, L.G., (1959). The relationship between voids, surface area, film thickness and stability in bituminous paving mixtures, *Journal of the*

- association of asphalt paving technologists*, **28**, 149-157.
- Dow, A. W., (1903). *Asphalt Experiments at Washington*, Engineering News Record, **47**, 18-25.
- Griffin, R. L., Miles, T. K. ve Penther, C. J., (1955). Microfilm Durability Test for Asphalt, *Journal of the association of asphalt paving technologists*, **24**, 31-42.
- Heithaus, J. J. ve Johnson, R. W., (1958). A Micro viscometer study of road asphalt hardening in the field and laboratory, *Journal of the association of asphalt paving technologists*, **27**, 571-605.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, (2000). *Yollar Fenni Şartnamesi*, T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, KGM Matbaası, Ankara, 435.
- Kandhal, P. ve Chakraborty, S., (1996). *Effect of asphalt film thickness on the short and long term aging of asphalt paving mixtures*, National Research for Asphalt Technology, Transportation Research Board, **22**, 45-68.
- Kumar, A. ve Goetz, W. H., (1977). Asphalt hardening as affected by film thickness, voids, permeability in asphaltic mixtures, *Journal of the association of asphalt paving technologists*, **46**, 571-605.
- Lubbers, H. E., (1985). Bitumen in De Wegen Waterbauw, Hollanda.
- The Shell Bitumen Handbook, (1990). University of Nottingham, Temmuz, 1990, 525, Londra.
- Traxler, R. N., (1961). Relation Between Asphalt Composition and Hardening by Volatilization and Oxidation, *Journal of the association of asphalt paving technologists*, **30**, 359-377.
- Vallegra, B. A., (1981). Pavement deficiencies related to asphalt durability, *Journal of the association of asphalt paving technologists*, **50**, 481-491.