



**ULTRAVİYOLE YAŞLANDIRMA ETKİSİ
ALTINDA BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN
REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuba YILMAZ

Danışman

Doç. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi Taciroğlu

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ULTRAVİYOLE YAŞLANDIRMA ETKİSİ ALTINDA BİTÜMLÜ
BAĞLAYICILARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Tuba YILMAZ

Danışman

Doç. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi Taciroğlu

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OCAK 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Tuba YILMAZ tarafından hazırlanan “Ultraviyole Yaşlandırma Etkisi Altında Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 16 / 01 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	: Doç. Dr. Cahit GÜRER	
İkinci Danışman	: Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU	
Başkan	: Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Üye	: Prof. Dr. Bekir AKTAŞ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Üye	: Doç. Dr. Cahit GÜRER Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Üye	: Doç. Dr. Volkan Emre UZ İzmir İleri teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.
.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

28 / 02 / 2023

TUBA YILMAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ULTRAVİYOLE YAŞLANDIRMA ETKİSİ ALTINDA BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Tuba YILMAZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi Taciroğlu

Bitümlü sıcak karışım kaplama tabakalarıyla oluşturulan esnek üstyapılar; sürüş konforu ve rahatlığı, trafik yükü altında kolay bakım ve onarımının yapılabilmesi, kısa sürede trafiğe açılabilmesi ve geri dönüştürülebilir olmasından dolayı günümüzde en çok tercih edilen yol kaplamaları haline gelmiştir. Viskoelastik ve termoplastik özelliğe sahip olarak tanımlanan bitümün; viskoelastik özelliği nedeniyle yüksek yükleme hızlarında elastik davranış gösterirken, termoplastik özelliğinden dolayı ile de sıcaklık etkisiyle kıvamı değişebilmekte, yüksek sıcaklıklarda dayanıklılığı az, düşük sıcaklıklarda ise dayanıklılığı fazla fakat rijit davranış sergileyerek çatlak oluşumuna eğilimli hale gelmektedir. Geleneksel bitüm içeren asfalt kaplamalar dış çevre etkileri ve içerisindeki malzemelerin zamanla bozulması neticesiyle her zaman beklenildiği gibi performans gösterememektedirler. Bitümlü bağlayıcı kaplamaların performansını doğrudan etkileyen en önemli özelliği dayanıklılığı yani durabilitesidir. Bağlayıcının dayanıklılığı sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Bitümün çeşitli nedenlerden dolayı sertleşmesi ve kırılğan hale gelmesi ise “yaşlanma” veya “zamana bağlı yaşlanma” olarak ifade edilmektedir. Bu yüksek lisans tez çalışmasında bitümlü bağlayıcıların gerçek yaşlanma koşullarını laboratuvarında benzeştiren ve muadili oldukça pahalı olan bir

AKÜ Ultraviyole Yaşlanma cihazı (AKÜ UV) test edilmesi amaçlanmış ve yapılan bu cihaz üzerinde, bitüm numuneleri tepsiye 3 mm kalınlığında serilerek, UV yaşlanma etkisine tabi tutulmuş ve reolojik özelliklerde meydana gelen değişiklikler; Yumuşama Noktası, Penetrasyon, Düktilite, Dönel Viskozite, Dinamik Kesme Reometre (DSR), Dönen İnce Film Halinde Yaşlandırma (RTFOT), Basıncılı Yaşlandırma (PAV) gibi bitüm deneyleri ile değerlendirilmiştir. Deneysel çalışma sonuçları AKÜ UV yaşlandırma cihazının özellikle kısa dönem bitüm yaşlanmasını iyi bir şekilde benzeştirdiğini ve laboratuvar koşullarında yaşlanma etkilerinin incelenmesine olanak sağladığı görülmüştür. Bundan sonraki çalışmalarda RTFOT sonrası numuneler üzerinde AKÜ UV cihazının etkisi test edilerek uzun dönem yaşlanma sonuçlarının da benzeştirilebileceği düşünülmektedir.

2023, xii + 68 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bitüm, Yaşlanma, Reoloji, UV Yaşlanma Etkisi, AKÜ UV Yaşlandırma Cihazı.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BITUMINOUS BINDERS UNDER ULTRAVIOLET AGING EFFECT

Tuba YILMAZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Cahit GÜRER

Co-Supervisor: Assistant Prof. Murat Vergi Taciroğlu

Flexible pavements are formed with bituminous hot mix pavement layers; Today, it has become the most preferred road pavement due to its driving comfort and convenience, easy maintenance and repair under traffic load, being able to be opened to traffic in a short time, and is recyclable. Bitumen is defined as having viscoelastic and thermoplastic properties; While it shows elastic behavior at high loading rates due to its viscoelastic feature, its consistency can change with the effect of temperature due to its thermoplastic feature, its strength is low at high temperatures, and it exhibits a high strength at low temperatures but it turns into that prone to crack formation by exhibiting a rigid behavior. Traditional bituminous asphalt pavements don't always perform as expected due to the effects of the external environment and the deterioration of the materials inside over time. The most important feature that directly affects the performance of asphalt pavements is their durability. The durability of the binder is expressed by its resistance to hardening. The hardening and brittleness of bitumen for various reasons are expressed as "aging" or "time-dependent aging". In this master's thesis, it is aimed to test a AKÜ ultraviolet aging device (AKU UV) which simulates the real aging conditions of bituminous binders in the laboratory and is quite expensive. On this device, the samples were prepared by laying the bitumen samples in a thickness of 3 mm on the tray, and the samples were exposed to

UV aging and the changes in the rheological properties were determined by standard bitumen tests such as the Softening Point, Penetration, Ductility, Rotational Viscosity, Dynamic Shear Rheometer (DSR), Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), Pressure Aging Vessel Test (PAV). Experimental study results show that the AKÜ UV aging device simulates the short-term aging of bitumen very well and allows the aging effects to be examined under laboratory conditions. In future studies, it is thought that long-term aging results can be simulated by testing the effect of AKU UV device on samples after RTFOT.

2023, xii + 68 pages

Keywords: Bitumen, Aging, Rheology, UV Aging Effect, AKU UV Aging Device.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazım aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Doç. Dr. Cahit GÜRER'e ve ikinci tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACIROğLU'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu tez çalışmasını 21. FEN BİLİMLERİ 15 nolu proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenen Afyon Kocatepe niversitesine teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Tuba YILMAZ

Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
RESİMLER DİZİNİ.....	xi
1.GİRİŞ.....	1
2.LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	5
2.1 Bitüm Yaşlanması.....	5
2.2 UV Yaşlanması ve UV İndeksi	12
2.2.1 UV Yaşlanması Nedir?	12
2.2.2 UV Radyasyonu.....	16
2.3 Konu ile İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar	17
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....	25
3.1 Materyal	25
3.1.1 Bitüm.....	25
3.1.2 AKÜ Ultraviyole (UV) Yaşlandırma Cihazı.....	25
3.1.3 Yaşlandırma Numunesi Kapları	27
3.2 Yöntem.....	28
3.2.1 Bitüm Deneyleri	33
3.2.1.1 Özgül Ağırlık Deneyi.....	33

3.2.1.2 Penetrasyon Deneyi.....	35
3.2.1.3 Yumuşama Noktası Deneyi.....	36
3.2.1.4 Penetrasyon İndeksi.....	37
3.2.1.5 Dönel Viskozite (RV) Deneyi.....	38
3.2.1.6 Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT).....	39
3.2.1.7 Basınçlı Yaşlandırma Deneyi (PAV).....	40
3.2.1.8 Dinamik Kesme Reometre Deneyi.....	41
3.2.1.9 Kiriş Eğme Reometre Deneyi (BBR).....	43
3.2.1.10 Kuvvet Ölçerli Düktilite Deneyi	45
4.BULGULAR	46
4.1 Özgül Ağırlık Deneyi Bulguları	46
4.2 Penetrasyon Deneyi Bulguları.....	47
4.3 Yumuşama Noktası Deneyi Bulguları	47
4.4 Penetrasyon İndeksi Bulguları.....	48
4.5 Dönel Viskozite (RV) Deneyi Bulguları.....	49
4.6 Dinamik Kesme Reometre Deneyi (DSR) Bulguları.....	51
4.7 Kiriş Eğme Reometre (BBR) Deneyi Bulguları	54
4.8 Kuvvet Ölçerli Düktilite Deneyi Bulguları	56
5.SONUÇ ve ÖNERİLER.....	58
6.KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ.....	68

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrad Derece
cm	Santimetre
cP	Centipoise
Gr	Gram
GPa	Gigapascal
H ₂ SO ₄	Sülfirik Asit
KPa	Kilopascal
La ₂ O ₃	Kolloidal Lantan Oksit
MPa	Megapascal
m	Metre
mm	Milimetre
nm	Nanometre
Na ₂ CO ₃	Sodyum Karbonat
NaCl	Sodyum Klorür
Na ₂ SO ₄	Sodyum Sülfat
sn	Saniye
W	Watt
µm	Micrometre

Kısaltmalar

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
AFM-IR	Foto-Termal Kızılötesi
AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
BBR	Kiriş Eğme Reometre Deneyi
DSC	Diferansiyel Tarama Kalorimetresi
DSR	Dinamik Kesme Reometre Deneyi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi
IR	Kızılötesi
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
PAV	Basınçlı Yaşlandırma Deneyi
PI	Penetrasyon İndeksi
PMB	Polimer Modifiye Bitüm
RTFOT	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi
RV	Dönel Viskozite
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SP	Polimer Modifiye Bitümün Yumuşama Noktası
TFOT	İnce Film Etüvü Deneyi
UST	Ultraviyole Spektrofotometre Testi
UV	Ultraviyole
YN	Yumuşama Noktası

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Asfalt kaplama malzemesinin ultraviyole yaşlanmasının oluşum süreci (Sun, Qui vd. 2020)	2
Şekil 2.1 Yaşam döngüsü içerisinde bitümün yaşlanma süreci (Li, Feng vd. 2022)	6
Şekil 2.2 Bitümün karıştırma, daha sonra depolama, taşıma ve uygulama sırasında ve belirli bir süre servis verdikten sonraki yaşlanması (Hunter, Self vd. 2015)	9
Şekil 2.3 Yaşlanma indeksi üzerinde bitüm film kalınlığının etkisi (Hunter, Self vd. 2015).....	10
Şekil 2.4 UV dalga boyları (insan gözünün görebildiğinin hemen altındaki dalga boylarıdır) (İnt. Kay. 3 2022)	16
Şekil 2.5 Çevresel faktörlerin bitüm üzerindeki olumsuz etkileriyle ilgili çalışma özeti (Li, Yuanyuan vd. 2020)	21
Şekil 3.1 a) AKÜ UV yaşlandırma cihazı, b) AKÜ UV yaşlandırma cihazı şematik gösterimi	26
Şekil 4. 1 Bitüm Özgül Ağırlık değerleri.....	46
Şekil 4.2 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin penetrasyon değerleri.....	47
Şekil 4.3 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin yumuşama noktası değerleri	48
Şekil 4.4 Penetrasyon İndeksi değişimleri	49
Şekil 4. 5 Bitüm numunelerinin viskozite değerleri	50
Şekil 4.6 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını ASTM (eşdeğerlik) yöntemine göre gösteren sıcaklık-viskozite grafiği	51
Şekil 4.7 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin faz açılarının sıcaklıkla değişimleri....	53
Şekil 4.8 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin $G^*/\sin \delta$ parametresi değişimleri.....	54
Şekil 4.9 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin Sünme Sertliği değerlerinin değişimi .	55
Şekil 4.10 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin Sünme Oranı (m-değeri)	56
Şekil 4.11 Farklı yaşlandırma deneyleri sonrası bitüm numunelerine uygulanan maksimum yük	57
Şekil 4.12 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin deformasyon değeri	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Bitüm yaşlanmasını etkileyen mekanizmalar (Traxler 1961).....	7
Çizelge 2.2 Önceki araştırmalarda bitümlerin UV yaşlandırmasında kullanılan parametreler	14
Çizelge 2.2 Önceki araştırmalarda bitümlerin UV yaşlandırmasında kullanılan parametreler (Devam)	15
Çizelge 2.3 Bitümün UV yaşlanması üzerine yapılan diğer laboratuvar çalışmalarında kullanılan farklı test yöntemleri.....	23
Çizelge 2.3 Bitümün UV yaşlanması üzerine yapılan diğer laboratuvar çalışmalarında kullanılan farklı test yöntemleri (Devam)	24
Çizelge 3.1 50/70 penetrasyon sınıfı saf bitümün özellikleri.....	25
Çizelge 3.2 AKÜ UV yaşlandırma cihazında kullanılacak kapların ölçüleri, ağırlıkları ve yaşlandırılacak bitüm ağırlıkları	27
Çizelge 4. 1 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları	51

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 AKÜ UV bitüm yaşlandırma cihazı içerisine yerleştirilen bitüm numune tepsileri	28
Resim 3.2 UV yaşlandırma kaplarındaki 3 mm bitüm kalınlığının ölçülmesi	29
Resim 3.3 AKÜ UV yaşlandırma cihazının çalışma sıcaklığı	30
Resim 3.4 UV yaşlandırma cihazı içerisindeki bitüm numuneleri ve UV lamba mesafesi	30
Resim 3.5 a) AKÜ UV yaşlandırma cihazı, b) AKÜ UV yaşlandırma cihazının lamba özellikleri	31
Resim 3.6 Tez deneysel çalışmasına ait test yöntem akış şeması	32
Resim 3.7 Bitüm Özgül Ağırlık piknometresi deney aşamaları, a) deneyde kullanılacak piknometre kapları, b) boş piknometre kabının tartılması, c) su dolu piknometre kabının tartılması, d-e) piknometre kabı içerisine bitüm numunesinin doldurulması, f) bitüm dolu piknometre kabının tartılması, g) bitüm doldurulmuş piknometre kabının 25±0.5 °C su banyosunda 30 dakika bekletilmesi, h) su banyosundan çıkarılan piknometre kabının tartılması ...	34
Resim 3.8 Bitüm penetrasyon deney aşamaları a) numunenin oda sıcaklığında bekletilmesi, b-c) 25°C'ye ayarlanan su banyosunda bekletilen numune, d) numunenin penetrasyon cihazına yerleştirilmesi, e) penetrasyon iğnesinin ayarlanması	35
Resim 3.9 Bitüm yumuşama noktası deneyi yapılış aşaması a) deneyde kullanılan aparatlar, b) bitümün yüzüklere yerleştirilmesi, c) yüzüklerin cihaz içerisine yerleştirilmesi ve deneye başlanması, d) bitümün düzeneğin taban yüzeyine teması	37
Resim 3.10 Dönel viskozite deneyinin yapılış aşaması a) bitümün tüpe dökülmesi, b) Spindle'nin tüp içerisine terazili şekilde yerleştirilmesi, c) deneyin başlatılması.	39
Resim 3.11 RTFOT Deneyi	40
Resim 3.12 a-b) PAV deneyi, c) Numune rafının PAV cihazına yerleştirilmesi	41
Resim 3.13 a) DSR deneyi b) Dinamik Kesme Reometre deneyine maruz bırakılmış bitümlü numunesi	42

Resim 3.14 a) BBR deneyi b) BBR deney aparatları, c) bağlayıcının deney aparatlarına dökülmesi, d) numunenin kalıptan çıkarılması.....	44
Resim 3. 15 a) Düktilite kalıbı içerisine numunenin yerleştirilmesi, b) Kuvvet ölçerli düktilite cihazına numunenin yerleştirilmesi.....	45



1. GİRİŞ

Bitümlü sıcak karışım kaplama tabakalarıyla oluşturulan esnek üstyapılar; sürüş konforu ve rahatlığı, trafik altında kolay bakım ve onarımın yapılabilmesi, kısa sürede trafiğe açılabilmesi ve geri dönüştürülebilir olmasından dolayı günümüzde en çok tercih edilen yol kaplamaları haline gelmiştir. Viskoelastik termoplastik özelliğe sahip olarak tanımlanan bitümlü bağlayıcıların; viskoelastik özelliği nedeniyle yüksek yükleme hızlarında elastik davranış gösterirken, termoplastik özelliğinden dolayı sıcaklık etkisiyle kıvamı değişebilmekte, yüksek sıcaklıklarda plastik deformasyona eğilimli, düşük sıcaklıklarda ise dayanıklılığı fazla fakat rijit davranış sergileyerek çatlak oluşumuna eğilimli hale gelmektedir.

Geleneksel bitüm içeren asfalt kaplamalar dış çevre etkileri ve yapısındaki hidrokarbon grupların zamanla oksidasyon, foto oksidasyon vb. etkilerle zamanla değişmesi neticesiyle her koşulda yeterli performans gösterememektedirler.

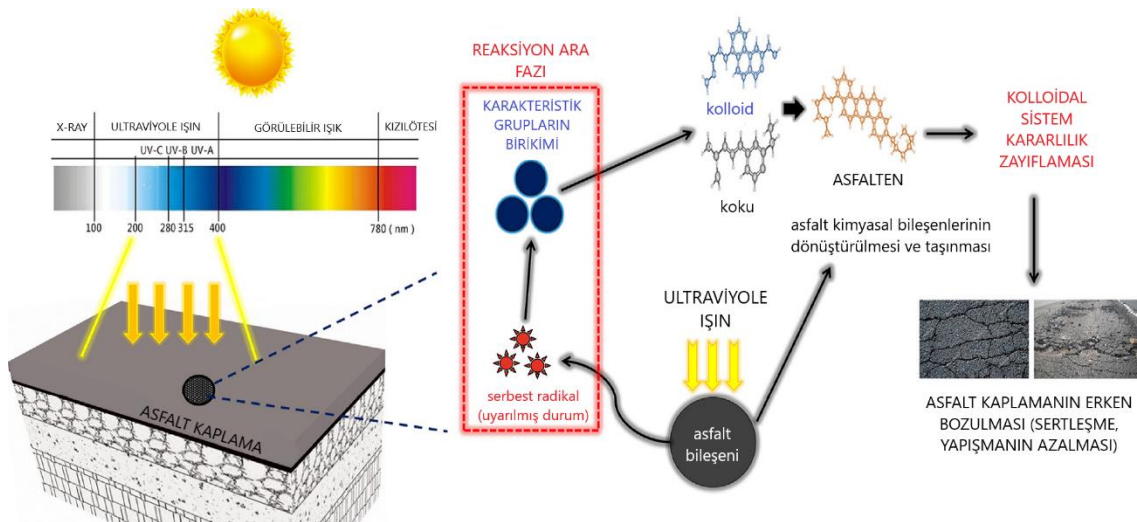
Bitümlü bağlayıcı kaplamaların performansını doğrudan etkileyen en önemli özelliği dayanıklılığı yani durabilitesidir. Bağlayıcının dayanıklılığı ise sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Bitümün çeşitli nedenlerden dolayı sertleşmesi ve kırılgan hale gelmesi ise “yaşlanma” veya “zamana bağlı yaşlanma” olarak ifade edilmektedir (Bell vd. 1994).

Isı, oksijen ve güneş ışığı etkilerine karşı oldukça hassas olan bitüm imalat esnasında ve servis ömrü boyunca kolayca yaşlanmaya maruz kalmakta ve bu durumla ilgili birçok sorun ortaya çıkmaktadır. Bu sorunlar asfalt kaplamalı yolun ömrünü ciddi şekilde tehlikeye atmaktadır. Yaşlanma sürecinden sonra bitüm daha sert ve kırılgan hale gelmekte bu da kaplamanın fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkilemekte, yorulma çatlama ve düşük sıcaklık çatlama ile sonuçlanan bir dizi bozulma meydana getirmektedir (Hu vd. 2018). Bitümün hizmet ömrü boyunca yaşlanmasının temel sebebi oksidasyondur. Oksidasyona uğramış bitüm içeren karışımlar, su etkisine karşı dayanım

ve nem hassasiyeti bakımından normal karışımlara göre daha düşük durabiliteye sahip olmaktadır (Mouillet vd. 2008).

Bitüm yaşlanması, neden olan faktörlere göre iki aşamada ele alınmaktadır: termal-oksidasyon ve foto-oksidasyon. Termal oksidasyon bitümün plentte karıştırılma, taşınma, serilme ve sıkıştırılması aşamasında ortaya çıkan kısa dönem yaşlanma iken foto-oksidasyon yaşlanması ise güneş ışığında 280-400 nm dalga bandına sahip ultraviyole (UV) radyasyona bağlı yaşlanmadır (İnt. Kyn. 1, Yu ve Bai 2019).

Bitüm yaşlanması çok karmaşık bir süreçtir ve ultraviyole (UV) yaşlanması söz konusu olduğunda bu karmaşıklık daha da artmaktadır. Güneş ışığının bir parçası olan UV ışığı, görünür ve kızılötesi ışığa kıyasla daha kısa dalga boyuna ve daha yüksek bir enerjiye sahiptir. Dalga boyuna göre UV ışığı üç spektrumdan meydana gelmektedir: UV-A (315-400nm), UV-B (315-280 nm) ve UV-C (280-200 nm). UV-A, bitümdeki kovalent bağları kırabilmesinden dolayı bitümün yaşlanmasını sağlayan ana enerji kaynağıdır. UV-B'nin %95'i ve UV-C'nin ise tamamı ozon tabakası tarafından engellenerek dünya yüzeyine neredeyse hiç ulaşmamaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Asfalt kaplama malzemesinin ultraviyole yaşlanmasının oluşum süreci (Sun vd. 2020).

Ultraviyole ışık, esas olarak kaplamanın üst katmanını etkilemekte ve kaplamadaki hava boşluklarından veya mikro çatlaklardan nüfuz etmektedir. Asfalt molekülleri, ultraviyole enerjiyi emerek uyarılmakta ve daha sonra asfalt bağlayıcının sertliğinde ve gevrekliğinde bir artışa yol açmaktadır. Böylece kaplamanın çatlama ve soyulmasına neden olabilen fotokimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi indüklenmektedir (Lins vd. 2008).

Güneş ışınımının asfalt bağlayıcılar üzerinde etkisi 1822'den beri bilinmektedir (Niepce 2016). Güneş ışınımı asfalt kaplamanın yüzeyine ulaştığında, serbest radikal reaksiyonlar üretmekte ve kaplama yüzeyinde oksitlenmiş bir tabaka oluşturmaktadır (Durrieu vd. 2007). Güneş radyasyonunun bitüm üzerindeki etkisi, bitümün yüksek absorpsiyon katsayısı nedeniyle sadece esnek kaplamaların üst katmanlarını etkilediğine inanıldığından, genellikle göz ardı edilmiştir (Airey 2003). 1950'lerde bir maruziyet testi geliştirilmiştir. Bu testte güneş radyasyonunun etkisinin bitümün doğasına bağlı olduğu bulunmuştur (Duriez vd. 1961). Daha sonra UV radyasyonun asfalt kaplamaların aşınma tabakasının yaşlanması üzerindeki etkisinin, bu etkilerin hızlı bir şekilde meydana gelmesi nedeniyle tamamen göz ardı edilemeyeceği bildirilmiş ve UV radyasyonuna 10 saatlik laboratuvar maruziyetinin 1 yıla eşdeğer olduğu bulunmuştur (Durrieu vd. 2007). Ye vd. (2006) ultraviyole foto-oksidasyon ve termal oksidasyonun bitüm performansı üzerindeki etkisini araştırmak için iç ve dış ortamı karşılaştırarak ultraviyole radyasyon testi yapmışlardır. Karşılaştırma sonuçları 3 ay dış mekâna karşı 13 gün iç mekân yaşlanması ve 9 ay dış mekâna karşı 39 günlük iç mekân yaşlanmasında ölçülen özelliklerin genel olarak birbirine yakın olduğunu göstermiştir.

Kaplamanın hizmet ömrü boyunca meydana gelen UV kaynaklı yaşlanma, özellikle yoğun UV ışık alanlarına sahip çevresel etkiler durumunda araştırmalar giderek daha fazla artmaktadır. UV yaşlanma sürecinde; sıcaklık, UV radyasyon yoğunluğu, UV radyasyon türleri, numune kalınlığı ve kullanılan bitümün sınıfı gibi birçok faktör bitümün UV yaşlanma indeksini etkileyebilmektedir.

Son dönemlerde bitümün UV yaşlanmasını benzeştirmek için UV yaşlandırma testi kullanılarak bitümün hizmet ömrü boyunca maruz kaldığı UV yaşlanmasını kısa sürede

yakalamak amaçlanmaktadır. UV yaşlandırma testinin ilk örneği Edler vd. (1985) yollardaki iklim şartlarını laboratuvar ortamına taşımak amacıyla UV ışınlarını kullanarak hava ölçüm aracı geliştirmiştir. Airey (2003) ise Hollanda iklim şartları altındaki poroz asfaltların yaşlanmasını laboratuvara yansıtmak amacıyla özel bir iklimlendirme fırını kullanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında bitüm numunelerini;

- Hiç yaşlandırmadan,
- Numuneye standart kısa-dönem yaşlandırma deneyi Dönen İnce Film Halinde ısıtma testine (RTFOT) tabi tutarak,
- Uzun dönem yaşlandırma testi olarak Basınçlı Yaşlandırma (PAV) deneyine tabi tutarak,
- Tüm bunlara ilaveten AKÜ Ulaştırma Laboratuvarında geliştirilmiş olan UV yaşlandırma cihazında 3 mm'lik film kalınlığındaki numuneleri 10, 20, 30 ve 50 saat UV yaşlandırmasına tabi tutarak, bitüm deneyleri gerçekleştirilmiştir.

UV yaşlandırmasından elde edilen sonuçlarla geleneksel yaşlandırma yöntemlerinden elde edilen sonuçların kıyaslanması amaçlanmıştır. Yaşlandırılan bitüm numuneleri üzerinde Dönel Viskozite (RV), Penetrasyon, Yumuşama Noktası, Kuvvet Ölçerli Düktilite, Kiriş Eğme Reometre (BBR) ve Dinamik Kesme Reometre (DSR) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak gerçekleştirilen UV yaşlandırma cihazı ile standart RTFOT yaşlandırma deneyi sonuçlarının yaklaşık 10 saatlik UV yaşlanmasına eşdeğer olduğu ve UV cihazının kısa dönem bitüm yaşlanmasını iyi bir şekilde temsil ettiği görülmüştür.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Yapılan literatür özeti üç farklı alt bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde bitüm ve bitümlü bağlayıcılarda yaşlanma, ikinci bölümde UV indeksi ve UV yaşlanması ve üçüncü bölümde ise bitümün UV yaşlandırma mekanizmasıyla ilgili daha önce yapılmış çalışmaların özeti verilmiştir.

2.1 Bitüm Yaşlanması

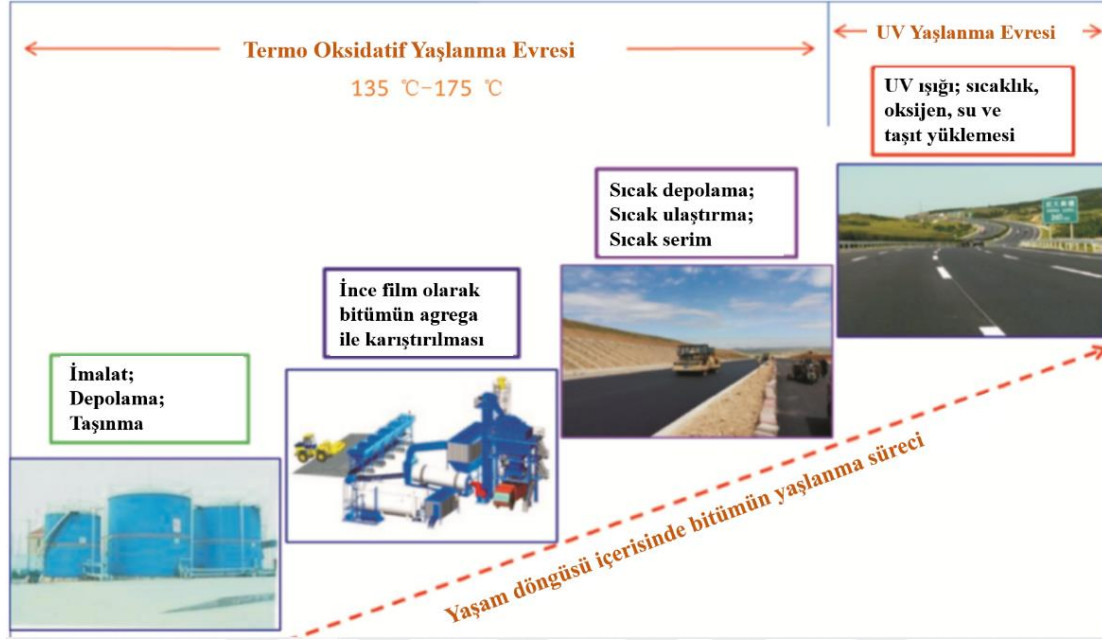
Bitümlü bağlayıcının asfalt kaplamanın performansını etkileyen en önemli özelliği dayanıklılığıdır. Bitümlü bağlayıcının dayanıklılığı sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Bitümlü bağlayıcının sertleşmesi ve kırılğan hale gelmesine de “yaşlanma” veya “zamana bağlı yaşlanma” denilmektedir (Duriez vd. 1961).

Yapılan ayrıntılı çalışmalar yaşlanmanın kısa dönem yaşlanma ve zamana bağlı yaşlanma olarak iki aşamada ortaya çıktığını göstermektedir. Kısa dönem yaşlanma, sıcak karışımın depolanma, plentte taşıma, plentte karıştırılma, şantiyeye taşıma, serilme ve sıkıştırılma işlemleri esnasında; uzun dönem yaşlanma ise, yolun servis ömrü boyunca oluşan yaşlanmadır.

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

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

Yaşam döngüsü sürecinde bitümün yaşlanma süreci Şekil 2.1’de görülmektedir (Li vd. 2022).



Şekil 2.1 Yaşam döngüsü içerisinde bitümün yaşlanma süreci (Li vd. 2022).

Traxler (1961), yukarıda sayılan etkilerin zaman içinde değiştiğini belirtmiştir. Daha sonraki yapılan çalışmalar yukarıdaki dört maddeye ek olarak yapı içerisinde gerçekleşen yaşlanma (tikotropi), yağ yayılması (sinersis), polimerleşme, parçalanma, nükleer enerjideki değişim, suyun etkisi, agrega tarafında absorbe edilme, mikrobiyolojik bozulma, ara yüzeyde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ve katalizör etkisi olarak arttırılmıştır (Çizelge 2.1.).

Çizelge 2.1 Bitüm yaşlanmasını etkileyen mekanizmalar (Traxler 1961).

Bitüm yaşlanmasını etkileyen faktörler	Aşağıdakilerden etkilenir					Meydana gelir	
	Zaman	Isı	Oksijen	Güneş ışığı	Beta ve gama ışınları	Yüzeyde	Karışım içinde
Oksidasyon (karanlıkta)	✓	✓	✓	-	-	✓	-
Foto-oksidasyon (güneş ışığında)	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
Buharlaşma	✓	✓	-	-	-	✓	✓
Foto-oksidasyon (yansıyan ışıkta)	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
Foto-kimyasal (direkt ışıkta)	✓	✓	-	✓	-	✓	-
Foto-kimyasal (yansıyan ışıkta)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Polimerizasyon	✓	✓	-	-	-	✓	✓
Sterik veya fiziksel	✓	-	-	-	-	✓	✓
Yağların eksüdasyonu	✓	✓	-	-	-	✓	-
Nükleer enerji ile değişme	✓	✓	-	-	✓	✓	✓
Suyun etkisi	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
Katı tarafın absorpsiyonu	✓	✓	-	-	-	✓	✓
Katı bir yüzeyde bileşenlerin emilmesi	✓	✓	-	-	-	✓	-
Kimyasal reaksiyon	✓	✓	-	-	-	✓	✓
Mikrobiyolojik bozulma	✓	✓	✓	-	-	✓	✓

Yukarıda sayılan faktörler arasında 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 giderilememektedir (Şengöz ve Açar 2010).

Oksidasyon, servis altında bitüm sertleşmesinin en önemli nedeni olarak kabul edilir. Birçok organik madde gibi, bitüm de atmosferik oksijenle temas ettiğinde yavaşça oksitlenir. Oksijen içeren polar gruplar oluşur ve bunlar daha yüksek misel ağırlıklı misellerle (kolloidal bir çözeltideki moleküllerin bir araya gelmesiyle) birleşme eğilimi gösterir. Böylece bitümün viskozitesi arttırılır. Oksijenin bitüm molekülleri ile reaksiyonu, karbonil türlerinin oluşumuna neden olur bu da bitümü daha sert ve daha az esnek hale getiren daha büyük ve daha karmaşık moleküller ile sonuçlanır. Oksidasyon derecesi, sıcaklığa, maruz kalma süresine ve bitüm filminin kalınlığına büyük ölçüde bağlıdır. Oksidasyon hızı, 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıkta her 10 °C'lik artış için iki katına çıkar. Oksidasyona bağlı sertleşme, uzun süredir yaşlanmanın ana nedeni olarak kabul edilmekte ve diğer faktörlere yeterince önem verilmemektedir. Bununla birlikte, diğer faktörlerin oksidasyondan genellikle daha az önemli olmasına rağmen, ölçülebilir oldukları gösterilmiştir (Hunter vd. 2015).

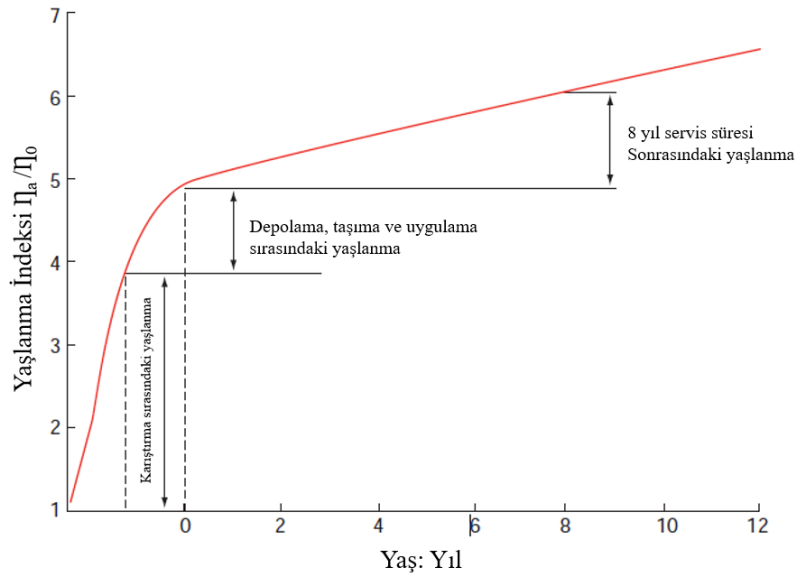
Uçucu bileşenlerin buharlaşması esas olarak sıcaklığa ve maruz kalma koşullarına bağlıdır. Buharlaşma hızı, difüzyon hızı ve difüzyon yolunun uzunluğu veya kalınlığı ile kontrol edilir. İyi sıkıştırılmış yoğun asfalt, yavaş bir difüzyon sürecine sahip olurken, açık agrega gradasyonlu asfaltlar ve yüzey kaplamaları daha hızlı buharlaşma koşulları sunacaktır. Bununla birlikte, kaplama sınıfı bitümler nispeten uçucudur ve bu nedenle uçucu maddelerin buharlaşmasından kaynaklanan sertleşme genellikle oldukça küçüktür (Hunter vd. 2015).

Sterik sertleşme olgusu ilk olarak 1944'te Traxler tarafında 25 °C'de depolanan bitüm numunelerinin viskozitede artış gösterdiğinin gözlemlenmesiyle rapor edilmiştir. Bu fiziksel sertleşme genellikle bitüm içindeki moleküllerin yeniden yönlendirilmesi veya yeniden yapılandırılması ile vaksların yavaş kristalleşmesinin bir kombinasyonuna atfedilir. Sertleşme etkisine neden olan moleküller yeniden yönlendirme, ısı uygulamasında tersine çevrilebilir; Traxler, depolama sıcaklığının 70°C'ye

yükseltilmesinin, bitüm numunesinin orijinal viskozitesine geri dönmesiyle değişen yapıyı tersine çevirdiğini belirtti (Hunter vd. 2015).

Eksüdatif sertleşme, bitümden sızan yağlı bileşenlerin mineral agregaya hareketinden kaynaklanır (Valkering vd. 1989). Hem bitümün eksüdasyon eğiliminin hem de agreganın gözenekliliğinin bir fonksiyonudur (Hunter vd. 2015).

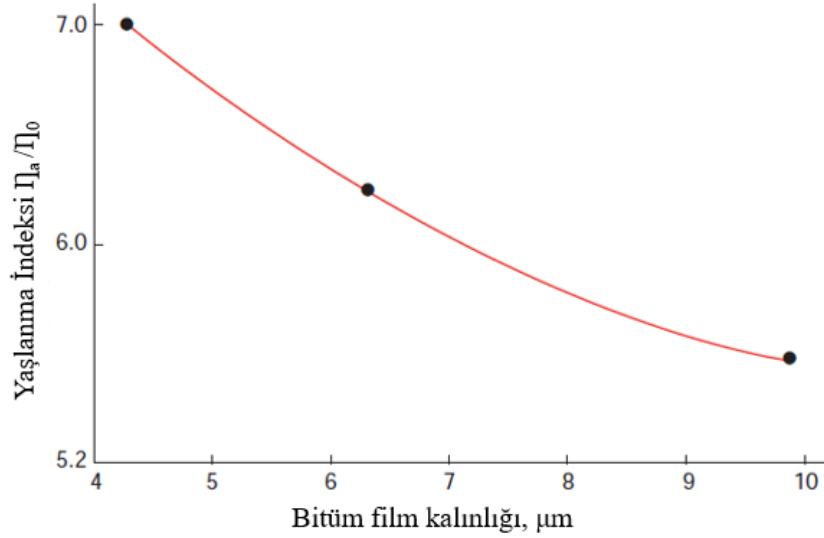
Karıştırma sırasında ve daha az ölçüde sıcak depolama ve nakliye sırasında önemli miktarda bitüm sertleşmesi meydana gelir. Bununla birlikte, bağlayıcının sertleşmesi, bir sınır değere ulaşılan kadar üstyapıda devam edecektir. Bu davranış ‘uzun dönem yaşlanma’ olarak tanımlanır ve karıştırma, depolama, taşıma, serme ve belirli bir süre servis verdikten sonraki bitümün yaşlanma indeksi Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Bitümün karıştırma, daha sonra depolama, taşıma ve uygulama sırasında ve belirli bir süre servis verdikten sonraki yaşlanması (Hunter vd. 2015).

Benzer şekilde, Şekil 2.3 bitüm filminin kalınlığının azaltılmasının bitümün yaşlanma indeksini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Yaşlanma indeksi, yaşlandırılmış

bitümün viskozitesinin (η_a) işlenmemiş bitümün viskozitesine (η_o) oranı olarak tanımlanan yaşlanma indeksi ile ölçülür. Yaşlanma indeksinin temelde tanımlanmış bir parametre değildir. Genellikle farklı zamanlarda ölçülen iki değer (örn. Viskozite, sertlik veya penetrasyon) oranıdır (Hunter vd. 2015).



Şekil 2.3 Yaşlanma indeksi üzerinde bitüm film kalınlığının etkisi (Hunter vd. 2015).

Kullanılan mikserin tipi de karıştırma sırasındaki sertleşme miktarını etkiler. Bir tamburlu karıştırıcıdaki sertleşme miktarının, geleneksel bir beç tipi karıştırıcıda meydana gelenden daha az olduğu bilinmektedir (Haas 1974). Bunun nedeni, tamburda oksijen mevcudiyetini sınırlayan buharın bulunmasıdır. Bununla birlikte, farklı tamburlu karıştırıcı tasarımlarının çokluğu, farklı tesis tasarımları arasındaki sertleşme miktarındaki değişimin neredeyse kaçınılmaz olduğu anlamına gelir. Modern tamburlu karışım tesisleri, özellikle karşı akışlı tamburlu karışım ve çok yüksek karıştırma verimliliğine sahip çift tamburlu konfigürasyonlar, eski tamburlu karışım tesislerine kıyasla bitümün sertleşmesiyle sonuçlanır. Bununla birlikte, Shell Bitumen (1973) tarafında iki farklı tamburlu karıştırıcı üzerinden gerçekleştirilen bir çalışma, eşdeğer karıştırma sıcaklıkları için, penetrasyondaki toplam azalmanın ve yumuşama

noktasındaki artışın, geleneksel bir kesikli karıştırıcıda meydana gelenin yarısından daha az olabileceğini göstermiştir (Hunter vd. 2015).

Yolun yüzeyindeki bitüm, kaplamanın kütledeki bitüme göre çok daha hızlı sertleşir. Bunun üç sebebi vardır:

- Sürekli taze oksijen kaynağının varlığı
- Yol yüzeyinde ara sıra yüksek sıcaklıkların görülme sıklığı
- Ultraviyole radyasyon ile bitümün foto-oksidasyonunun oluşumu

Foto-oksidasyon, bitüm filminin yüzeyinde 4-5 mm kalınlığında bir kabuğun hızla oluşmasına neden olur. Bu, bir bitüm filminin üst 10 mm'lik kısmına emildiğine inanılan doğal ultraviyole radyasyon tarafında indüklenir. Kabuk oluşumunun oksijen emilimini ve uçucu madde kaybını geciktirebildiği gösterilmiştir. Bununla birlikte, oksitlenmiş malzeme yağmur suyunda çözünür ve aşınarak temiz bitüme maruz kalmasına neden olabilir (Hunter vd. 2015).

Asfalt malzemesinin uzun süreli yaşlanma sürecinde, ultraviyole radyasyon asfaltta kimyasal bileşenlerin fotokimyasal reaksiyonları ve faz yapısı göçünü tetikleyen önemli bir faktördür. Bu durum bitüm malzemesinin sertleşmesine ve yapışmasının azalmasına neden olmaktadır (Zhang vd. 2016). Güçlü UV radyasyonu ve atmosferik oksijenin etkisi altında bitüm sertleşerek performansı düşmekte bu durum kaplamalarda çatlaklara, gevşemelere, dökülmelere, soyulmalara ve diğer sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunların ortaya çıkmasıyla beraber oksijen mevcut çatlaklardan yavaş yavaş aşağıya doğru nüfuz ederek bitüm kaplama tabakasını sürekli okside etmektedir. Mevcut araştırmalar, atmosferik oksijenin yüzeyin 15 mm altına kadar nüfuz edebileceğini göstermiştir (Yi-Qiu vd. 2008).

Asfalt teknolojisinde, asfaltın kompozisyonu ve yapısı tam olarak anlaşılmış değildir. Bunun nedeni, diğer organik malzemelere kıyasla asfalt kimyasının çok karmaşık olmasıdır. Bitümlü bağlayıcının kompozisyonuna bakıldığında, asfaltlar, doymuş

hidrokarbonlar, aromatikler ve polar aromatiklerden oluştuğu görülmektedir (Tuffour vd. 1989). Yapılan araştırmalar, yaşlanma işlemi sırasında bağlayıcıda daha fazla asfaltan bileşenlerinin oluştuğunu, doygun bileşen yüzdelerinin değişmediğini göstermiştir. Ayrıca polar ve naftan aromatik yüzdelerinin de düştüğü ortaya çıkmıştır (Şengöz 2003). Burada görüldüğü gibi bitümün UV yaşlanmasının araştırılması çok karmaşık, zaman alıcı ve zordur. Bu nedenle laboratuvardaki yaşlandırma cihazları bitümün UV yaşlanma özelliklerini incelemek için hala en etkili yöntemlerden birisidir.

2.2 UV Yaşlanması ve UV İndeksi

2.2.1 UV Yaşlanması Nedir?

“Güneş ışınlarının enerjisi, 200 ile 3000 nm dalga uzunluğu bandları arasında yer alan elektromagnetik radyasyon biçiminde olduğu Hayton vd. (1999) tarafından dile getirilmiştir (Ahmedzade vd. 2007).” Güneş kaynaklı radyasyonun yaklaşık olarak %7’si morötesi (UV), %42’si görülebilir band ve %5’i kızılötesi (IR) radyasyon olarak yeryüzüne ulaşmaktadır.

Çıplak gözle görülemeyen, farklı dalga boylarındaki güneş ışınlarına ultraviyole (morötesi) denilmekte, kısaca UV olarak ifade edilmektedir. UV ışığı görünür ve kızılötesi ışığa kıyasla daha kısa dalga boyuna ancak daha yüksek bir enerjiye sahiptir. Organizma üzerindeki etkileri açısından, UV radyasyonu araştırmacılar tarafında üç aralığa bölünmüştür. UV-A (315-400 nm), UV-B (315-280 nm) ve UV-C (280-200 nm). UV-A, bitümdeki kovalent bağları kırabilmesinden dolayı bitümün yaşlanmasını sağlayan ana enerji kaynağıdır. UV-B’nin %95’i ve UV-C’nin ise tamamı ozon tabakası tarafından engellenerek dünya yüzeyine neredeyse hiç ulaşmamaktadır.

Foto-oksidasyon ise UV radyasyonu veya yapay ışık gibi ışımaya enerjisinin kolaylaştırdığı moleküler oksijen veya ozon varlığında bir materyalin bozulması olayıdır. Güneş ışınları

asfalt kaplama yüzeyine ulaştığında, serbest radikal reaksiyonlar oluşturmakta ve kaplama yüzeyinde oksitlenmiş bir tabaka meydana getirmektedir (Durrieu vd. 2007). Oluşan bu tabaka bitümü daha sert ve kırılğan hale getirmekte kaplamanın fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir.

Ultraviyole radyasyonun asfalt tabakası üzerindeki yaşlandırma etkisi genellikle göz ardı edilmiştir. Çünkü bitümün yüksek emisyon katsayısı nedeniyle sadece esnek kaplamanın üst katmanlarını etkilediğine inanılmaktadır (Airey 2003). 1950 yıllarında bir maruziyet testi gerçekleştirilmiş ve güneş radyasyonunun etkisinin bitümün doğasına bağlı olduğu bulunmuştur. Daha sonraki araştırmalar UV radyasyonunun asfalt kaplamanın aşınma tabakasının yaşlanmasına etkisinin göz ardı edilemeyeceğini çünkü bu hareketlerin hızlı bir şekilde meydana geldiği bildirilmiştir (Duriez vd. 1961).

Günümüze kadar bitümlü bağlayıcının foto-oksidasyonun neden olduğu bozulmayı nicel olarak değerlendiren standart bir test yoktur. Ancak birçok araştırmacı, çeşitli koşullar altında farklı UV yaşlandırma yöntemleri kullanarak araştırma yapmışlardır. Belirli standardın olmaması laboratuvar ortamında yapılan UV yaşlandırma testlerini farklı noktalara götürmüş ve yaşlanmanın tek bir parametreye bağlı olmadığını ortaya koymuştur. UV yaşlanma sürecinde; sıcaklık, UV radyasyon yoğunluğu, UV radyasyon türleri, numune kalınlığı ve kullanılan bitümün sınıfı gibi birçok faktör bitümün UV yaşlanma indeksini etkileyebilmektedir. Laboratuvar ortamında yapılan farklı yaşlanma koşullarını içeren parametreler Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Önceki araştırmalarda bitümlerin UV yaşlandırmasında kullanılan parametreler.

Yazar ve Yayın Yılı	UV yoğunluk	Dalga boyu (nm)	Sıcaklık (°C)	Yaşlanma süresi (saat)	Film kalınlığı (mm)	Işık şiddeti (W)	UV lamba ve numune mesafesi (mm)
Ye vd. (2006)	3.08 W	313	40	16	-	-	-
Yu vd. (2009)	-	340	80	0-432	2	500	500
Zhang vd. (2011)	8×10^{-4} W/cm ²	-	80	288	2	50	500
Wu vd. (2012)	0.015 W/cm ²	-	50	144	1.250	-	-
Zhang vd. (2012)	8×10^{-4} W/cm ²	365	80	288	2	500	500
Feng vd. (2013)	8×10^{-4} W/cm ²	365	60	144	3	500	-
de Sá vd. (2013)	$0,35 \times 10^{-4}$ W/cm ²	340	60	10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200	-	3500-6500	-
Cong vd. (2013)	0.45×10^{-4} W/cm ²	340	60	168	3	500	-
Kuang vd. (2014)	0.95×10^{-3} ve 1.2×10^{-3} W/cm ²	365	60	168	3	500	-
Liu vd. (2014)	0.01 W/cm ²	-	50	192	1.250	-	-
Zeng vd. (2015)	0.5×10^{-3} W/cm ²	365	30, 50 ve 70	480	1.2	250 (4 adet)	-

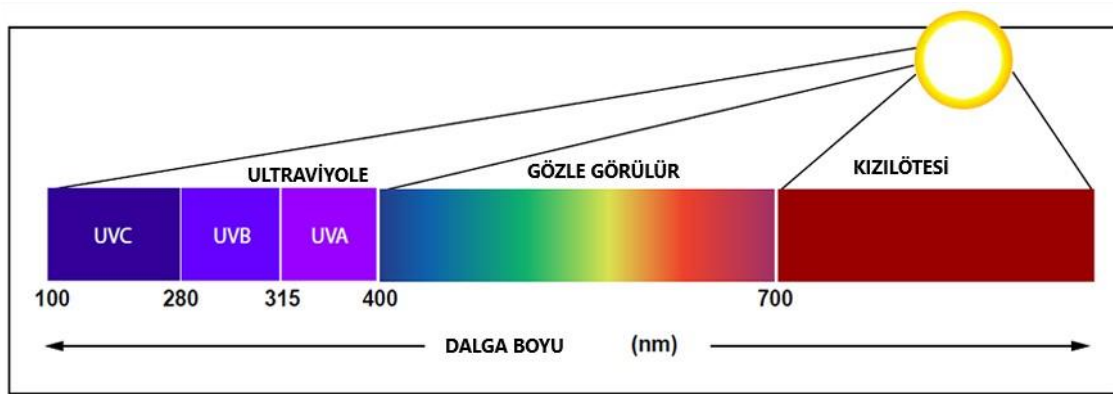
Çizelge 2.3 Önceki araştırmalarda bitümlerin UV yaşlandırmasında kullanılan parametreler (Devam).

Yazar ve Yayın Yılı	UV yoğunluk	Dalga boyu (nm)	Sıcaklık (°C)	Yaşlanma süresi (saat)	Film kalınlığı (mm)	Işık şiddeti (W)	UV lamba ve numune mesafesi (mm)
Xu vd. (2015)	1.2×10^{-3} W/cm ²	-	60	216	3.2	500	-
Zhang ve Zhang (2015)	8×10^{-4} W/cm ²	-	60	288	2	500	450
Liu vd. (2015)1	0.01 W/cm ²	-	50	144	1.250	-	-
Liu vd. (2015)	0.008 W/cm ²	-	50	96	1.250	-	-
Feng vd. (2016)	0.0012 W/cm ²	365	60	144	2	500	-
Feng vd. (2016)	1.2×10^{-3} W/cm ²	365	60	6, 12 24 ve 48	-	-	-
Zhang vd. (2016)	0.002 W/cm ²	365	60±3	168	-	500	-
Li vd. (2020)	0.42×10^{-4} W/cm ²	-	68±3	0, 50, 100, 150 ve 200	-	-	2300
Chen vd. (2020)	8×10^{-4} W/cm ²	365	50	0, 144, 216, 288 ve 360	3	-	-
Jiang vd. (2020)	1.14×10^{-2} W/cm ²	-	60	83	1.00±0.03	-	30000
Li vd. (2022)	21×10^{-4} W/cm ²	360	25	0-24	$2,56 \times 10^{-3}$ - $13,41 \times 10^{-3}$	-	-

2.2.2 UV Radyasyonu

Alman fizikçi Johann Wilhelm Ritter, 1801’de UV radyasyonunu keşfetti. Gümüş-klorürle ıslatılmış kâğıdın mor ucundaki görünür spektrumun hemen ötesindeki görünmez ışınlar maruz kaldığında hızlanan bir kararmasını gözlemledi. Bu ışınları, görünür spektrumun diğer ucunda keşfedilen “ısı ışınlarında” (IR) ayırt etmek için, gözlemlediği kimyasal reaktiviteyi vurgulayan UV radyasyonunu “oksitleyici ışınlar” olarak adlandırdı. Bunun yerini hızla 19. Yüzyılın geri kalanında popülerliğini koruyan “kimyasal ışınlar” terimini aldı. Sonunda, kimyasal ve ısı ışını terimleri, sırasıyla şimdi yaygın olan ultraviyole ve kızılötesi tanımlamalarıyla değiştirildi.

Elektromanyetik spektrumda, ultraviyole (UV) radyasyon, 100 nm ila 400 nm arasında bir dalga boyuna sahip olarak sınıflandırılır. Bu dalga boyları, görünür ışıktan daha kısa ve X-ışınlarında daha uzundur. UV ışığının üç sınıflandırması vardır: UVA 315 ile 400 nm arasında dalga boylarına sahiptir, UVB 280-315 nm arasında dalga boylarına sahiptir ve UVC 100 ile 280 nm arasında dalga boylarına sahiptir (İnt. Kyn. 2).



Şekil 2.4 UV dalga boyları (insan gözünün görebildiğinin hemen altındaki dalga boylarıdır) (İnt. Kyn. 3).

Güneşimiz 100 ila 400 nm spektrumda UV radyasyonu yayar. Dünya atmosferinin kenarında güneş ışığı yaklaşık %50 kızılötesi (IR), %40 görünür ve %10 UV ışığından oluşur. Güneş en yüksek noktasındayken Dünya yüzeyine ulaştığında, güneş ışığının

bileşimi %53 IR, %44 görünür ve %3 UV'dir. Yere ulaşan bu %3 UV'nin yaklaşık %95'i UVA ve %5'i UVB'dir. Bu değerler bulut örtü kalınlığı vb. atmosferik koşullara göre biraz değişebilir.

UVC dalga boylarının çoğu, üst atmosferdeki oksijen tarafında emilir ve daha sonra ozon tabakasında ozon üretir. Ozon tabakası UVB'nin çoğunu bloke eder ve UVC'nin geri kalanı zaten oksijen tarafından emilmez (İnt. Kyn. 2).

2.3 Konu ile İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar

Ye vd. (2006) bitüm yaşlanmasını iç ve dış ortamlarda karşılaştırmak için UV radyasyon yaşlanma testi yapmışlardır. Bu testlerden yola çıkarak ultraviyole foto-oksidasyon ve termal oksidasyonun bitüm performansı üzerinde etkisini incelemişlerdir. Dış ortamda yapılan yaşlandırma testi toplam güneş ışığı ultraviyole radyasyonu yılda 35 kJ/cm² ve yıllık ortalama sıcaklık 0.1 °C olan ortalama 3730 m yükseklikte yapılmıştır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirdikleri UV yaşlanma testi 13, 26, 39, 52 ve 65 gün boyunca gerçekleştirilmiştir. UV fırın her gün 05:30-21:30 saatleri arasında günde toplam 16 saat çalıştırılmıştır. İç mekân testleri için gereken süre, toplam güneş ışığı ultraviyole lambasına ve numune boyutlarına göre belirlemişlerdir. UV yaşlandırmanın yanında laboratuvar ortamında kısa dönem yaşlandırma için TFOT ve uzun dönem yaşlandırma için PAV testlerini de yapmışlardır. Test sonuçları 3 ay dış mekâna karşı 13 gün iç mekân ve 9 ay dış mekâna karşı 39 gün iç mekânda ölçülen özelliklerin genel olarak birbirine yakın olduğunu göstermiştir.

Wu vd. (2008) saf bitümü önce Dönen İnce Film Fırın (RTFO) tarafından yapılan kısa süreli yaşlandırma rejimine tabi tutmuşlar ardından sırasıyla Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV), UV radyasyonu ve doğal maruziyet ile gerçekleştirilen uzun vadeli yaşlandırma işlemine tabi tutmuşlardır. Hem termal hem de UV radyasyon yaşlanmasının UV radyasyon fırın testi sırasında gerçekleştiğini ve daha sonra özellikle bağlayıcı filmlerin

100 µm'den küçük olduğu zaman bitümün özelliklerinin etkisi üzerinde çok daha belirgin olduğunu göstermişlerdir.

Wu vd. (2009) farklı film kalınlıklarına sahip bağlayıcı numuneleri 50, 100, 200 ve 500 µm kendi kendine yapılan hızlandırılmış yaşlandırma fırınında UV ışığı ile farklı sürelerde (0, 48, 96 ve 144 saat) yaşlandırmışlardır. Yaşlandırılmış numunelerin termal, kimyasal ve reolojik özellikleri sırasıyla Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC), Fourier Dönüşümlü Kızıl Spektroskopisi (FTIR) ve Dinamik Kayma Reometrisi (DSR) ile karakterize etmişlerdir. Yapılan yaşlandırma testi ile asfalt bağlayıcıların yaşlanma derecelerinin esas olarak numunenin yaşlandırma süresi ve film kalınlıklarıyla ilgili oldukları sonucuna varmışlardır.

Zhang vd. (2012) yaşlanmanın bitüm morfolojisi üzerindeki etkisini atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile araştırmışlar ve yaşlanmanın bitüm morfolojisini önemli ölçüde etkilediğini göstermişlerdir.

Feng vd. (2013) farklı kökenlerden üç bitüm ve farklı tipte iki UV emici ile bitüm/UV emici bileşikler hazırlayarak UV emicilerin bitümün fiziksel özellikleri ve fotostabilitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. UV emicilerin bitümün stabilitesi üzerindeki etkisi, bitümün kaynağına ve UV emicinin tipine bağlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca farklı kökenlerden gelen bitümün farklı UV emiciler için spesifik seçicilik gösterdiğini bulmuşlardır.

Hu vd. (2018) (1) bitümde TFOT ve UV yaşlandırma etkisini karşılaştırmak için iki farklı tip kalınlıkta farklı şekillerde UV yaşlandırması yapmışlardır. Test sonuçları, bitüm kalınlığı 3 mm olduğunda TFOT'un UV radyasyonundan daha şiddetli bir etkiye sahip olduğunu ve bitüm kalınlığının yaşlanma derecesi üzerinde büyük bir etkisi olduğunu göstermiştir. Farklı yaşlandırma prosedürünün sonuçları, UV yaşlandırma yönteminde deneysel analizler için öncelikle TFOT yapılmasının daha uygun olduğunu göstermiştir.

Hu vd. (2018) (2) UV radyasyonu ile bitüm UV yaşlandırma derinliği arasındaki ilişkiyi araştırmak için üç grup numuneye farklı yaşlandırma prosedürleri uygulayarak UV yaşlandırmasına tabi tutmuşlardır. İlk numune grubu, yaşlandırma derinliğinin yaşlandırma süresi ile artıp artmayacağını araştırmak için tasarlanmıştır. İkinci numune grubu, UV radyasyonu olan ve olmayan numuneler arasındaki yaşlanma etkisini araştırmak için kullanılmıştır. Üçüncü ve son numune grubu, bitümün yaşlanma süresi ile UV geçirgenliğini incelemek için kullanılmıştır. Birinci gruptan elde edilen sonuçlar, UV yaşlandırma derinliğinin yaşlandırma süresi ile birlikte arttığını göstermiştir. İkinci grubun sonuçları, ozonun yaşlanma etkisinin küçük olduğunu ve yaşlanma derinliğindeki artışın ozonla ilişkisiz olduğunu göstermiştir. Üçüncü gruptan elde edilen sonuçlar ise UV yaşlandırma sonrasında bitümün geçirgenliğinin arttığını ve yaşlandırma derinliğinin artmasının asıl sebebinin geçirgenlik olduğunu göstermiştir.

Zeng vd. (2018) asfaltın UV yaşlandırma derinliğini Ultraviyole Spektrofotometre Testleri (UST) ve soyma yöntemi ile araştırılmıştır. UST istatistikleri, asfalt kalınlığının yaklaşık 4.5 μm olduğunda asfaltın geçirgenliğinin %0'a ulaştığını ortaya koymuştur. Peeling yönteminde ise eskitilmiş asfalt karbon disülfid kullanılarak katman katman soyulmuş daha sonra soyulmuş eskitilmiş asfaltların özellikleri Dinamik Kesme Reometresi ile gerçekleştirilen ve dört bileşen testi ile değerlendirilmiş ve soyulmuş eskitilmiş asfaltların değişen özellikleri, üst yüzeydeki eskitilmiş asfaltın alt kısım asfaltına yayıldığını göstermiştir. Tüm sonuçlar, UV radyasyonunun yalnızca sınırlı asfalt derinliğini yaşlandırabileceğini ve alt asfaltın (4.5 μm 'nin altında) yaşlanma olgusunun, 4,5 μm kalınlığındaki yüzey yaşlandırılmış asfaltın difüzyonundan kaynaklandığını göstermişlerdir.

Chen vd. (2020) farklı UV radyasyon yaşlanma periyotlarına maruz kalan 3 mm kalınlığındaki asfalt filmleri, soyma işlemleri ile ortalama üç katmana ayırmışlar daha sonra farklı asfalt katmanları üzerinde reolojik özellikler, moleküler boyut dağılımları, kimyasal fonksiyonel grup içerikleri ve floresans testleri yapılmıştır. Sonuçlar, reolojik indekslere göre, 6 günlük UV yaşlanmasının etkisinin neredeyse ihmal edilebilir olduğunu, ancak UV yaşlanma derinliğinin 9 günlük UV yaşlandırma döneminden sonra

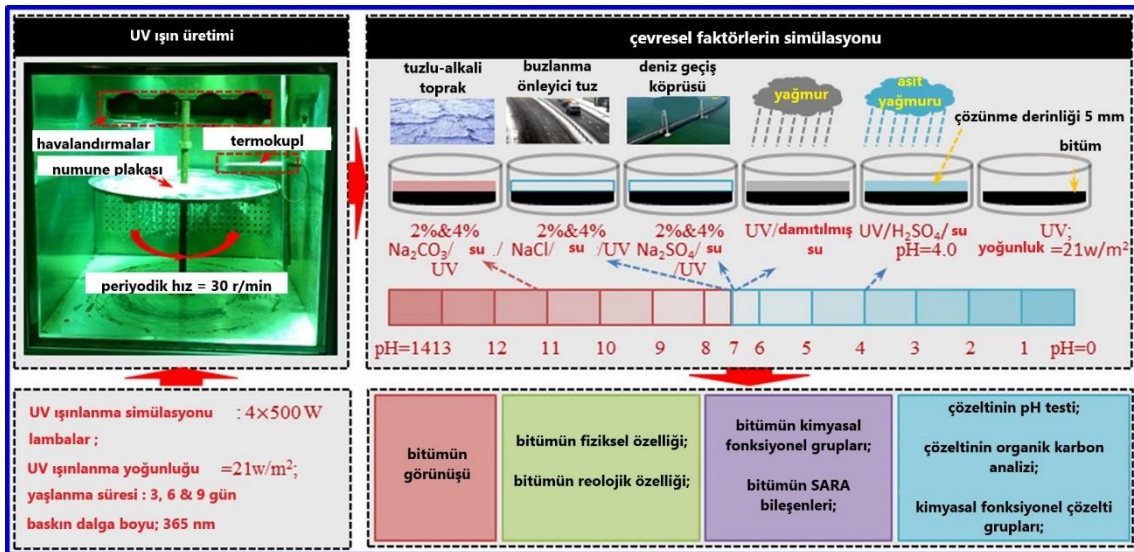
1 mm'yi aşabileceğini ve 15 günlük UV yaşlandırma döneminden sonra 2 mm'yi aşabileceğini göstermektedir.

Hung vd. (2020) çalışmalarında Birleşik Atom Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve Foto-termal Kızılötesi (AFM-IR) spektroskopisi kullanarak bitümün yaşlanmayan ince filmlerinin ve UV ile eskitilen bitümün ince filmlerinin yüzeylerinin morfolojisini ve kimyasal bileşimini incelemişler ayrıca Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi ile ölçülen toplu özellikleriyle karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçları hem yaşlandırılmamış hem de UV ile yaşlandırılmış malzeme için yığına kıyasla bitüm yüzeyinde kimyasal bileşiminde önemli farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. 50 saat UV'ye maruz kaldıktan sonra, daha küçük doymuş hidrokarbonlar zamanla buharlaşabilecekleri yüzeye nüfuz etmeye başlamıştır.

Jiang vd. (2020) modifiye bitümlerin, ultraviyole yaşlanma karşıtı performansını iyileştirmek için saf bitüme nadir toprak oksit La203 eklenerek numune hazırlamışlardır. Bitümün ultraviyole yaşlanma sürecini simüle etmek için bir ultraviyole yaşlandırma cihazı kullanılmıştır. Ultraviyole yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış bitüm daha sonra ultraviyole yaşlanma derecesini hem makro hem de mikro perspektiflerden değerlendirmek ve La203'ün anti-ultraviyole yaşlanma performansı üzerindeki etkisini analiz etmek için deneye tabi tutulmuştur. Numuneler üzerinde Dinamik Kayma Reometrisi, Kiriş Eğme Reometrisi Deneyleri yapılmış ayrıca kızılötesi spektrum ve taramalı elektron mikroskobu ile numuneler incelenmiştir. Sonuçlar, saf bitüm ile karşılaştırıldığında, ultraviyole yaşlandırmadan sonra %1-3 La203 modifiye bitümün kompleks kesme modülü, sünme sertliği, sünme hızı ve sülfoksit indeksinin aynı yaşlandırma koşulu altında azaldığını göstermiştir. La203 içeriği %2 olduğunda, modifiye bitüm yaşlanma derecesi en düşüktü ve karmaşık kesme modülü, sünme sertliği ve sünme hızı oranları sırasıyla 1.26, 1.09 ve 0.87 olarak elde edilmiştir. Sülfoksit indeks artışı 0.07 iken, bakire bitümün karşılık gelen dört indeksi 1.44, 1.11, 0.85 ve 0.12'dir. SEM görüntü analizi, bitümün La203 ile modifikasyonunun fiziksel bir modifikasyon olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak bitümde homojen olarak dağıtılan La203, ultraviyole radyasyonu emebilir ve yansıtabilir, ultraviyole enerjisinin bitüm molekülleri tarafından

emilimini azaltabilir, ultraviyole yaşlanma karşıtı performansı iyileşebilir ve asfaltın hizmet ömrünü etkili bir şekilde uzatabilir.

Li vd. (2020) bitüm ve onun mekanizması üzerinde çevresel faktörlerin (UV radyasyonu, su ve farklı çözücülerin) olumsuz etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar bu nedenle, çok faktörlü birleştirme yaşlanma testinin, bitümün gerçek hizmet koşullarına daha yakın olduğunu belirtmişlerdir. Dokuz grup bağlama koşulu yaşlanma testi (UV radyasyonu ve asidik, alkali ve nötr çözeltiler) bitüm (Pen 60/80) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şartlandırma süreleri 3, 6 ve 9 gün olarak alınmıştır. Deneyden sonra, bu çevresel faktörlerin bitüm üzerindeki kupa tehlikeleri ve mekanizması analiz edilmiştir. Ayrıntılı olarak, bitümün görünüşünün, fiziksel ve reolojik özelliklerinin geçişi karakterize edilmiş, sonuçlar birleşik koşulların bitümün performansı üzerinde çok daha ciddi olumsuz etkileri olduğunu göstermiştir. Ayrıca olumsuz etki mekanizmasını ortaya çıkarmak için bitümün kimyasal fonksiyonel grupları ve bileşenleri incelenirken, kalan çözeltilerin pH değeri, organik karbon içeriği ve kimyasal fonksiyonel grupları da incelenmiştir. Analizler, birleşik yaşlanma mekanizmasının esas olarak üç kanal içerdiğini gösterir, bunlar bitümlü moleküllerin uyarılması ve kırılması, organik bileşenin çözeltilerde çözünmesi ve sızması ve alkali metal iyonlarının katalitik etkisidir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Çevresel faktörlerin bitüm üzerindeki olumsuz etkileriyle ilgili çalışma özeti (Li vd. 2020).

Yu vd. (2021) UV yaşlanma süresi ve yoğunluğunun, asfalt harcının performansına etkisinin değerlendirilmesi amacıyla stiren bütadien stiren (SBS) polimer modifiye AC-13 asfalt karışım harcı hazırlamışlardır. UV yaşlandırma sonrası asfalt harcının dinamik mekanik özelliklerini ve mikro yapı morfoloji özelliklerini değerlendirmek için eğilme modülü, dinamik modül ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) testleri yapılmıştır. Dinamik mekanik analize dayalı olarak, UV yoğunluğunun ve yaşlanma süresinin değerlendirmesi için eşdeğer dönüşüm denklemi geliştirmişlerdir. Sonuçlar; SBS ile modifiye edilmiş asfalt harcının eğilme modülünün UV yoğunluğunun ve yaşlanma süresinin artmasıyla arttığını ortaya koymuştur. SEM sonuçları ise asfalt harcının yüzey tabakasından tabanına kadar dört farklı aşama ile karakterize edilebilen kırışık, çatlak ve çukur gibi hasarların geliştiğini açıkça göstermiştir.

Li vd. (2022) çeşitli kalınlıklarda hazırladıkları bitümlü membranları, UV ışık geçirgenliği ve absorpsiyon özellikleri UV görünür spektrofotometrik ile araştırarak, UV yaşlanmasından sonra UV ışığının bitümdeki penetrasyon derinliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. UV ışığın bitüme nüfuz etme derinliği, artan UV yaşlanma süresi ile kademeli olarak artmıştır. Bitümdeki UV ışığı penetrasyon derinliği ile bitümün yaşlanma derinliği arasındaki ilişki analiz edilmiş ve UV yaşlanması sırasında bitümün UV yaşlanma derinliğinin gelişim mekanizmasını ortaya çıkarmak için bitümü üç bölümde yaşlanma modeli oluşturulmuştur. İlk bölüm, yüzey doğrudan eskitme kısmı, UV ışığının ulaşabilir kısmı, ikinci bölüm daha derin difüzyon eskitme kısmı, difüzyon etkisiyle yaşlanan kısım üçüncü bölüm ise iç yaşlandırılmamış kısım, UV ışığı ve difüzyon etkisinin olabildiği ama etkilenmediği kısım.

Bitümün UV yaşlanması üzerine yapılan diğer laboratuvar çalışmaları ve uygulanan diğer test yöntemleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 Bitümün UV yaşlanması üzerine yapılan diğer laboratuvar çalışmalarında kullanılan farklı test yöntemleri.

Yazarlar	Viskozite (25°C)	Yumuşama Noktası (°C)	Penetrasyon (25°C)	Süneklik	BBR	DSR	RTFOT	TFOT	PAV	AFM	FTIR	SEM
Durrieu vd. (2007)	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗
Wu vd. (2008)	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗
Wu vd. (2010)	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗
Zhang vd. (2012)	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗
Wu vd. (2012)	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Pang vd. (2014)	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗
Liu vd. (2014)	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Zhang ve Zhang (2015)	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗
Liu vd. (2015)	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗
Xiao vd. (2015)	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗
Xu vd. (2015)	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓
Feng vd. (2016)	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✗
Zhang vd. (2016)	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗
Zhang vd. (2017)	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✗
Hu vd. (2018)	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
Wei vd. (2019)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✓

Çizelge 2.5 Bitümün UV yaşlanması üzerine yapılan diğer laboratuvar çalışmalarında kullanılan farklı test yöntemleri (Devam).

Yazarlar	Viskozite (25°C)	Yumuşama Noktası (°C)	Penetrasyon (25°C)	Süneklik	BBR	DSR	RTFOT	TFOT	PAV	AFM	FTIR	SEM
Yu vd. (2019)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓
Li vd. (2019)	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗
Li vd. (2020)	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗
Jiang vd. (2020)	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Feng vd. (2021)	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗
Yu vd. (2021)	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓
Zhang vd. (2021)	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗
Li vd. (2022)	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Not 1: AFM: Atomik Kuvvet Mikroskoku

Not 2: SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Bitüm

Ultraviyole yaşlandırma için kullanılacak bitüm Aliğa rafinerisinde üretilmiş B50/70 penetrasyon sınıfı, Afyonkarahisar Belediyesi asfalt şantiyesinden 4 litre alınmıştır. Saf bitüm özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

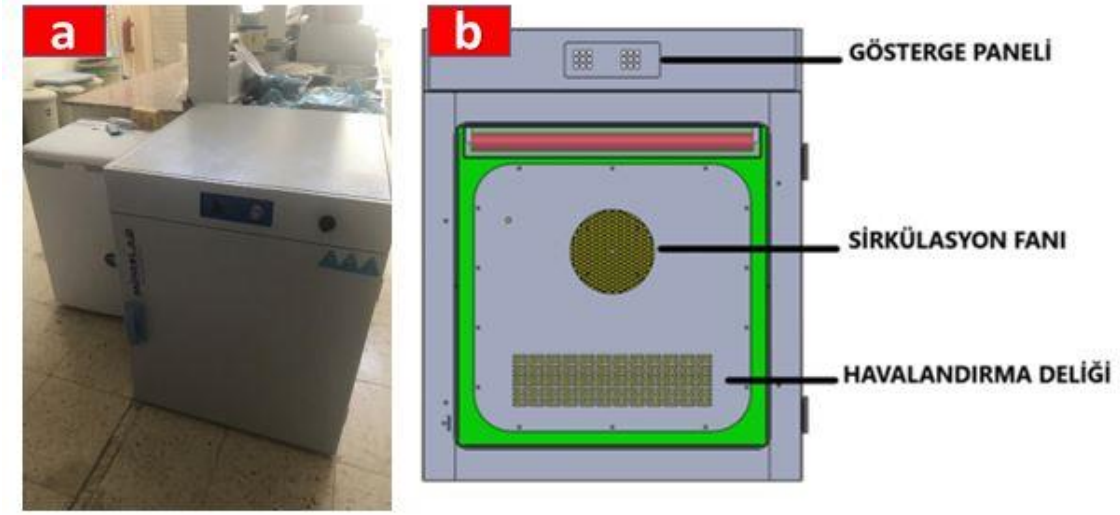
Çizelge 3.1 50/70 penetrasyon sınıfı saf bitümün özellikleri.

Özellikler	50/70	Standart
Özgül ağırlık	1.044	(ASTM D70-03 2003)
Penetrasyon Derecesi (25°C)	52.13	(ASTM D5-06e1 2006)
Yumuşama Noktası (°C)	44.90	(ASTM D36-06 2006)
Brookfield Viskozite 135 °C’de (cP)	455.00	
Brookfield Viskozite 150 °C’de (cP)	226.70	(ASTM D4402-06 2006)
Brookfield Viskozite 165 °C’de (cP)	124.13	

3.1.2 AKÜ Ultraviyole (UV) Yaşlandırma Cihazı

Ultraviyole yaşlandırma için kullanılacak cihaz kabini pirinç, çelik veya bakır kullanılmadan alüminyum veya paslanmaz çeliğin oksitlenmeyen alaşımları gibi maruz kalma sonuçlarını etkilemeyecek inert malzemelerden yapılmıştır. Kabin; ısı yalıtımlı, sızdırmaz ve dayanıklı bir yapıdadır. Kabin kapısı sıkı kapanan, yalıtımlı ve dayanıklı bir yapıda imal edilmiş olup kapı kulpu ergonomik ve dayanıklı bir yapıdadır. Kabin arkasında kapaklı ayarlanabilir havalandırma deliği ve sirkülasyon fanı bulunmaktadır.

Ayrıca kabinde aşırı sıcaklık, yüksek akım ve sızıntıya karşı koruma sistemleri bulunmaktadır. AKÜ UV yaşlandırma cihazının şematik göstergesi Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 a) AKÜ UV yaşlandırma cihazı, b) AKÜ UV yaşlandırma cihazı şematik gösterimi.

Kabin içi sabit sıcaklıkta (38 ± 3 °C - 100 ± 3 °C sıcaklık aralığında) tutulabilmekte ve kabin dışında bulunun dijital göstergedeki kontrol ünitesinden sıcaklık değeri ayarlanabilmektedir. Dijital göstergeden kabinin çalışma süresi ayarlanabilmekte ayrıca elektrik kesilmesi sonrasında yaşlanmayı durdurma ve yaşlanmaya devam etme seçenekleri bulunmaktadır. Kabinde hata durumunda, elektrik kesintisinde ve çalışma sıcaklığının sonunda sesli uyarı sistemiyle uyarı vermektedir.

Kabin içerisindeki raf yükseklikleri numune yüzeyinden farklı yüksekliklerde ayarlanabilir şekilde tasarlanmıştır. Kabin içerisinde 9 adet 7.4 watt gücünde UV lambası bulunmaktadır. Gösterge panelinden lambaların tamamının yanması, 5 adedin yanması ve hiçbir lambanın yanmaması olarak 3 adet seçenek bulunmaktadır.

3.1.3 Yaşlandırma Numunesi Kapları

AKÜ UV yaşlandırma cihazında maksimum alanı kullanabilmek için 2 adet büyük boy borosilikat cam tepsi, 2 adet küçük boy borosilikat cam tepsi ve 4 adet dairesel petri kabı kullanılmıştır. Kabin her tarafında bitüm kalınlığı 3 mm olacak şekilde içerisine bitüm yerleştirildi ve UV lambalarıyla numuneler arası mesafe 26 cm olacak şekilde ayarlandı. Kullanılan kapların ölçüleri ve içerisine konulan bitümlerin gramları çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 AKÜ UV yaşlandırma cihazında kullanılacak kapların ölçüleri, ağırlıkları ve yaşlandırılacak bitüm ağırlıkları.

Numune kapları	Ölçüler (cm)	Ağırlıkları (gr)	Bitüm (gr)
1.nolu borosilikat	20.86 x 20.86	797.59	92.10
2.nolu borosilikat	25.80 x 26.10	1357.31	130.02
3.nolu borosilikat	19.05 x 19.24	875.14	92.14
4.nolu borosilikat	25.20 x 25.60	1428.63	130.14
1.nolu petri kabı	Φ10.70	47.63	22.63
2.nolu petri kabı	Φ10.70	43.67	22.58
3.nolu petri kabı	Φ10.70	40.52	22.51
4.nolu petri kabı	Φ10.70	38.30	22.51



Resim 3.1 AKÜ UV bitüm yaşlandırma cihazı içerisine yerleştirilen bitüm numune tepsipleri.

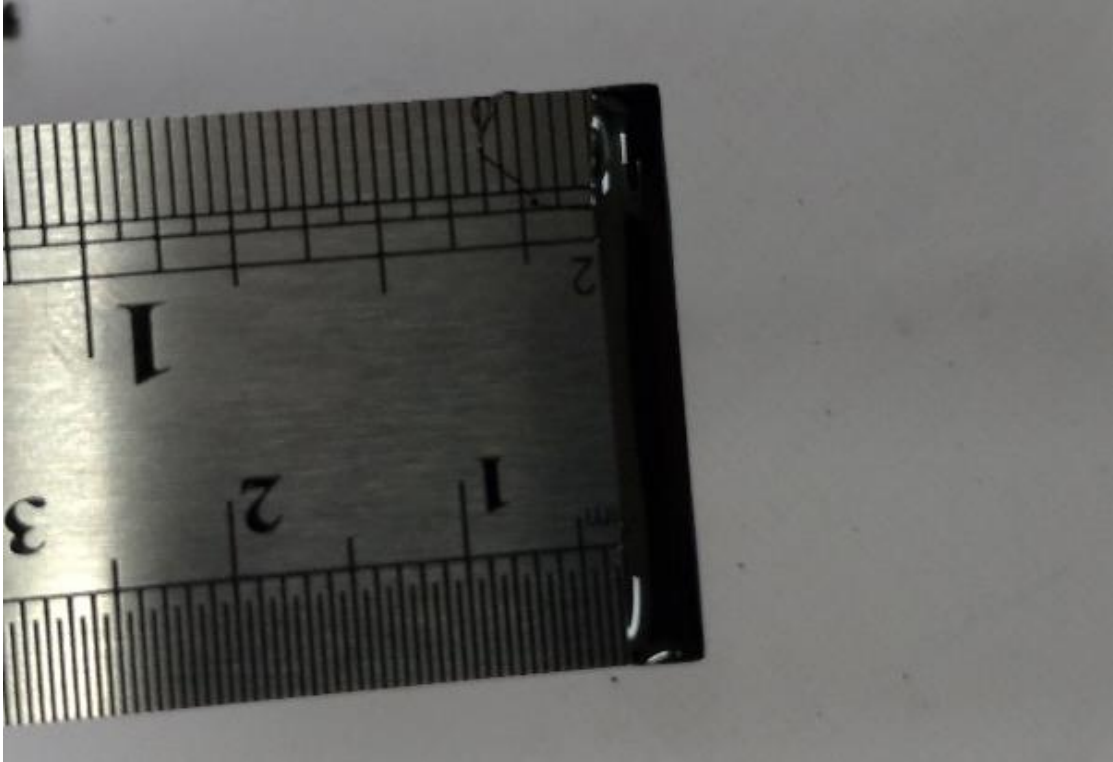
3.2 Yöntem

Bu tez çalışmasında kullanılacak B50/70 penetrasyon sınıflı bitüm örneğinin Özgül Ağırlık, Penetrasyon, Yumuşama Noktası ve Dönel Viskozite (RV) deneyleri Afyon Kocatepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Laboratuvarında, Basınçlı Yaşlandırma Deneyi (PAV), Dönen İnce Film Halinde Isıtma Testi (RTFOT), Kiriş Eğme Reometrisi (BBR), Kuvvet Ölçerli Düktilite ve Dinamik Kesme Reometrisi (DSR) testleri ise Karayolları Genel Müdürlüğü, Mersin 5. Bölge Müdürlüğü ARGE Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Hiç yaşlanmamış numune üzerinde viskozite, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yapılarak bitüm özellikleri belirlenmiştir. Kısa dönem ve uzun dönem

yaşlanmalarını simüle etmek için gerçekleştirilen RTFOT ve PAV deneyleri uygulanarak UV yaşlanma sonrası alınacak sonuçların karşılaştırılması hedeflenmiştir. Yaşlanmamış bitüm üzerinde düşük sıcaklıklardaki davranışını belirlemek için BBR, orta ve yüksek sıcaklıklardaki özelliklerini belirlemek ve aynı zamanda tekerlek izi ve yorulma çatlaklarına karşı gösterdiği direnci öğrenmek için DSR testleri uygulanmıştır.

Hu vd. (2018) (1) bitümde farklı tip kalınlıkta ve farklı şekillerde UV yaşlandırmasında bitüm kalınlığının 3 mm olduğunda TFOT'un UV radyasyonundan daha şiddetli bir etkiye sahip olduğunu ve bitüm kalınlığının yaşlanma derecesi üzerinde büyük bir etkisi olduğunu göstermiştir. Bu tez çalışmasında da bitüm kalınlığı kapların her tarafında 3 mm olacak şekilde ayarlanmıştır.



Resim 3.2 UV yaşlandırma kaplarındaki 3 mm bitüm kalınlığının ölçülmesi.

Zeng vd. (2015) yaşlanma sıcaklığının 50 °C altında olduğunda göz ardı edilebileceğini fakat 70 °C'ye yaklaştığında bazı etkilerin meydana geldiğini gözlemlediği için tez kapsamında çalışma sıcaklığı 60±2 °C olarak seçilmiştir.



Resim 3.3 AKÜ UV yaşlandırma cihazının çalışma sıcaklığı.

Daha önce yapılan çalışmalar kapsamında numune ve lamba arasındaki mesafenin 23 ile 50 cm arasında olması baz alınarak 26 cm yaşlanma mesafesi seçilmiştir. Gösterge panelinden “Veri 1” seçeneği işaretlenerek lambalarda 5 adedin çalışması sağlanarak UV ışın yoğunluğu hesaplanmış ardından saf bitüme verilecek UV dozu belirlenmiştir.



Resim 3.4 UV yaşlandırma cihazı içerisindeki bitüm numuneleri ve UV lamba mesafesi.



Resim 3.5 a) AKÜ UV yaşlandırma cihazı, b) AKÜ UV yaşlandırma cihazının lamba özellikleri.

UV dozu birim alan başına alınan UV enerjisi miktarıdır. UV yoğunluğu ise birim alanda ve birim zamanda alınan UV enerjisini ifade etmektedir. Yani;

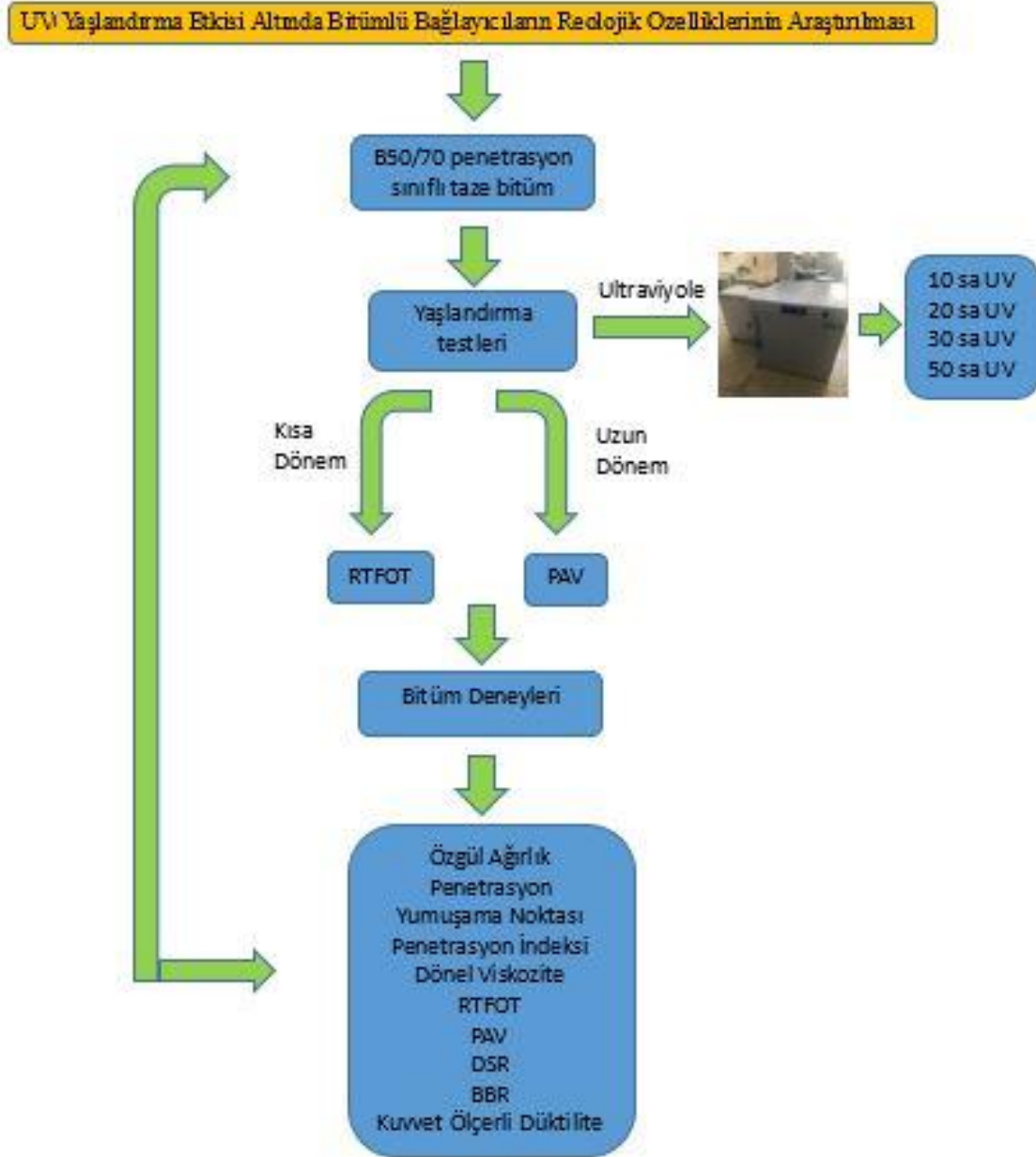
$$\text{UV dozu} \left(\frac{\text{joule}}{\text{m}^2} \right) = \text{UV ışın yoğunluğu} \left(\frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \right) \times \text{temas süresi (sn)} \quad (3.1)$$

$$\text{UV yoğunluk} = \frac{\text{UV lamba gücü} \times \text{lamba adedi}}{(\text{mesafe})^2} = 7.4 * \frac{5}{26^2} = 0.054 \text{ W/cm}^2 \quad (3.2)$$

Bu formül ışığında AKÜ UV cihazından verilecek enerji 0.054 W/cm^2 olarak hesaplanmıştır.

Bitüm AKÜ UV yaşlandırma cihazında ilk 10 saatlik yaşlanma sonucunda penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık ve viskozite testleri yapılmış yaşlanan bitümden bir

miktar ayrılarak, bunlar üzerinde RTFOT, PAV ve BBR ve DSR testleri için KGM Mersin 5. Bölge ARGE Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Sonraki aşamada gerçekleştirilen 20, 30 ve 50 saatlik yaşlanmalar için her test tekrarlanmıştır. Tez deneysel çalışmasına ait yöntem akış şeması resim 3.6'da özetlenmiştir.



Resim 3.6 Tez deneysel çalışmasına ait test yöntem akış şeması.

3.2.1 Bitüm Deneyleri

Bitüm özelliklerinin belirlenmesi için Özgül Ağırlık, Penetrasyon, Dönel Viskozite, Yumuşama Noktası, Kiriş Eğme Reometre (BBR), Dinamik Kesme Reometre (DSR), Dönen İnce Film Halinde Isıtma Testi (RTFOT) ve Basıncılı Yaşlandırma Testi (PAV) deneyleri yapılmıştır.

3.2.1.1 Özgül Ağırlık Deneyi

ASTM D70-03 (2003), yöntemi ile bitümün özgül ağırlığını belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Deney yapım aşamasına başlanılmadan bitüm yumuşama noktası sıcaklığının 90 °C'yi geçmeyecek şekilde etüvde ısıtılma işlemine tabii tutulur bu esnada piknometre kabı temizlenir. Piknometre kabı kapağı ile tartılarak darası belirlenir ve $A_{(bitüm)}$ olarak not edilir. Piknometre içerisine 25 ± 0.5 °C'de saf su ile doldurulup, kapağı kapatıldıktan sonra çevresi kurularak tekrar tartılır. Bu değer $B_{(bitüm)}$ olarak not edilir. Piknometre kapağı ile beraber etüvde kurutulup soğumaya alınır. Kurutulan kap içerisine 1/3 oranında bitüm ilave edilerek kapağı kapatılır ve tekrar tartılır. Bu değer bizim $C_{(bitüm)}$ değerimizi vermektedir. İçerisinde bitüm olan piknometre içerisine tamamen 25 ± 0.5 °C'de saf su ile doldurulup kapağı kapatılır ve sıcaklık hassasiyeti 25 ± 0.5 °C olan su banyosunda 30 dakika bekletilir. Su banyosundan çıkarılan piknometre içerisindeki eksilen su tamamlanıp dış yüzü kurulandıktan sonra tekrar tartılır. Tartım sonucu bize $D_{(bitüm)}$ değerini vermektedir. Bütün bu işlemlerin yapımı sırasında sudan kaynaklı hava kabarcıklarının olmamasına ve piknometre kabının çevresinin kuru olmasına dikkat edilmelidir.

Bitüm numunesinin zahiri özgül ağırlık değeri denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Zahiri Özgöl Ağırlık} = \frac{E_{\text{bitüm}}}{(B_{\text{bitüm}} - A_{\text{bitüm}}) - (D_{\text{bitüm}} - C_{\text{bitüm}})} \quad (3.3)$$

Burada;

$A_{\text{bitüm}}$ = Piknometre ağırlığı (gr),

$B_{\text{bitüm}}$ = Piknometre + su ağırlığı (gr),

$C_{\text{bitüm}}$ = Piknometre + bitüm numunesi ağırlığı (gr),

$D_{\text{bitüm}}$ = Piknometre + bitüm numunesi + su ağırlığı (gr)

Deneş aşamalarının özeti Resim 3.7' de gösterilmiştir.



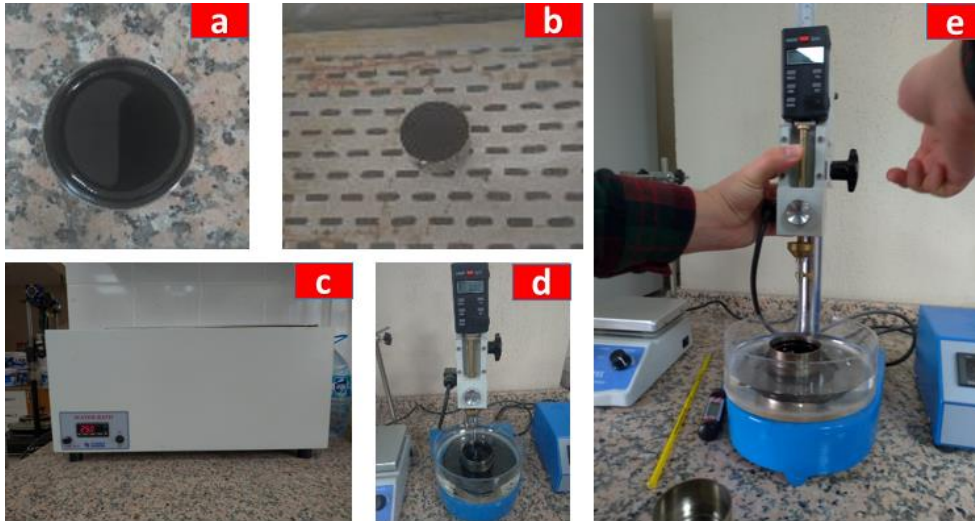
Resim 3.7 Bitüm Özgöl Ağırlık piknometresi deney aşamaları, a)deneyde kullanılacak piknometre kapları, b) boş piknometre kabının tartılması, c) su dolu piknometre kabının tartılması, d-e) piknometre kabı içerisine bitüm numunesinin doldurulması, f) bitüm dolu piknometre kabının tartılması, g) bitüm doldurulmuş piknometre kabının 25±0.5 °C su banyosunda 30 dakika bekletilmesi, h) su banyosundan çıkarılan piknometre kabının tartılması.

3.2.1.2 Penetrasyon Deneyi

ASTM D5-06e1 (2006) yöntemine göre standart uçlu bir iğnenin 25°C sıcaklıkta belirli bir yük altında belirli bir sürede düşey doğrultuda bitüm numunesine batma miktarını belirlemek ve bitümün kıvamlılığını tespit etmek amacıyla yapılmıştır.

Deney yapım aşamasına başlanılmadan önce deneyde kullanılacak penetrasyon kabı ve iğnesi temizlenir. Bitüm yumuşama noktası sıcaklığının 90 °C'yi geçmeyecek şekilde etüvde ısıtılma işlemine tabii tutulur. Bitüm numunesi penetrasyon kabına aktarıldıktan sonra 1-1.5 saat oda sıcaklığında bekletilip ardından 25 °C'ye ayarlanmış su banyosunun içerisine yerleştirilir. Su banyosunda 1-1.5 saat bekletilen bitüm numunesi penetrasyon cihazına yerleştirilerek penetrasyon iğnesi ile numunenin yüzey teması sıfırlanacak şekilde iğne yüksekliği ayarlanır ve 5 saniye süre boyunca iğne serbest düşmeye bırakılır. İğnenin her batmasından sonra iğne ucu benzin ile temizlenir. Kenarları yaklaşık 1 cm uzunluğunda eşkenar üçgen oluşturacak şekilde iğne numuneye batırılır ve 3 adet okuma yapılarak okunan değerlerin ortalaması alınır.

Deney aşamalarının özeti Resim 3.4'te verilmiştir.



Resim 3.8 Bitüm penetrasyon deney aşamaları a) numunenin oda sıcaklığında bekletilmesi, b-c) 25°C'ye ayarlanmış su banyosunda bekletilen numune, d) numunenin penetrasyon cihazına yerleştirilmesi, e) penetrasyon iğnesinin ayarlanması.

3.2.1.3 Yumuşama Noktası Deneyi

ASTM D36-06 (2006), yöntemi kullanılarak bitümün sıcaklık karşısındaki davranışı ve kıvamlılığını belirlemek için yapılmıştır.

Deneyin yapılış aşamasına başlanılmadan önce bitüm yumuşama noktası sıcaklığının 90°C üzerini geçmeyecek şekilde etüvde ısıtılma işlemine tabii tutulur. Bu esnada deneyde kullanılacak çelik plaka, yüzük ve bilyeler temizlenerek deneye hazır hale getirilir.

Deneyde çelik plaka üzerinden yüzüklerin kolay çıkmasını sağlamak için, plaka çok ince bir şekilde vazelin ile yağlanır. Yüzükler plaka üzerine yerleştirildikten sonra bitüm yüzük dışına taşmayacak şekilde dökülür ve oda sıcaklığında 30 dakika boyunca bekletilir. Başlangıç deney sıcaklığı 5°C olacak şekilde içi su dolu beher hazırlanır. Yüzükler cihaza uygun şekilde yerleştirilerek dakikada 5°C ısıtacak şekilde manyetik karıştırıcı ısıtıcı ayarlanır ve deneye başlanır. Beher içerisine atılan manyetik karıştırıcı balık, ısının beher içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlamaktadır. Bitüm, deney düzeneğinde yer alan taban yüzeye değdiği andaki termometredeki sıcaklık değeri okunur.

Deney aşamalarının özeti Resim 3.5'te verilmiştir.



Resim 3.9 Bitüm yumuşama noktası deneyi yapılış aşaması a) deneyde kullanılan aparatlar, b) bitümün yüzüklere yerleştirilmesi, c) yüzüklerin cihaz içerisine yerleştirilmesi ve deneye başlanması, d) bitümün düzeneğin taban yüzeyine teması.

3.2.1.4 Penetrasyon İndeksi

Penetrasyon İndeksi (PI), penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak hesaplanmaktadır. PI değeri genel olarak -1 ve +1 aralığındadır. Daha yüksek bir PI daha düşük sıcaklık hassasiyeti göstermektedir. PI hesaplaması denklem (3.4)'e göre yapılır (Hunter vd. 2015).

$$PI = \frac{1952 - 500 * \log(Pen_{25}) - 20 * SP}{50 - \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (3.4)$$

Burada;

Pen_{25} =25 °C'deki penetrasyon,

SP=Polimer Modifiye Bitümün (PMB) yumuşama noktası sıcaklığıdır.

3.2.1.5 Dönel Viskozite (RV) Deneyi

Bu deney, uygulama sırasında bitümün ısıtıldığı sıcaklık aralığı içerisindeki akma özelliğini belirlemek için ASTM D4402-06 (2006), yöntemine göre yapılmıştır. Bitümün karıştırma ve sıkıştırma sırasındaki akma özelliğini belirlemek için Brookfield Viskozimetre cihazı kullanılmaktadır. Bitüm numunelerinin sıcaklığa bağlı olarak reolojik özelliklerinden meydana gelen değişiklikleri belirlemek için yapılan Dönel Viskozimetre Deneyinde, viskozite ölçümleri 135, 150 ve 165 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Bitüm üzerinde uygulanan deneyde 135 °C'deki viskozite değerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir (Prowell vd. 2007). American Society for Testing and Materials (ASTM), asfalt karışımlarının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını hesaplamak için yayınladığı özel standart (ASTM D2493 2009) ASTM eşdeğerlik yöntemi olarak bilinmektedir. Bu standarda göre viskozite ölçümü için belirtilen sıcaklıklar 135 °C ve 165 °C aralığında yapılır.

Deneyin yapılış aşamasına başlanılmadan önce deneyde kullanılacak tüp ve spindle temizlenerek deneye hazır hale getirilir. Bitüm yumuşama noktası sıcaklığının 90°C üzerini geçmeyecek şekilde etüvde ısıtılma işlemine tabii tutularak akıcı hale gelmesi sağlanır. Viskozite deneyinde kullanılacak diğer aparatlar (tüp, kılavuz, kanca ve No:27 Spindle) de sıcaklık kaybı olmaması için etüvde ısıtılır. Etüvde ısıtılmış deney tüpü içerisine yaklaşık 11 gr bitüm konularak sıcaklık 135 °C'de önceden ayarlanmış sıcaklık kontrolüne sahip hazne (thermosel) içerisine yerleştirilir. Spindle cihaza takılmadan önce autozero işlemi yapılır. Daha sonra Spindle bitüm içerisine terazili olarak yerleştirilir ve dönme hızı 20 devir/dakika olarak deneye başlanılır.

Tüp içerisindeki bitüm ve haznenin sıcaklığı 135 °C'de eşitlendikten sonra 15 dakika beklenip deneye başlanılır. Deney sırasında tork değerinin %10' ve %90 aralığında olmasına dikkat edilmelidir. Bu değer aralığının dışına çıkıldığı durumda rpm değeri değiştirilerek deneye tekrar başlanılmalıdır. Birer dakika ara ile okuma yapılarak okumalar arasında ki fark eşit olan son üç okuma değeri not edilerek ortalaması alınır. Hazne sıcaklığı 150 °C ve 165 °C sıcaklık için ayarlandıktan sonra tekrar 15 dakika

bekletilip deneye tekrar edilir. Viskozite deneyinin aşamalarının özeti Resim 3.6'da verilmiştir.



Resim 3.10 Dönel viskozite deneyinin yapılış aşaması a) bitümün tüpe dökülmesi, b) Spindle'nin tüp içerisine terazili şekilde yerleştirilmesi, c) deneyin başlatılması.

3.2.1.6 Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)

RTFOT deneyi, bitümlü bağlayıcının asfalt plentinde karıştırma işlemi esnasında maruz kaldığı kısa süreli yaşlanmayı tayin etmek için yapılmaktadır. Deneyde, düşey eksen etrafında dönen raf içerisinde her biri 35 gr bitüm içeren 8 adet bitüm numunesinin 163 °C'de 85 dk boyunca ısıtılmaktadır. Deney süresince numune şişelerinin içerisine sıcak hava üfletilmektedir.

Yapılan deneyde bitüm, her bir şişenin içerisinde 1.25 mm kalınlığında düşey eksenle daire çizen raf içerisinde sürekli olarak hareket etmektedir. Raflar 15 dev/dk hızla dönmekte ve deney aletinin altında bulunan hava üfletici yardımıyla etüv içerisine dakikada 4000±200 ml/dk olacak şekilde ısıtılmış hava verilmektedir.

SUPERPAVE yöntemine göre kısa dönem yaşlanmayı temsil etmek amacıyla kullanılan bu test yöntemi sürekli hareket etmesi sayesinde ısı ve havadan kaynaklı olarak yüzeyde katman oluşumunu engellemekte ve bitümün korunmasını sağlamaktadır.



Resim 3.11 RTFOT Deneyi.

3.2.1.7 Basıncı Yaşlandırma Deneyi (PAV)

SUPERPAVE yöntemi bitümlerin orta ve düşük sıcaklıklarda yorulma çatlakları ve termal çatlaklara karşı dayanımlarını belirleyebilmek için uzun dönem yaşlanmayı zorunlu kılmaktadır. Bitümün uzun dönemde görülen yaşlanması bitümün oksidasyonu nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Superpave bağlayıcı şartnamesinde uzun dönem yaşlandırma basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ile yapılmakta olup bu şekilde bitümün uzun dönemde ortaya çıkan fiziksel ve kimyasal değişiklikleri saptanabilmektedir.

Deneyde, RTFOT deneyinden elde edilen numuneler kullanılmaktadır. Böylece bitümün karıştırma, imalat ve hizmet ömrü boyunca karşılaşılabilecek çevresel koşullar deneylere de yansıtılmaktadır.

Numune kabı koşullandırma sıcaklığına kadar önceden ısıtılmaktadır. Isıtılan kaplar teraziye konular ve 50 gram numune kabın içerisine dökülerek bağlayıcının kabın tabanına yayılması sağlanır. Bitümlü bağlayıcının kimyasal yapısının artan sıcaklıkla beraber değişmesinden dolayı koşullandırma sıcaklığı mümkün oldukça düşük tutulmaktadır. Dolu kaplar tutacağa yerleştirilerek basınçlı kap kapatılır. Sıcaklık kaybını önlemek için yükleme aşaması mümkün olduğunca hızlı gerçekleştirilmelidir.

Kap içindeki sıcaklık yaşlandırma sıcaklığının 5 ila 20 °C altındaysa, bir hava basıncı (2,1±0,1) MPa uygulanmaktadır. Eğer sıcaklık iki saat içinde yaşlandırma sıcaklığına ulaşmaz ise deneye devam edilmemektedir. Sıcaklık ve basıncın belirli yaşlandırma süresi boyunca korunması gerekmektedir.



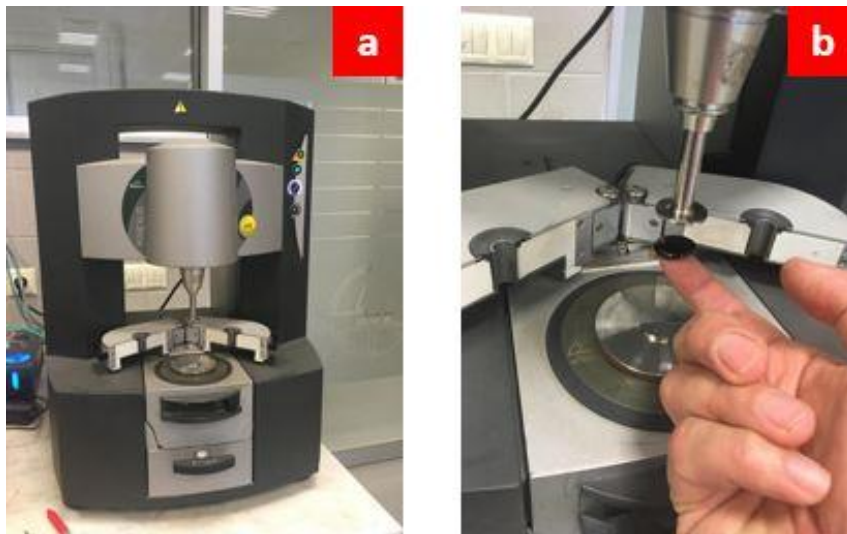
Resim 3.12 a-b) PAV deneyi, c) Numune rafının PAV cihazına yerleştirilmesi.

3.2.1.8 Dinamik Kesme Reometre Deneyi (DSR)

Bitümün tekerlek izi ve yorulma çatlaklarına karşı gösterdiği direnç ve aynı zamanda orta ve yüksek sıcaklık özelliklerini belirlemek için yapılan deneydir (Yüknü vd. 2020). Sıcaklık kontrollü ve bitümlü bağlayıcı numunelerinin bulunduğu deney düzeneğine belirli bir salımlı kesme gerilmesi uygulanmaktadır. Gerilmeye bağlı olarak bitümlü bağlayıcının şekil değiştirmesi tayin edilmektedir.

DSR, bir numunenin karmaşık kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerini belirlenmesini içermektedir. Faz Açısı (δ), uygulanan kayma gerilimi ile ortaya çıkan, kayma gerilimi arasındaki gecikme iken, Kompleks Kesme Modülü (G^*) numunenin tekrar tekrar kesildiğinde deformasyona karşı toplam direnci olarak kabul edilmektedir. Tekerlek izi parametresi olarak belirlenen $G^*/\sin\delta$ değeri ile tekerlek izine karşı dayanımın yüksek olması için, Kompleks Kesme Modülünün (G^*) yüksek, faz açısı değerinin (δ) ise düşük olması istenmektedir.

Deneyde yaşlandırılmamış numune kullanıldığında deney numuneleri AASHTO T 40'a göre, yaşlandırılmış numune kullanıldığında AASHTO T 314'e göre test edilmektedir. Deney numunesinin elde edildiği bitümlü bağlayıcı sıvı hale gelene kadar ısıtılmaktadır. Numunenin üzeri gevşek bir şekilde örtülür ve homojen hale getirmek için çalkalanmaktadır. Isıtma sıcaklığı ve numunenin sertleşmesi için geçen süre en aza indirilir. Depolanmış kaplardaki soğuk malzemeler kullanılmadan önce yumuşatılır ve boşluklar sıfırlanır. Deney plakalarının yüzeyleri deney numunesinin yapışabilmesi için temizlenir ve kurutulur. 8 mm numune kalınlığı kullanılırken oda 34°C ila 46°C arasında ısıtılır. 25 mm kalınlığında numune kullanılırken oda deney sıcaklığında ya da aralığın başlangıcındaki değerde ısıtılır. Resim 3.13'de DSR deney cihazı ve dinamik kesme reometre deneyine maruz bırakılmış bitümlü numunesi görülmektedir.



Resim 3.13 a) DSR deneyi b) Dinamik Kesme Reometre deneyine maruz bırakılmış bitümlü numunesi.

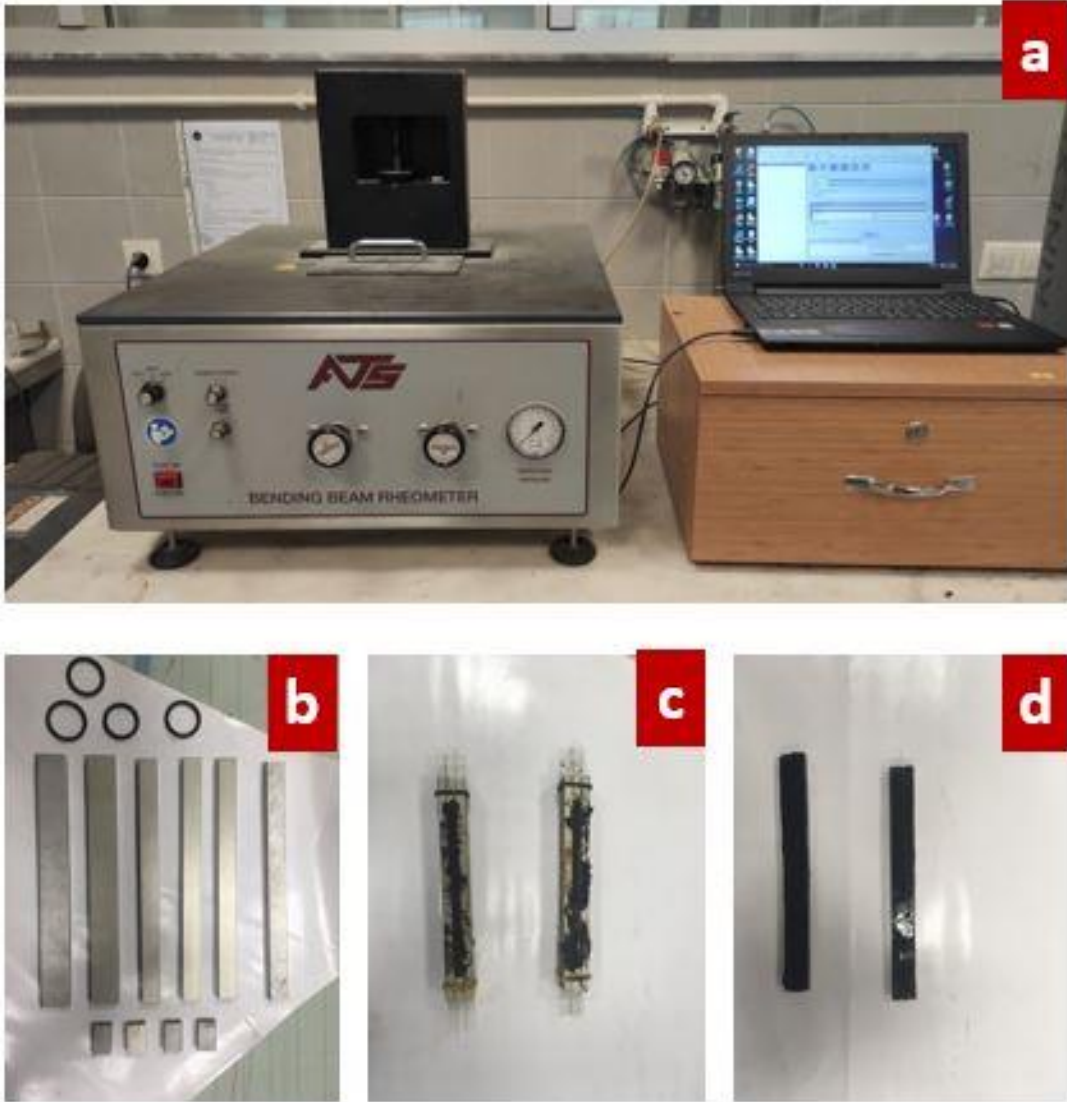
3.2.1.9 Kiriş Eğme Reometre (BBR) Deneyi

Kiriş Eğilme Reometre deneyi, bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklıklardaki davranışını belirlemek amacıyla yapılmaktadır (ASTM D 6648). BBR basit olarak eğilme sünme rijitliğinin tespit edilmesini kapsamaktadır. Eğilmezlik değeri 20 MPa ile 1 GPa arasında olan malzemelerde uygulanmaktadır.

Kiriş eğme reometre deneyi bitümlü bağlayıcının sertliği ve düşük sıcaklıkta çatlama potansiyelini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bitümün sünme gerilmelerine karşı gösterdiği direnç sünme sertliği (S), sünme sertliğinin yükleme boyunca değişimi ise sünme oranını (m- değer) vermektedir. Sünme sertliği (S) ve sertliğin yükleme süresiyle değişme hızı, test sıcaklığında çatlama potansiyelinin bir göstergesidir. Sertlik (S) ne kadar yüksek olursa, oran (m) o kadar düşük ve çatlama potansiyeli o kadar yüksek olmaktadır. Sertlikteki daha düşük bir eğim veya değişim hızı, asfalt bağlayıcının akarak termal gerilimi azaltma yeteneğinin azalması anlamına gelmektedir. Bu nedenle, Superpave dizaynında rijitlik değeri için bir maksimum sınır ve eğim değeri için bir minimum sınır bulunmaktadır.

Deney yapılış aşamasına geçilirken, deneyde kullanılacak kalıplar temizlenir ve görsel olarak kontrolleri yapılır. Kalıp parçalarını bir arada tutmak için O-halkalar kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcının metal parçalara yapışmasını önlemek için iki uç parçanın iç yüzeyi gliserol ve talk karışımı ile kaplanır. Monte edildikten sonra kalıp bitümlü bağlayıcı dökülene kadar oda sıcaklığında beklenir. Numuneyi homojen hale getirmek için bitümlü bağlayıcı 168±5 °C'de sıvı hale getirilene kadar ısıtılır. Bitümlü bağlayıcı oda sıcaklığında olan kalıbın bir ucundan başlanıp diğer ucuna doğru dökülerek kalıplara doldurulur. Numune kabı kalıbın en üstünden 20-30 mm uzakta tutularak dökülmesine dikkat edilmelidir. Dolu kalıp uygun bir yere yerleştirilerek 45-60 dk oda sıcaklığında soğumaya bırakılır.

Deneyden önce tüm deney numuneleri oda sıcaklığında kalıp içerisinde bekletilmelidir. Kalıpların çıkarılmasından hemen önce deney kalıplarındaki deney numunesi soğuk bir odada ya da su banyosunda en fazla 5 dk soğutulmalıdır. Numune yeterince sertleştiğinde kalıplar sökülür.



Resim 3.14 a) BBR deneyi b) BBR deney aparatları, c) bağlayıcının deney aparatlarına dökülmesi, d) numunenin kalıptan çıkarılması.

3.2.1.10 Kuvvet Ölçerli Düktilite Deneyi

Bitümün çekilebilmesi ve uzayabilmesi özelliğine düktilite denilmektedir. Bu deney bitüme yavaş etkileyen yükler altında uzama kabiliyetini belirlemek amacıyla yapılmaktadır (ASTM D113). Test, belirli sıcaklık ve uzama hızı koşulları altında özel olarak şekillendirilmiş bitümlü bağlayıcı numunelerinin çekme özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Test sonuçları, bitümlü bağlayıcının kohezyon özelliklerini belirlemede yardımcı olmaktadır.

Deney yapım aşamasına geçmeden önce bitümlü bağlayıcı yumuşama noktası sıcaklığının 90°C üstünü geçmeyecek şekilde ısıtılır ve düktilite kaplarına dökülür. Numuneler oda sıcaklığında 30 dakika ve ardından önceden ısıtılmış 25°C'de ki su banyosunda 30 dakika daha bekletilerek düktilite cihazına yerleştirilir. Deney numunesinin uzaması ve uygulanan kuvvet için bir kayıt cihazı kullanılarak okunan değerler yazılır.

Cihaz üzerinde bulunan cetvelde bitümün kopma anı cm olarak yazılmaktadır. Bu değer bize bitümün bağlanma performansını vermektedir. Düktilite değeri yüksek olan bitümlerin bağlayıcılık özellikleri de yüksek olmaktadır.



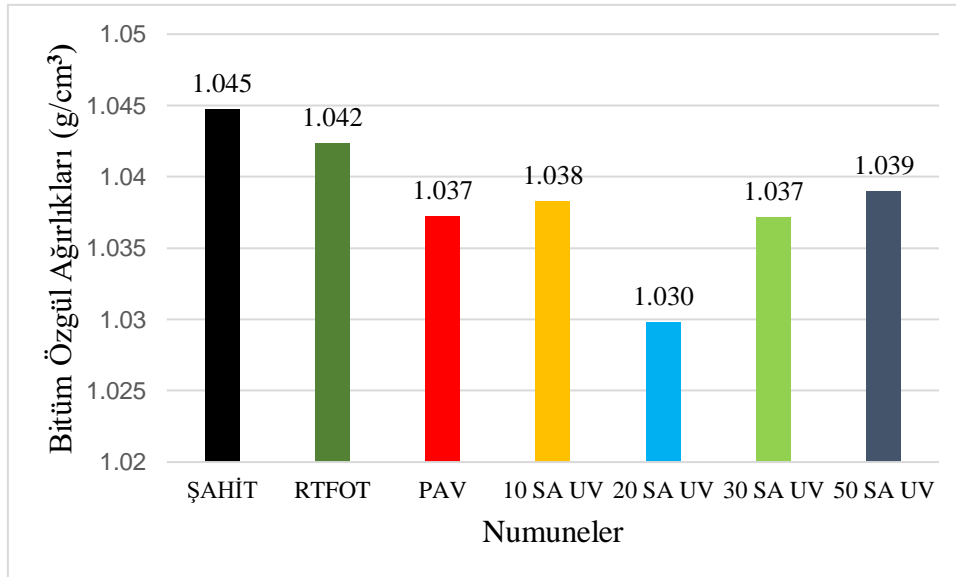
Resim 3. 15 Düktilite kalıbı içerisine numunenin yerleştirilmesi.

4. BULGULAR

Aliğa rafinerisinde üretilmiş B50/70 penetrasyon sınıflı bitüm; yaşlandırılmamış bitüm numunesi ve 10, 20, 30 ve 50 saat UV ışına maruz bırakılmış bitüm numuneleri üzerinde Penetrasyon, Yumuşama Noktası, Dönel Viskozite (RV), Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT), Basınçlı Yaşlandırma (PAV), Dinamik Kesme Reometrisi (DSR), Kiriş Eğme Reometre (BBR) ve Kuvvet Ölçerli Düktilite Deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları ve değerlendirmeleri aşağıdaki bölümlerde ilgili başlıklar altında verilmiştir.

4.1 Özgül Ağırlık Deneyi Bulguları

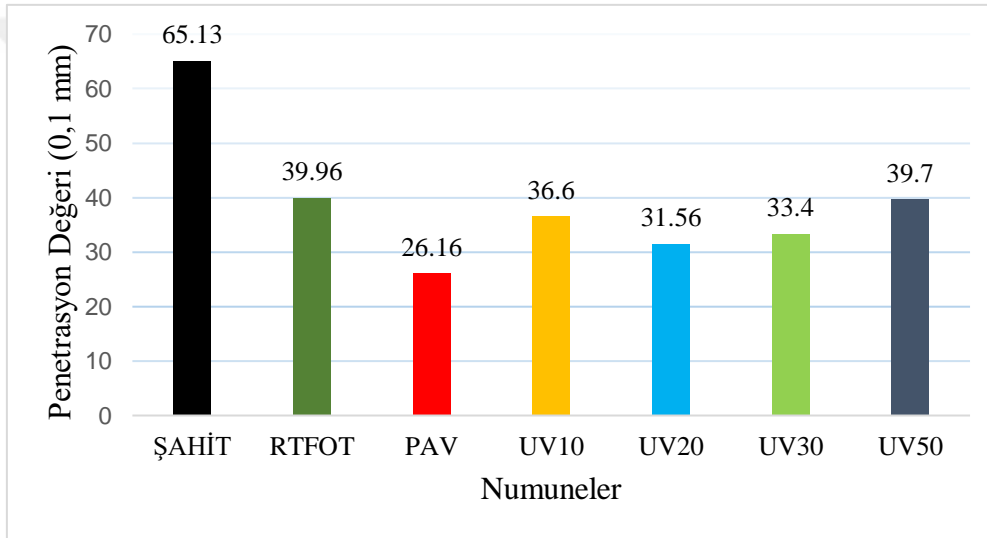
Özgül ağırlık deneyine ait sonuçlar şekil 4.1 de verilmiştir. Bitüm numunelerinin yaşlanmaya tabii tutulmasıyla beraber özgül ağırlık değerlerinde düşüş görülmüştür. Değer aralıkları birbirlerine yakın olsa da en fazla azalma 20 saat UV yaşlanma sonrasında görülürken PAV ve 30 saat UV yaşlanma sonrası değerler birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 4. 1 Bitüm Özgül Ağırlık değerleri.

4.2 Penetrasyon Deneyi Bulguları

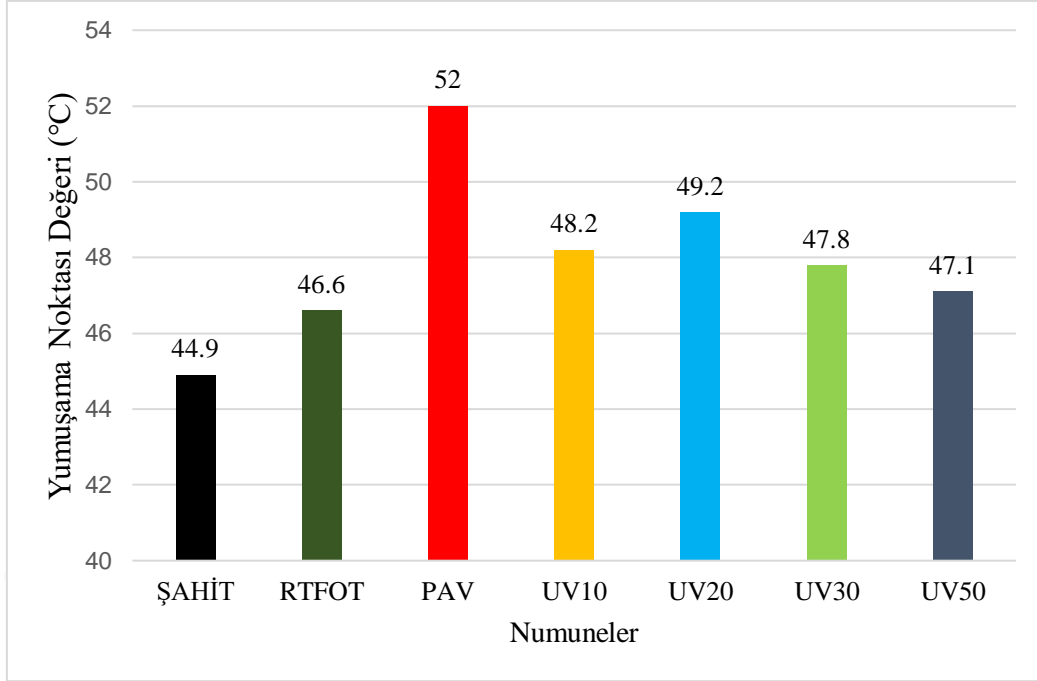
B50/70 sınıflı bitümü hiçbir yaşlandırmaya tabi tutmadan ayrılan şahit numune, RTFOT ve PAV sonrası ve 10, 20, 30 ve 50 saat UV ışını altında yaşlandırılarak uygulanan Penetrasyon Deneyi sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir. Penetrasyon deneyindeki en fazla azalma miktarı PAV sonrası bitümde görülmüş olup, azalma yaklaşık %40’dır. UV yaşlanma süresi 20 saate kadar olan numunede penetrasyon değeri azalırken 20 saatin sonunda penetrasyon değeri yükselmeye başlamıştır.



Şekil 4.2 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin penetrasyon değerleri.

4.3 Yumuşama Noktası Deneyi Bulguları

Farklı yaşlandırma sonrası B50/70 sınıfı bitüme uygulanan yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 4.3’te verilmiştir. Şahit numune, RTFOT ve PAV sonrası, 10, 20, 30 ve 50 saat yaşlandırmadan sonra yapılan yumuşama deneyi sonuçlarına göre en yüksek yumuşama noktası değerine PAV deneyi sonucunda 52 °C’ye ulaşmıştır. UV yaşlandırma süresi 20 saate ulaştığında 49,2 °C de yumuşama gösteren bitüm numunesi yaşlandırma süresi arttıkça 47 °C ‘de yumuşama değerine ulaşmıştır.



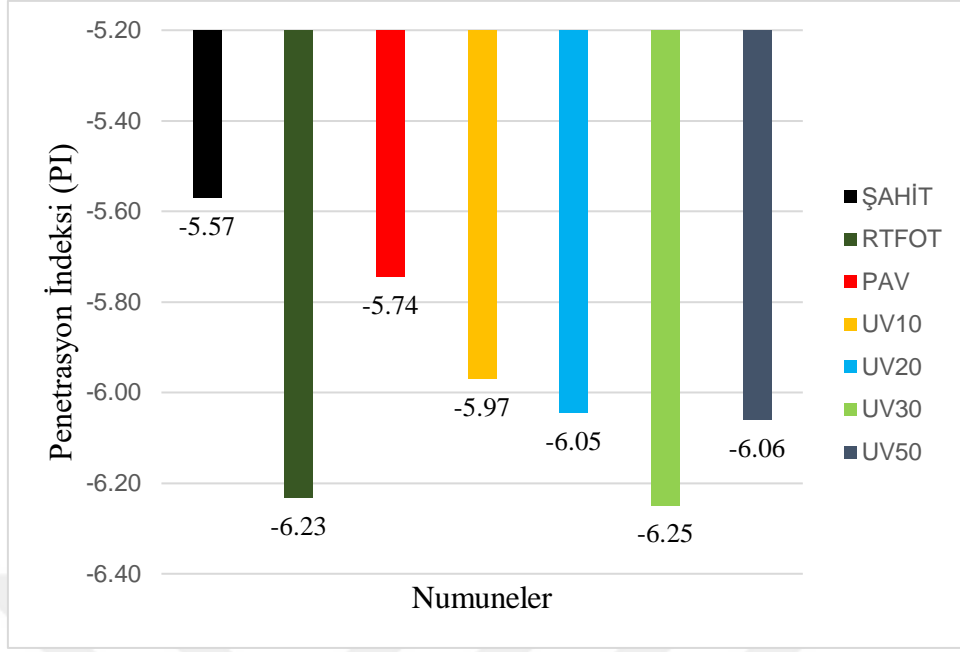
Şekil 4.3 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin yumuşama noktası değerleri.

4.4 Penetrasyon İndeksi Bulguları

Penetrasyon İndeksi Değeri (PI) bitümlü bağlayıcının ısıya karşı gösterdiği duyarlılığın parametresidir. Bitümlü bağlayıcının ısıya karşı duyarlılığı arttıkça PI değeri azalmaktadır. Penetrasyon indeks değerinin -2'den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu +2'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir.

Yapılan testler sonucunda penetrasyon indeks değerinde en fazla azalış 30 saatlik UV yaşlanması ve RTFOT sonrası numunelerde görülmüştür. Şahit numuneye kıyasla, PAV numunesinde 0.23 değerinde bir azalış görülürken RTFOT sonrası numunede 0.66 değerinde bir azalış meydana gelmiştir. UV yaşlanma süresinin artmasıyla beraber ısıya karşı duyarlılıkta artmaya başlamış penetrasyon indeks değerlerinde de aynı doğrultuda bir azalış meydana gelmiştir.

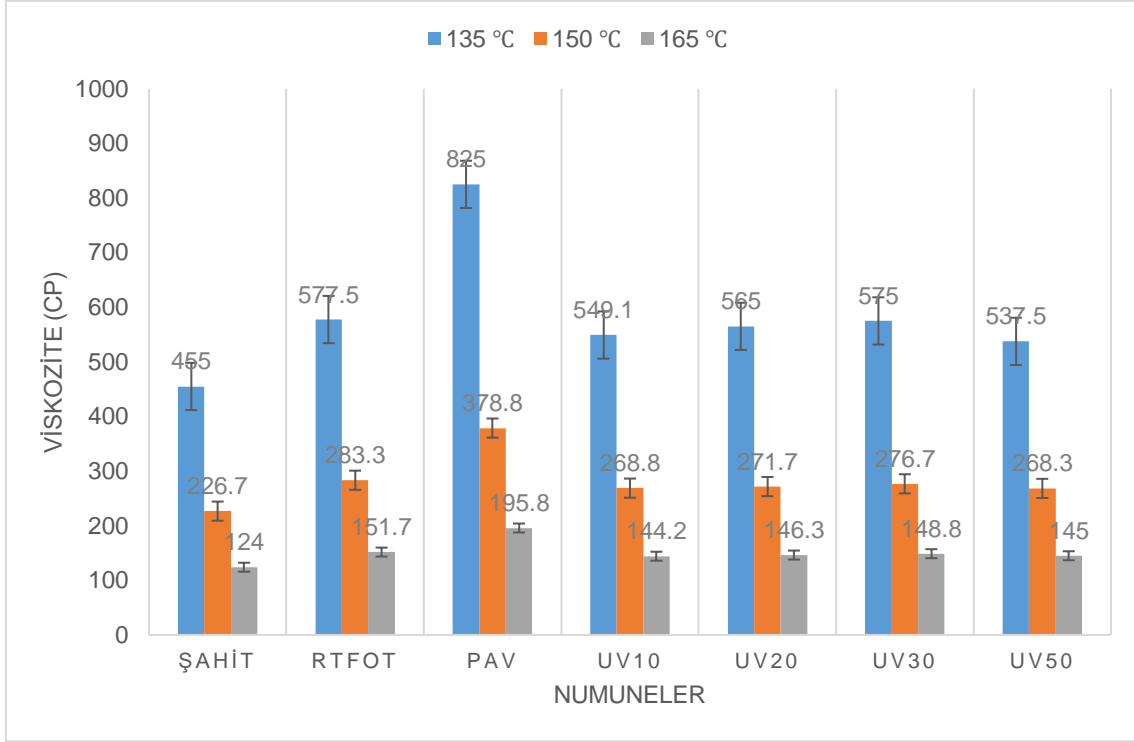
Şekil 4.4'te de görüldüğü gibi bitümün yaşlanma süresi arttıkça ısıya karşı duyarlılığı da artmaktadır.



Şekil 4.4 Penetrasyon İndeksi değişimleri.

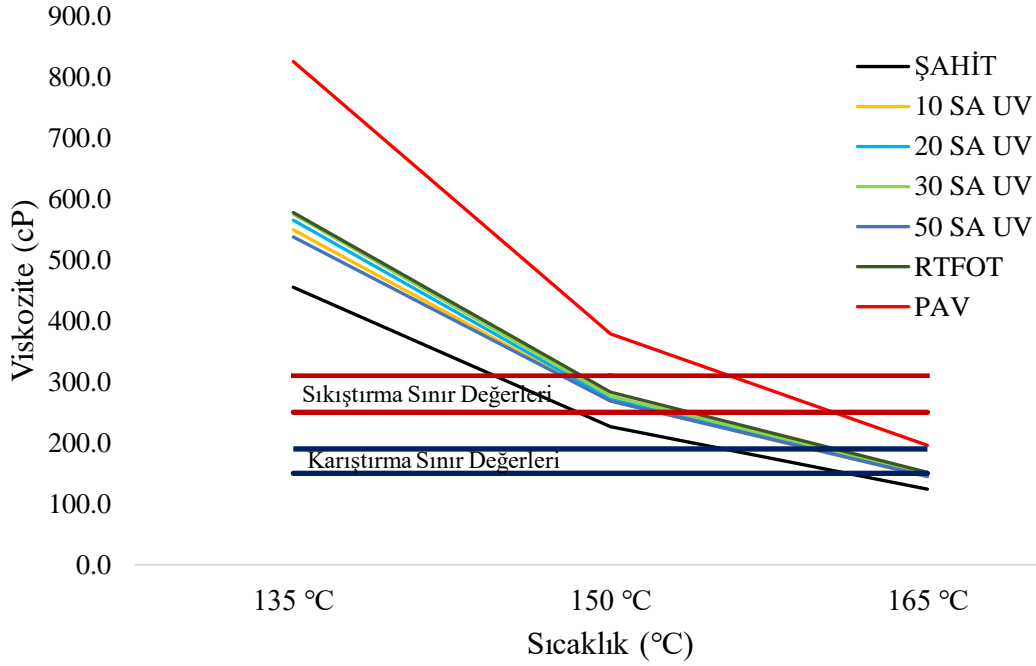
4.5 Dönel Viskozite (RV) Deneyi Bulguları

Farklı yaşlandırma sonrası B50/70 sınıfı bitüme uygulanan Dönel Viskozite (RV) deney sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir. Bitüm numunelerinin akışkanlık özelliklerinin aynı zamanda sıcaklığa bağlı olarak reolojik özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri belirlemek için yapılan Dönel Viskozimetre deneyinde, viskozite ölçümleri 135, 150 ve 165 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen viskozite değerlerine göre her 3 farklı sıcaklık değeri için en yüksek viskozite değeri PAV sonrası numunede görülmüştür. UV yaşlanma sonrası viskozite değerleri 30 saatlik yaşlanmaya kadar bir artış göstermiş 50 saatlik UV yaşlanmasından sonra değer 10 saatlik yaşlanmadan sonraki değer altına düşmüştür.



Şekil 4. 5 Bitüm numunelerinin viskozite değerleri.

American Society for Testing and Materials (ASTM), asfalt karışımlarının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını hesaplamak için yayınladığı özel standarda (ASTM D2493 2009) göre geliştirilen grafikten laboratuvar karıştırma ve sıkıştırma aralığı 170 ± 20 mPa.s ve 280 ± 30 mPa.s olmasını belirtmiştir. Deney sonuçlarına göre 135 ve 165 °C’de ki karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tespiti için viskozite sıcaklık grafiği Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını ASTM (eşdeğerlik) yöntemine göre gösteren sıcaklık-viskozite grafiği.

Çizelge 4. 1 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.

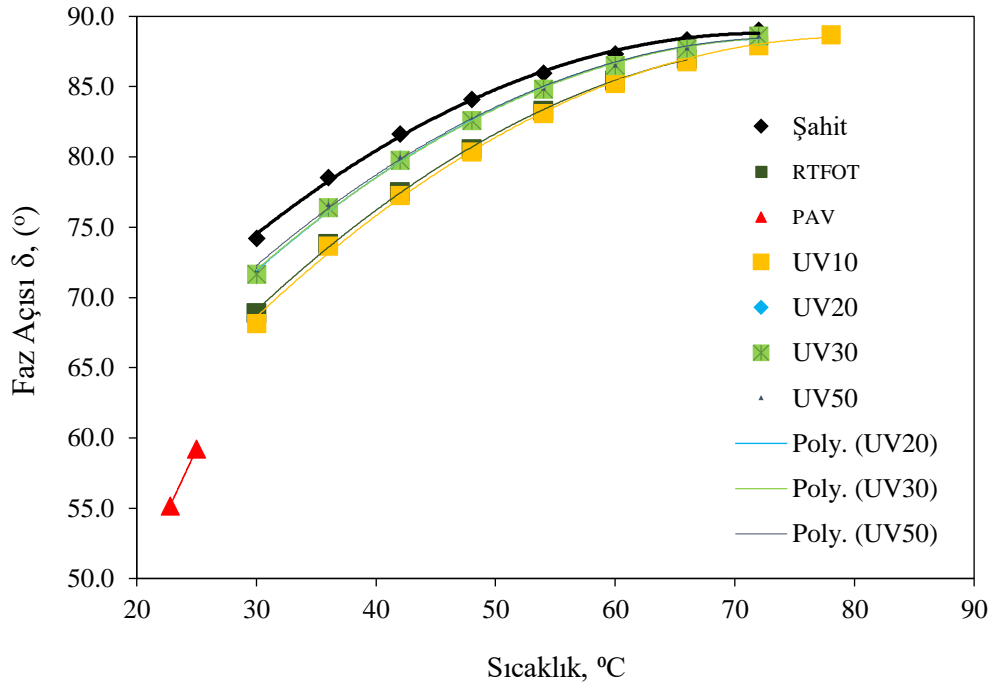
Numuneler	Karıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)
Şahit	159,1-163	149-154
RTFOT	163-165	154-159
PAV	-	160-163
UV 10 saat	161-165	153-157
UV 20 saat	162-165	154-158
UV 30 saat	162-165	154-158
UV 50 saat	162-165	153-157

4.6 Dinamik Kesme Reometre Deneyi (DSR) Bulguları

Bitümlü bağlayıcının kompleks modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerini belirleyip viskoz ve elastik davranışını karakterize etmek için yapılan deneydir. Reoloji çalışması, bağlayıcıların karakterizasyonunda en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir ve kullanımı, bitüm yaşlanması ile ilgili çalışmaların çoğunda mevcuttur. Bu deney malzemedeki moleküllerin hem kimyasal yapısına hem de fiziksel yapısına göre belirli

bir sıcaklıkta bitümün karakterize edilmesini sağlar. G^* değeri, tekrar eden kesme gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bitümlü bağlayıcının gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem G^* hem de δ değerleri bitümlü bağlayıcının sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir (Yılmaz vd. 2008, Gürer vd. 2020). Kompleks modülünün (G^*) büyüklüğü ve faz açısının (δ) derecesi, bitümlü bağlayıcının sertlik ve deformasyon arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek amacıyla yapılmaktadır. Tekerlek izi dayanımının yüksek olması için G^* değerinin yüksek, faz açısının düşük olması gerekmektedir. Faz açısının düşük olması bitümlü karışımlarının esnek davranış göstereceğinin göstergesidir.

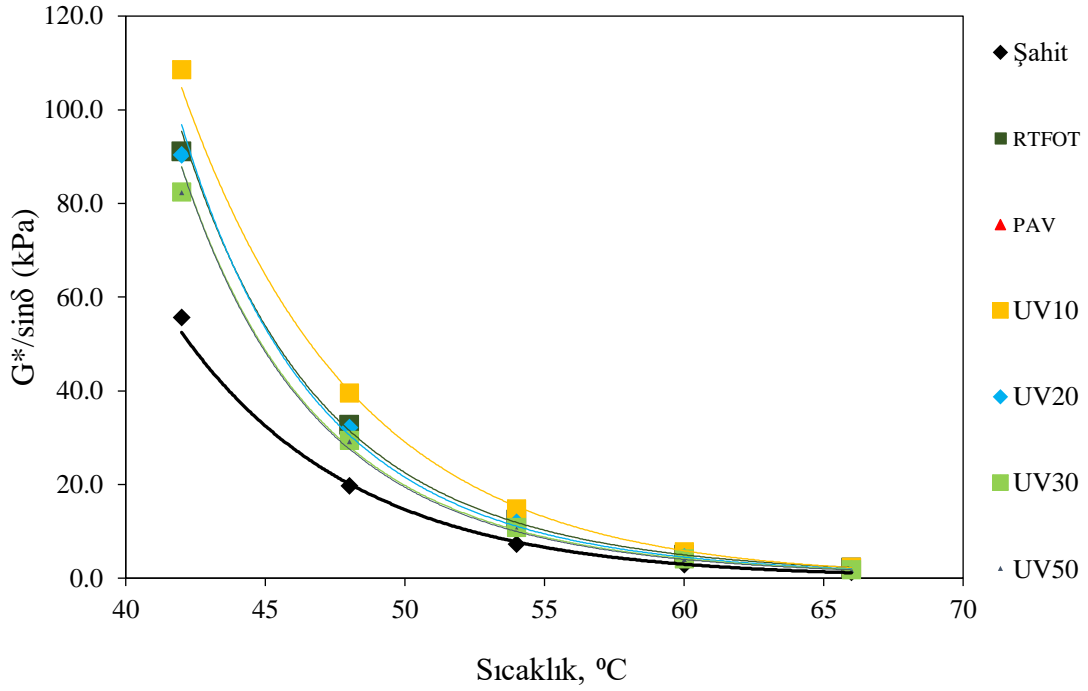
Şekil 4.7'den de görülebileceği gibi yaşlanma sonrası faz açısı değerleri şahit numuneye göre en az 3° en fazla 19° azaldığı belirlenmiştir. En fazla fark PAV sonrası numunede görülmektedir. Zhang vd. 2016 Asfalt malzemesinin uzun süreli yaşlanma sürecinde, bitüm malzemesinin sertleşmesine ve yapışmasının azalmasına neden olduğunu belirtmiştir. Dolayısıyla yaşlandırılmış bitüm numuneleri şahit numuneye göre daha esnek davranış sergilemiştir. Düşük faz açısına sahip olan bitümlü bağlayıcı daha fazla elastik özelliğe sahip olmaktadır. Bu nedenle daha fazla deformasyonun geriye dönmesine olanak sağlamaktadır. Genellikle yaşlanma ile birlikte faz açısı değerlerinde azalma görüldüğü literatürden bilinmektedir (Zeng vd. 2015, Tauste vd. 2018, Hu vd. 2018). Genel itibari ile tüm numunelerde UV yaşlandırma sonucunda faz açısı değerlerinde şahit numuneye göre azalmaların görüldüğü en yüksek azalmanın 10 saat UV yaşlandırmaya maruz kalan numunelerde görüldüğü belirlenmiştir. 10 saatlik yaşlandırmaya maruz kalan numunelerin faz açısı değerlerindeki azalma RTFOT yaşlandırma numunelerinin faz açısındaki azalma ile hemen hemen aynıdır. En yüksek faz açısı azalmaları PAV yaşlandırmasına maruz bırakılan numunelerde görülmüştür. Bu bulgular bitümün yaşlandıkça bitüm davranışının daha çok katı haldeki davranışını sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.7 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin faz açılarının sıcaklıkla değişimleri.

Kompleks kesme modülü (G^*) değeri ve faz açısı (δ) derecesinin bitümlü bağlayıcının sertliği ve deformasyon şekli arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek amacıyla yapılmaktadır. Bu değerlere özellikle yüksek servis sıcaklıklarında tekerlek izine karşı dayanım söz konusu olduğunda göz önünde bulundurulmaktadır. G^* değerinin yüksek olması bağlayıcının rijit olduğunu göstermekte ve bu değer yüksek oluşu deformasyona karşı dayanımın artmasını sağlamaktadır. $G^*/\sin\delta$ parametresi tekerlek izine karşı dayanım direnç faktörünü vermektedir. Tekerlek izi oluşumuna karşı $G^*/\sin\delta$ değerinin en az 1.00 kPa olması gerekmektedir. Şekil 4.8 de görüldüğü gibi $G^*/\sin\delta$ parametresinin yaşlanmış numunelerin şahit numuneye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Zeng vd. (2015), Tauste vd. (2018) tarafından da ifade edildiği gibi bitüm yaşlandıkça $G^*/\sin\delta$ parametresinde de artış eğilimi görülmektedir. Li vd. (2022) tekerlek izi faktörü olan G^* değerinin arttığını bildirmişlerdir. Bu deney bulgularına göre en büyük artış eğiliminin PAV numunesinde görüldüğü genel olarak tüm yaşlanmış numunelerde artış olduğu, UV

yaşlanmasına maruz bırakılan numunelerde ise UV10 numunelerinde en yüksek artış görülmüştür.



Şekil 4.8 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin $G^*/\sin \delta$ parametresi değişimleri.

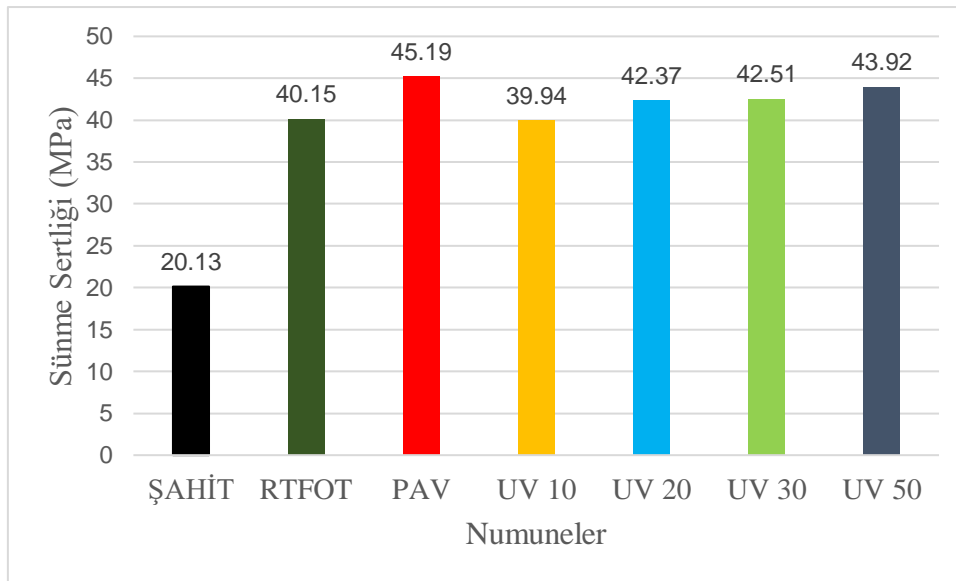
4.7 Kiriş Eğme Reometre (BBR) Deneyi Bulguları

Kiriş eğme reometresi ile bitümlü bağlayıcıların eğilme sünme rijitliğinin tespit edilmesini kapsamaktadır. Eğilmezlik değeri 20 MPa ile 1 GPa arasında olan malzemelere uygulanmaktadır. Eğilme sünme rijitliği doğrusal viskoelastik tepki aralığında deney sıcaklığındaki bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklık gerilme, uzama ve zaman tepkisini tanımlamaktadır (TCK, 2013).

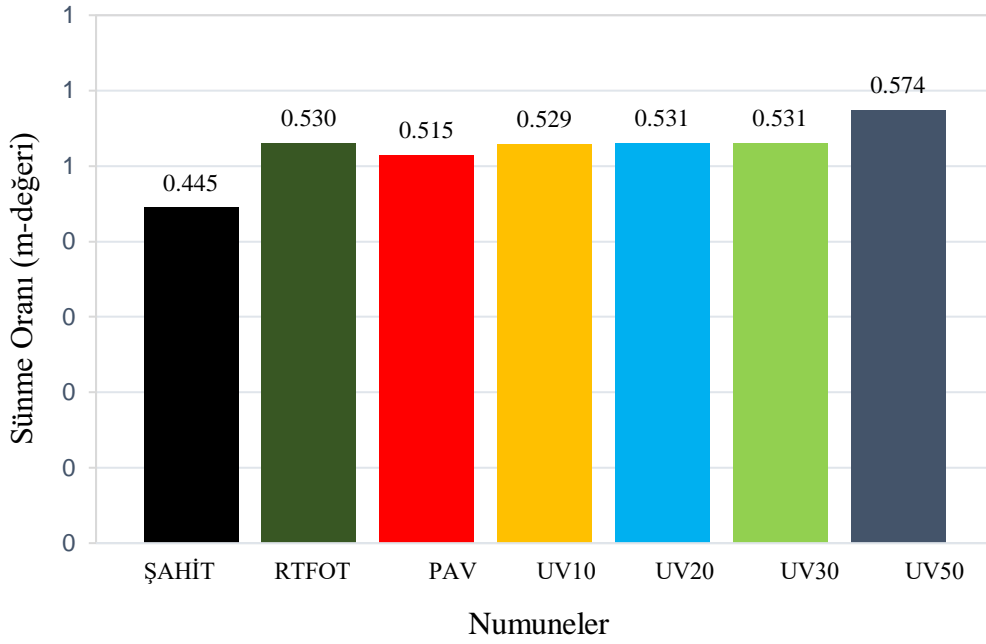
Kiriş eğme reometre deneyinde, üç noktadan eğmede bitümlü bağlayıcı kirişin orta nokta sapmasını ölçmek için kullanılmaktadır. Numunenin orta noktasına tanımlanmış yükleme

süresi boyunca sabit bir yük uygulanır ve sapma zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülmektedir. Çubuğun ortasında oluşan sünme farklı sürelerde sistem tarafından ölçülmekte, sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) hesaplanmaktadır.

Yu vd. (2019)'a göre rijitlik modülü S_t temel olarak yaşlanma süresinin veya UV radyasyon yoğunluğunun artmasıyla artar. Ancak UV radyasyon şiddeti belirli bir seviyeye ulaştığında mukavemet arttıkça rijitlik modülü azalır. UV ile yaşlanmış numunelerin sürünme oranı (m), hafif bir azalma eğilimi gösterir ancak bu eğilim önemli değildir. Bunun nedeni esas olarak UV yaşlandırmasının sadece bitümlü bağlayıcıların yüzeylerini etkilemesi ve bitümlü bağlayıcının yaşlanmış kısmının kirli numune içerisinde dağılmasıdır. Deney bitümün termal çatlak oluşumuna karşı direncini ölçmeye yönelik olduğundan negatif sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. 60 sn sonunda sünme sertliği $S(t) < 300$ MPa ve m değeri $m \geq 0.300$ olmalıdır. Numuneler bu değerleri sağlamaktadır. Numune değerlerinin standart limitler dışına çıkmamasında film kalınlığının 3 mm olmasının da etkisi olmuştur. Aksi takdirde yaşlanmanın göstergesi olan sünme rijitliği değerlerin daha da yükseleceği düşünülmektedir. Şekil 4.9 ve 4.10 da görüldüğü gibi UV yaşlanma süresi arttıkça hem sünme sertliği hem de sünme oranlarında 6°C 'de artış eğilimi görülmüştür.



Şekil 4.9 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin Sünme Sertliği değerlerinin değişimi.

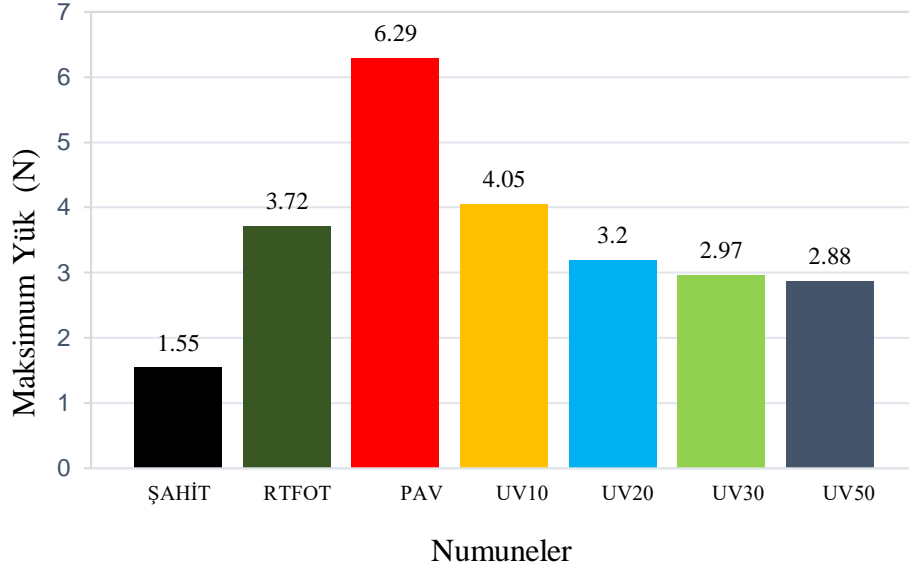


Şekil 4.10 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin Sünme Oranı (m-değeri).

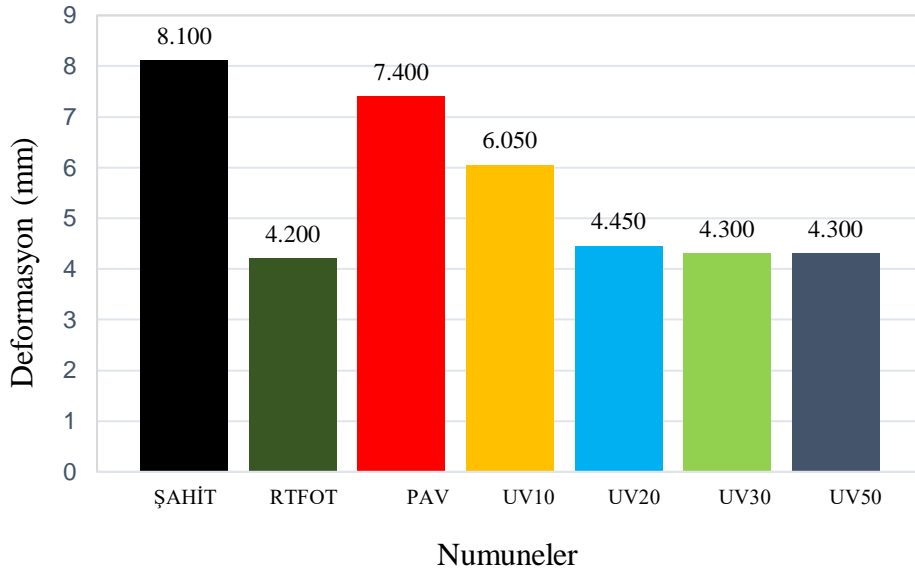
4.8 Kuvvet Ölçerli Düktilite Deneyi Bulguları

Kuvvet Ölçerli Düktilite Deneyi, bitümlü bağlayıcı, TS EN 13074'e göre geri kazanılmış bağlayıcı ya da TS EN 1431'e göre destilasyon sonrasında kalıntı bağlayıcı ile TS EN 14895'e göre yaşlandırılan bağlayıcı üzerinde gerçekleştirilmektedir. Kalıptan çıkarılan bir deney numunesi kırılana kadar ya da %1333 (400 mm) uzama görülene kadar sabit hızda ve deney sıcaklığında düktilometrede uzatılmaktadır (TCK, 2013). Bitüm numunelerinin bağlanma yeteneği düktilitesine bağlıdır. Yani düktilite değeri yüksek olan bitümlü bağlayıcının bağlayıcılık özelliği de yüksektir. Düktilite değeri aynı zamanda bitümlü bağlayıcıların kohezyon özelliğinin de dolaylı bir göstergesidir. Kohezyon özelliği bitümlü bağlayıcıların yapışma fazının kırılmadan esneme yapma kabiliyetini gösterir (Gürer, 2014). Deney sonuçlarından da anlaşılacağı gibi farklı yaşlandırma etkilerine maruz bırakılan bitüm numunelerinin yaşlandırma sonrasında maksimum yük değerlerinin arttığı ve deformasyon değerlerinin azaldığı görülmüştür. 10 saat UV yaşlandırma etkisi altında maksimum yükün 4.05 N'a yükseldiği, RTFOT etkisi altında ise 3.72 N'a yükseldiği görülmüştür. Uzun dönem yaşlanmayı temsil eden PAV etkisi sonucunda maksimum kuvvet değeri 6.29 N'a yükselmiştir. Genel olarak tüm yaşlanma

etkileri altında maksimum kuvvet değerlerinde yükselme görülmüştür. Maksimum kuvvet değerindeki yükselme aynı zamanda dolaylı sertleşmenin de bir göstergesidir.



Şekil 4.11 Farklı yaşlandırma deneyleri sonrası bitüm numunelerine uygulanan maksimum yük.



Şekil 4.12 Farklı yaşlandırma sonrası bitümlerin deformasyon değeri.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

AKÜ İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında geliştirilen UV yaşlandırma cihazının bitüm yaşlanması üzerindeki etkisini anlayabilmek için deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, bitüm numuneleri üzerinde; hiç yaşlandırmadan, numuneyi 10, 20, 30 ve 50 saat AKÜ UV yaşlandırma cihazında yaşlandırarak, ayrıca RTFOT ve RTFOT sonrası PAV deneyleri (geleneksel yaşlandırma deneyleri) yapılarak, UV yaşlanmasından elde edilen sonuçlarla geleneksel yaşlandırma yöntemlerinden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Yaşlanmamış ve yaşlandırılan bitüm numuneleri üzerinde Dönel Viskozite (RV), Penetrasyon, Yumuşama Noktası, Kuvvet Ölçerli Düktilite, Kiriş Eğme Reometre (BBR), ve Dinamik Kesme Reometre (DSR) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır.

- Penetrasyon Deneyi ve Yumuşama Noktası Deney sonuçlarının her ikisi içinde 20 saatlik UV yaşlanmasından sonra yapılan 30 ve 50 saatlik UV yaşlanması sonuçlarının beklenildiği gibi sonuç vermemesi bizlere bitüm film kalınlığından kaynaklandığını göstermektedir. Mevcut araştırmalar, atmosferik oksijenin yüzeyin 15 mm altına kadar nüfuz edebileceğini göstermiştir (Yi-Qiu, Jia-Ni vd. 2008). Fakat sonrası için bir veri mevcut değildir.
- Penetrasyon İndeksi sonuçlarına göre, bitümün RTFOT sonrası ve 30 saatlik UV yaşlanması sonrası elde edilen değerleri birbirine yakınlık göstermektedir. Bitümün yaşlanma süresinin artmasıyla ısıya karşı duyarlılığının da arttığı test sonuçlarıyla ortaya konulmuştur.
- Bitümlü bağlayıcının kompleks modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerini belirleyip viskoz ve elastik davranışını karakterize etmek için yapılan Dinamik Kesme Reometre deneyinde genel itibari ile tüm numunelerde UV yaşlandırma sonucunda faz açısı değerlerinde şahit numuneye göre azalmalar görülmüştür. Bu bulgular bitümün yaşlandıkça bitüm davranışının daha çok katı haldeki davranışını sergilediğini göstermektedir. Benzer şekilde $G^*/\sin \delta$ parametresinin de yaşlanmayla beraber artış eğilimi göstermiş en yüksek artış eğilimi PAV

numunesinde görülürken UV yaşlanmada en yüksek artış 10 saatin sonunda görülmüştür.

- Bitüm film kalınlığının 3 m olması, yaşlandırma tepsisi olarak kullanılan borosilikat cam tepsilerinin düzgün olmaması bazı kısımlarda film kalınlığının 5 mm'ye kadar değişmesi sonucunu doğurmuştur. Bunun neticesinde UV ışığa temas eden yüzeylerde bir yaşlanma etkisi olurken alt kısımlarda bu etki sınırlı kalmış bazı deney türleri için karışan ve numunelerde deneylerin bir kısmında kararsız sonuçlar alınmasına neden olmuştur. Bundan sonraki çalışmalarda bitüm film kalınlığının 1 mm civarında tutulması ve yüzeyi düzgün metal tepsiler kullanılması daha kararlı sonuçlar alınmasını sağlayacaktır.
- Bitüm numunelerinin yaşlanma sonrası faz açısı değerlerinin şahit numuneye göre yaklaşık 20°'ye kadar azalması yaşlanmayla beraber bitümün sertleşmesinin bir göstergesidir. Aynı şekilde kompleks kesme modülü (G^*) değerinin yaşlanmayla beraber artması da sertleşmenin bir göstergesi olarak düşünülmektedir.
- UV yaşlanma süresinin artmasıyla Sünme sertliği (St) (MPa) ve sünme oranı değerinin (m-değer) artması UV yaşlandırma cihazının başarılı bir şekilde çalıştığını ortaya koymaktadır.
- Bu cihazla yapılacak sonraki çalışmalarda UV yaşlandırmasının RTFOT yaşlandırmasından sonraki numunelere yapılmasıyla uzun dönem yaşlanmanın da UV yaşlandırma cihazı ile benzeştirebileceği düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Ahmedzade P, Yılmaz M, Yılmaz M, 2007, Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlandırılmasında Kullanılan Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi 23, 112-126.
- Araujo M, Lins V, Paşa V, Leite L, 2013, Weathering aging of modified asphalt binders. Fuel Processing Technology 115, 19-25.
- ASTM D 7175, 2015, Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, American Society for Testing and Materials, Pensilvanya.
- ASTM D2872-12e1, 2012, Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D36/D36-09, 2009, Standard Test Method for Softening Point of Bitumen, In Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4402, 2015, Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, In Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5550 - 14, 2014, Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer, ASTM International.
- ASTM D70-03, 2003, Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials, ASTM International, West Conshohocken.
- Airey G, 2003, State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials, International Journal of Pavement Engineering 4, 165-176.
- Bell C, Sosnovske D, 1994, Aging, Binder Validation, Strategic Highway Research Program, National Research Council Washington, DC.

- Chen Z, Zhang H, Duan H, 2020, Investigation of Ultraviolet Radiation Aging Gradient in Asphalt Binder, *Construction and Building Materials* 246, 118501.
- Cong P, Wang X, Xu P, Liu J, He R, Chen S, 2013, Investigation on Properties of Polymer Modified Asphalt Containing Various Antiaging Agents, *Polymer Degradation and Stability* 98, 2627-2634.
- Dow, A, 1903, Asphalt Experiments at Washington. *Engineering Record* 47, 20-25.
- Duriez M, Arrambide J, 1961, *Nouveau Traité de Matériaux de Construction*, Dunod.
- Durrieu F, Farcas F, Mouillet V, 2007, The Influence of UV Aging of a Atyrene/Butadiene/Styrene Modified Bitumen: Comparison Between Laboratory and on Site Aging, *Fuel* 86, 1446-1451.
- Edler A, Hattingh M, Servas V, Marais C, 1985, Use of Aging Tests to Determine the Efficacy of Hydrated Lime Additions to Asphalt in Retarding its Oxidative Hardening (With Discussion), *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.*
- Feng Z, Bian H, Li X, Yu J, 2016, FTIR Analysis of UV Aging on Bitumen and its Fractions, *Materials and Structures* 49, 1381-1389.
- Feng Z, Wang S, Bian H, Guo Q, Li X, 2016, FTIR and Rheology Analysis of Aging on Different Ultraviolet Absorber Modified Bitumens, *Construction and Building Materials* 115, 48-53.
- Feng Z, Yu J, Zhang H, Kuang D, Xue L, 2013, Effect of Ultraviolet Aging on Rheology, Chemistry and Morphology of Ultraviolet Absorber Modified Bitumen, *Materials and Structures* 46, 1123-1132.
- Feng Z, Cai F, Yao D, Li X, 2021, Aging Properties of Ultraviolet Absorber/SBS Modified Bitumen Based on FTIR Analysis, *Construction and Building Materials* 273, 121713.

- Feng Z, Yu J, Kuang D, 2013, The Physical Properties and Photostability of Bitumen With Different Ultraviolet Absorbers, *Petroleum Science and Technology* 31, 113-120.
- Gürer C, 2014, Bitümlü Karışımlar, Yayınlanmamış Lisansüstü Ders Notları, Afyonkarahisar.
- Haas H, 1974, Ein Verfahren zur Eliminierung des Probenahme-und Probeteilfehlers Bei der Qualitätskontrolle Von Bituminösem Mischgut, *Bitumen* 36.
- Hayton B, Elliott R, Airey G, Raynor C, 1999, Long Term Ageing of Bituminous Binders, *Proc, Eurobitume Workshop 99, Paper 126(Luxembourg), Proc, Eurobitume Workshop 99.*
- Hu J, Wu S, Liu Q, Hernández M, Zeng W, Nie S, Wan J, Zhang D, Li Y, 2018, The Effect of Ultraviolet Radiation on Bitumen Aging Depth, *Materials* 11, 747.
- Hu J, Wu S, Liu Q, Hernández M, Zeng W, 2018, Effect of Ultraviolet Radiation on Bitumen by Different Ageing Procedures, *Construction and Building Materials* 163, 73-79.
- Hung A, Fini E, 2020, Surface Morphology and Chemical Mapping of UV-Aged Thin Films of Bitumen, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 8, 11764-11771.
- Hunter R, Self N, Read J, Hobson E, 2015, *The Sell Bitumen Handbook*, Ice Publishing London, UK.
- Jiang W, Li P, Ye W, Shan J, Li Y, Xiao J, 2020, The Effect and Mechanism of La₂O₃ on the Anti-Ultraviolet Aging Characteristics of Virgin Bitumen, *Construction and Building Materials* 230, 116967.
- Kuang D, Yu J, Feng Z, Li R, Chen H, Guan Y, Zhang Z, 2014, Performance Evaluation and Preventive Measures for Aging of Different Bitumens, *Construction and Building Materials* 66, 209-213.

- Li B, Wang Y, Ren X, Teng X, Su X, 2019, Influence of Ultraviolet Aging on Adhesion Performance of Warm Mix Asphalt Based on the Surface Free Energy Theory, *Applied Sciences* 9, 2046.
- Li Y, Feng J, Chen, A, Wu S, Bai T, 2022, Development Mechanism of Aging Depth of Bitumen With Increasing UV Aging Time, *Case Studies in Construction Materials*, e01057.
- Li H, Tong P, Zhang X, Lin X, Li B, 2020, Influence of Ultraviolet and Oxygen Coupling Aging on Rheological Properties and Functional Group Index of Warm Mix Asphalt Binder, *Materials* 13, 4216.
- Li Y, Feng J, Wu S, Chen A, Kuang D, Gao Y, Zhang J, Li L, Wan L, Liu Q, 2022, Review of Ultraviolet Ageing Mechanisms and Anti-Ageing Methods for Asphalt Binders, *Journal of Road Engineering*.
- Lins V, Araújo M, Yoshida M, Ferraz V, Andrada D, Lameiras F, 2008, Photodegradation of Hot-Mix Asphalt, *Fuel* 87, 3254-3261.
- Liu X, Wu S, Liu G, Li L, 2015, Effect of Ultraviolet Aging on Rheology and Chemistry of LDH-Modified Bitumen, *Materials* 8, 5238-5249.
- Liu X, Wu S, Liu G, Li L, 2015, Optical and UV-Aging Properties of LDH-Modified Bitumen, *Materials* 8, 4022-4033.
- Liu X, Wu S, Pang L, Xiao Y, Pan P, 2014, Fatigue Properties of Layered Double Hydroxides Modified Asphalt and its Mixture, *Advances in Materials Science and Engineering* 2014,
- Mouillet V, Lamontagne J, Durrieu F, Planche J, Lapalu L, 2008, Infrared Microscopy Investigation of Oxidation and Phase Evolution in Bitumen Modified With Polymers, *Fuel* 87, 1270-1280.

- Pang L, Liu K, Wu S, Lei M, Chen Z, 2014, Effect of LDHs on the Aging Resistance of Crumb Rubber Modified Asphalt Construction and Building Materials 67, 239-243.
- Prowell B, Brown E, 2007, Superpave Mix Design: Verifying Gyration Levels in the Design Table, Transportation Research Board 573.
- Sun X, Qin X, Liu Z, Yin Y, Zou C, Jiang S, 2020, New Preparation Method of Bitumen Samples for UV Aging Behavior Investigation, Construction and Building Materials 233, 117278.
- Şengöz B, 2003, Asfalt Film Kalınlığının Bitümlü Karışımların Yaşlanmasına ve Suya Duyarlılığına Etkisi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tauste R, Navarro F, Sánchez M, Gámez M, 2018, Understanding the Bitumen Ageing Phenomenon, Construction and Building Materials, 192, 593-609.
- TCK, 2013, Türkiye Cumhuriyeti Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara.
- TS 118 EN 1426, 2002, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar İğne Batma Derinliği Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Traxler R, 1961, Relation Between Asphalt Composition and Hardening by Volatilization and Oxidation, Assoc Asphalt Paving Technol Proc.
- Tuffour Y, Ishai I, Craus J, 1989, Relating Asphalt Aging and Durability to its Compositional Changes, Association of Asphalt Paving Technologists Proc.
- Valkering C, Gooswilligen G, 1989, The Role of the Binder Content in the Performance-Related Properties of Asphaltic Mixes for Surface Layers, Proceedings, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists 58, 238-255.
- Wei H, Bai X, Qian G, Wang F, Li Z, Jin J, Zhang Y, 2019, Aging Mechanism and Properties of SBS Modified Bitumen Under Complex Environmental Conditions, Materials 12, 1189.

- Wu S, Zhu G, Liu G, Pang L, 2009, Laboratory Research on Thermal Behavior and Characterization of the Ultraviolet Aged Asphalt Binder, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 95, 595-599.
- Wu S, Han J, Pang L, Yu M, Wang T, 2012, Rheological Properties for Aged Bitumen Containing Ultraviolet Light Resistant Materials, *Construction and Building Materials* 33, 133-138.
- Wu S, Pang L, Liu G, Zhu J, 2010, Laboratory Study on Ultraviolet Radiation Aging of Bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering* 22, 767-772.
- Wu S, Pang L, Mo L, Qiu J, Zhu G, Xiao Y, 2008, UV and Thermal Aging of Pure Bitumen-Comparison Between Laboratory Simulation and Natural Exposure Aging, *Road Materials and Pavement Design* 9(sup1), 103-113.
- Xiao F, Amirkhania S, Karakouzian M, Khalili M, 2015, Rheology Evaluations of WMA Binders Using Ultraviolet and PAV Aging Procedures, *Construction and Building Materials* 79, 56-64.
- Xu S, Yu J, Sun Y, Wu S, 2015, Synthesis and Characterization of Organic Intercalated Layered Double Hydroxides and Their Application in Bitumen Modification, *Materials Chemistry and Physics* 152, 54-61.
- Ye F, Yang J, Huang P, 2006, Performance of Modified Asphalt Aging Under Ultraviolet Radiation, *Pavement Mechanics and Performance*, 102-109.
- Yi-Qiu T, Jia-Ni W, Liang F, Xing-ye Z, Hui-ning X, 2008, Ultraviolet Aging Mechanism of Asphalt Binder, *China Journal of Highway and Transport* 21, 19.
- Yu H, Bai X, Qian G, Wei H, Gong X, Jin J, Li Z, 2019, Impact of Ultraviolet Radiation on the Aging Properties of SBS-Modified Asphalt Binders, *Polymers* 11, 1111.
- Yu H, Yao D, Qian G, Cai J, Gong X, Cheng L, 2021, Effect of Ultraviolet Aging on Dynamic Mechanical Properties of SBS Modified Asphalt Mortar, *Construction and Building Materials* 281, 122328.

- Yu J, Feng P, Zhang H, Wu S, 2009, Effect of Organo-Montmorillonite on Aging Properties of Asphalt, *Construction and Building Materials* 23, 2636-2640.
- Yüknü K, Öztürk T, Komut M, 2020, Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Yılmaz M, Kök B, 2008, Stiren Butadien Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23, 811-819.
- Zeng W, Wu S, Pang L, Chen H, Hu J, Sun Y, Chen Z, 2018, Research on Ultra Violet (UV) Aging Depth of Asphalt, *Construction and Building Materials* 160, 620-627.
- Zeng W, Wu S, Wen J, Chen Z, 2015, The Temperature Effects in Aging Index of Asphalt During UV Aging Process, *Construction and Building Materials* 93, 1125-1131.
- Zhang C, Yu J, Xu S, Xue L, Cao Z, 2016, Influence of UV Aging on the Rheological Properties of Bitumen Modified With Surface Organic Layered Double Hydroxides, *Construction and Building Materials* 123, 574-580.
- Zhang D, Zhang H, Shi C, 2017, Investigation of Aging Performance of SBS Modified Asphalt With Various Aging Methods, *Construction and Building Materials* 145, 445-451.
- Zhang H, Yu J, Feng Z, Xue L, Wu S, 2012, Effect of Aging on the Morphology of Bitumen by Atomic Force Microscopy, *Journal of Microscopy* 246, 11-19.
- Zhang H, Yu J, Wang H, Xue L, 2011, Investigation of Microstructures and Ultraviolet Aging Properties of Organo-Montmorillonite/SBS Modified Bitumen, *Materials Chemistry and Physics* 129, 769-776.

Zhang H, Zhang D, 2015, Effect of Different Inorganic Nanoparticles on Physical and Ultraviolet Aging Properties of Bitumen, Journal of Materials in Civil Engineering 27, 04015049.

Zhang L, Li P, Hu G, Zhang S, Hong B, Wang H, Wang D, Oeser M, 2021, Study on the Aging Resistance of Polyurethane Precursor Modified Bitumen and its Mechanism, Sustainability 13, 9520.

İnternet kaynakları:

- 1- <https://www.epa.gov/sunsafety/calculating-uv-index> 24.03.2021
- 2- <https://www.digikey.com/en/articles/ultraviolet-radiation-attributes-and-benefits>
Erişim 27.07.2022
- 3- <https://eyescreen.cordlifetech.com/ultraviolet-radiation-harmful-or-harmless>
Erişim 27.07.2022
- 4- Niepce., 2016. Nicéphore Niépce House Museum inventor of photography. (<http://www.photo-museum.org/>) Dec. 14, 2016.

