



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



ATIK CEVİZ KABUĞU TOZUNUN BİTÜMÜN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Tekin ERTAŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2022

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**ATIK CEVİZ KABUĞU TOZUNUN BİTÜMÜN
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Tekin ERTAŞ

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Taylan GÜNAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir

2022

Tekin ERTAŞ tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan ‘Atık Ceviz Kabuğu Tozunun Bitümün Fiziksel Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi’ başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve.....tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı

:

Raportör Üye

:

Üye

:

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘Atık Ceviz Kabuğu Tozunun Bitümün Fiziksel Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi’ başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünün bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

.../.../2022

İmzası

Tekin ERTAŞ

ÖZET**ATIK CEVİZ KABUĞU TOZUNUN BİTÜMÜN FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİNİNCELENMESİ**

ERTAŞ, Tekin

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Taylan GÜNAY

Ağustos 2022, 117 sayfa

Dünya nüfusu ve globalleşme arttıkça ulaştırma hizmetlerinin önemi her geçen gün artmaktadır. İnsan hareketliliğinde en yoğun ve sürekli bir şekilde karayolları ile meydana gelmesi karayolu mühendisliğinin ne derece önemli olduğunun en büyük göstergesidir. Asfalt kaplamaların performanslarının artırılması, yaşlanma sürecinin ve kaplama da meydana gelebilecek olan bozulmaların en aza indirgenmesi için bitümü modifiye etme ihtiyacı duyulmuştur.

Yapılan tez çalışması kapsamında atık ceviz kabuğu tozunun bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapmış olduğum kapsamlı ve uzun süreli literatür taramasından sonra 50/70 penetrasyona sahip saf bitüm, ağırlıkça %7, %10, %12, %15 ve %17 oranında atık ceviz kabuğu tozu ile modifiye edilerek, saf bitüm ile birlikte toplam 6 adet bitümlü bağlayıcı hazırlanmıştır. Hazırlanan bitüm numuneleri üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozite (RV), dönel ince film halinde ısıtma (RTFO), basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda bitümlü bağlayıcıların sertleşme, yaşlanma, viskozite ve PG sınıfı gibi fiziksel özellikleri incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Atık ceviz kabuğu tozu, bitüm, modifikasyon, bitüm performans sınıfı.

ABSTRACT**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WASTE WALNUT SHELL
POWDER ON PHYSICAL PROPERTIES OF BITUMEN**

ERTAŞ, Tekin

Mrs in Civil Eng.

Master Thesis, Department of Civil Engineering

Supervisor: Dr.Öğr.Üyesi Taylan GÜNAY

August 2022, 117 pages

As the world population and globalization increase, the importance of transportation services increases everyday. The fact that the most used transportation form of human mobility is highways, the biggest indicator of the importance of highway engineering. There was a need to modify the bitumen in order to increase the performance of asphalt pavements, to minimize the aging process and the deterioration that may occur in the pavement.

Within the scope of in this thesis, the effect of waste walnut shell powder on the physical properties of bitumen was investigated. To this end, base bitumen with 50/70 penetration was modified with 7%, 10%, 12%, 15% and 17% waste walnut shell powder by weight, and thus, a total of 6 bituminous binders were prepared. Penetration, softening point, rotational viscosity (RV), rotational thin-film heating oven (RTFOT), pressure aging vessel tests (PAV) and dynamic shear rheometer (DSR) were applied on the prepared bituminous binders. As a result of the experiments, the physical properties of bituminous binders like hardening, aging, viscosity and PG class were investigated.

Keywords:Waste walnut shell powder, bitumen, modification, bitumen performance class.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimde ders aşaması bittikten sonra tez aşamasında literatür taraması yaparken yaşadığımız bölgede temini kolay olan ve asfalt kaplaması üzerinde faydalı olabileceğini düşündüğüm organik atıklarla ilgili detaylı bir araştırma yaptıktan sonra seçilmiş olunan malzemeler arasında ucuzluk, temin etme ve kimyasal yapısından dolayı atık ceviz kabuğu üzerinde detaylı bir şekilde araştırma yapıldı. Yapılan bütün bu araştırmalar sonucu “Atık Ceviz Kabuğu Tozunun Bitümün Fiziksel Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı tez konusuna karar verdikten sonra tez önerisini Fen Bilimleri Enstitüsüne ilettim. Onay süreci tamamlandıktan sonra malzeme temin edip çalışmalara başladım.

Temin edilen malzemenin boyutları 200 nolu elekten geçmediği için malzemeyi öğüttükten sonra tamamı 200 nolu elekten geçecek şekilde öğüttüm. Malzemeyi eledikten sonra 5 farklı modifiye karışım numunesi hazırladıktan sonra geleneksel testleri uygulayarak sonuçları tablolar halinde kaydettim. Karışım numuneleri üzerinde Superpave Bağlayıcı Şartnamesi bünyesinde bulunan deneyleri gerçekleştirdim. Tez önerimde bulunan bütün deneysel çalışmaların tamamladıktan sonra deney sonuçlarını çizelge ve şekillere işleyerek gerekli analizleri yaptım. Yaptığım bu işlemlerden sonra hazırladığım tez çalışmamı Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım mevzuatına uygun olacak biçimde yazmaya başladım.

İZMİR

.../.../2022

Tekin ERTAŞ

İÇİNDEKİLERSayfa

İÇ KAPAK	ii
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	i
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ.....	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xxv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxvi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	2
2.1. Bitüm.....	3
2.1.2. Bitümün Kimyasal Yapısı.....	4
2.2. Bitümün Reolojik Davranışı	5

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

2.2.1. Düşük sıcaklık davranışı	7
2.2.2. Yüksek sıcaklık davranışı.....	8
2.2.3. Orta sıcaklık davranışı.....	9
2.2.4. Yaşlanma (sertleşme) davranışı	12
2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)	15
2.4. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar.....	15
2.5. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler	17
2.5.1. Stabilité	17
2.5.2. Durabilite	18
2.5.3. Geçirimsizlik.....	18
2.5.4. İşlenebilirlik	18
2.5.5. Esneklik.....	19
2.5.6. Yorulmaya Karşı Direnç	19
2.5.7. Kaymaya Karşı Direnç	20
2.6. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar	21
2.6.1. Deformasyonlar.....	21

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.6.2. Tekerlek izi oluşumu	22
2.6.3. Oturmalar ve çökmeler	23
2.6.4. Ondülasyonlar ve kabarmalar	23
2.6.5. Çatlamlar	24
2.6.6. Yorulma Çatlakları	24
2.6.7. Düşük Sıcaklık Çatlakları	25
2.6.8. Kusma	26
2.6.9. Ayrışmalar	27
2.6.10. Dağılmalar ve sökülmeler	27
2.6.11. Soyulma	27
3. BİTÜM MODİFİKASYONU	28
3.1. Modifikasyonun Amacı	28
3.2. Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımlardaki Rolü	29
3.3. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması	31
3.4. Atıklar ve Literatür Taraması	35
3.5. Juglansregial (Ceviz) Türünün Genel Özellikleri	38

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN YÖNTEMLER	43
4.1. Geleneksel Test Yöntemleri.....	43
4.1.1. Penetrasyon deneyi.....	43
4.1.2. Yumuşama noktası deneyi	45
4.1.3. Penetrasyon indeksi (PI).....	47
4.2. Bitüm Performans Sınıflamasının Geleneksel Sınıflandırmaya göre Üstünlükleri.....	47
4.3. Superpave Test Yöntemleri.....	49
4.3.1. Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT).....	56
4.3.2. Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi (PAV).....	59
4.3.3. Dinamik kayma reometresi deneyi (DSR)	62
4.3.4. Dönel Viskozite (RV) Deneyi	70
4.5. İleri Test Yöntemleri	74
4.5.1. Farklı frekans ve sıcaklıklarda DSR deneyi.....	74
4.5.2 Çoklu gerilmeli sünme geri dönme testi (MSCR)	75

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5. LABORATUVAR TEST SONUÇLARI.....	80
5.1. Geleneksel Test Yöntemlerinin Sonuçları	80
5.2. Saf ve Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu Bitümlerin Dönel İnce Film Etüvü ile Yaşlandırılması Sonucuna İlişkin Deney Sonuçları.....	83
5.3. Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu ile Modifiye Edilen Bitümlerin Dönel Viskozimetre (RV) Cihazıyla Viskozitelerinin Belirlenmesi	84
5.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Cihazı Kullanılarak Saf ve Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu ile Modifiye Edilmiş Bitümlerin Yüksek Sıcaklık Performans Sınıflarının Belirlenmesi	86
5.5. Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcıların DSR Cihazı İle Farklı Frekans Deney Sonuçlarının İncelenmesi..	90
5.6. Saf ve Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu ile Modifiye Bitümlerin PAV (Basınçlı Yaşlandırma Kabı) Deneyi İle Uzun Vadeli Yaşlandırma Etkilerinin Araştırılması.....	97
5.7. Saf ve Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu ile Modifiye Bitümlerin Çoklu Gerilmeli Sünme Geri Dönme (MSCR) Deneyiyle Elastik Özelliklerinin Tespit Edilmesi	99
6.BULGULAR	103
7. SONUÇLAR.....	107
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	109

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

TEŞEKKÜR.....116

ÖZGEÇMİŞ117



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Ham petrolün damıtılması işlemi.....	4
2.2 Bitümün yapısı ve oluşum oranları.....	5
2.4 Bitümün sıcaklıkla değişimi.	6
2.5 Elastik malzemede oluşan geçici deformasyonun yük ve zamana bağlı değişimi.....	7
2.6 Elastik malzemelerde yük-deformasyon ilişkisi.....	8
2.7 Bitüm taneciklerinin akış hareketi.....	8
2.8 Uygulanan yük ve zamana göre kalıcı deformasyon durumu	9
2.9 Yay-amortisör modelinin viskoelastik davranış modeli	10
2.10 Maxwell modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi.	11
2.11 Kelvin modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi.	11
2.12 Burger modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi.	12
2.13 Bitümdeki bileşenlerin yaşlanma sonucunda değişimi.....	13
2.14 Bitümün karıştırma, taşıma ve uygulama sürecindeki yaşlanması grafiği. ...	14
2.15 Ham petrolün damıtılması sonucu oluşan asfalt emülsiyonları.....	17
2.16 BSK'ların sıcaklık, gerilme ve yorulma ömrü bağlantısı	20

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.17 Kaplama pürüzlülüğü.....	20
2.18 Tekerlek izi oluşumu.....	22
2.19 Esnek üstyapı ve oluşan bozulmalar	24
2.20 Kaplama gerilme durumu ve düşük sıcaklık çatlakları	25
3.1 Statik yükler altında bitümün visko-elastik davranışı.....	29
3.2 Dinamik yükler altında bitümün visko-elastik davranışı.	30
3.3. Yeşil kabuklu ceviz meyvesi.....	38
3.4 Türkiye’de ceviz yetiştirilen iller.	39
3.5 Dünyada başlıca ceviz üreticisi ülkeler.....	40
4.1 Penetrasyon deney aleti	45
4.2 Yumuşama noktası deney cihazı.....	46
4.3 Farklı bağlayıcıların sıcaklık-viskozite değişim grafiği.....	50
4.4 Esnek üst yapısında bozulma çeşidine göre uygulanan performans deneyleri.	53
4.5 RTFO deney cihazı.....	57
4.6 RTFO deney aletinde kullanılan cam şişeler.....	57
4.7 PAV deney aleti.....	59

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.8 Gaz alma (degas) cihazı.....	61
4.9 DSR cihazının görünümü.....	62
4.10 DSR cihazının çalışma prensibi.....	63
4.11 Kompleks kayma modülü ve bileşenleri.....	64
4.12 Kompleks kayma modülü bileşenleri.....	65
4.13 Viskoz ve elastik malzemeler de gerilme-deformasyon ilişkisi.	65
4.14 Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi.....	66
4.15 Kayma gerilmesi, deformasyon ve faz açısı bağlantısı.	66
4.16 25 mm çapa sahip DSR numuneleri.....	70
4.17 Dönel viskozimetre aleti ve sıcaklık ünitesi	71
4.18 RV cihazının çalışma prensibi.	72
4.19 Logaritmik viskozite-sıcaklık eğrisi.	73
4.20 MSCR deneyine ait deformasyon-zaman grafiği eğrisi.....	76
5.1 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların geleneksel deney sonuç grafiği.....	82
5.2 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı grafiği.....	84

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

5.3 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların orijinal numunelerine ait yenilme sıcaklık değerleri	88
5.4 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılmış numunelerine ait yenilme sıcaklık değerleri	89
5.5 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı orijinal bitümlü bağlayıcıların sıcaklık (°C) – tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) ilişkisi.....	89
5.6 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı RTFO ile yaşlandırılmış bağlayıcıların sıcaklık (°C) – tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) ilişkisi	90
5.7 B bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	91
5.8 B bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	91
5.9 B bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	91
5.10 B-7AC bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	92
5.11 B-7AC bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	92
5.12 B-7AC bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	92
5.13 B-10AC bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	93
5.14 B-10AC bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	93
5.15 B-10AC bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	93
5.16 B-12AC bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	94

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.17 B-12AC bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	94
5.18 B-12AC bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	94
5.19 B-15AC bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	95
5.20 B-15AC bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	95
5.21 B-15AC bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	95
5.22 B-17AC bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	96
5.23 B-17AC bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	96
5.24 B-17AC bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri	96



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması	31
3.2 Sık kullanılan modifiyerlerin bitüm üzerindeki etkisi.	32
3.4 Sık kullanılan asfalt modifiyerlerin olası olumlu etkileri	34
3.5 Yıllara göre Türkiye'de ve Dünya'da ceviz üretim miktarı (ton).....	40
4.1 Superpave bitümlü bağlayıcı deneyleri, amaçları ve performans parametreleri.	52
4.2 Superpave bitümlü bağlayıcı deneylerinde kullanılacak bitüm çeşitleri.	53
4.3 Superpave bağlayıcı şartnamesinde kullanılan deneyler ve bitümün yerine getirmesi gereken şartname değerleri.	54
4.4 Bitümlü bağlayıcı sınıflarına göre PAV deneyi sıcaklıkları	61
4.5 Trafik hızlarına eş değer deney frekansları	75
4.6. AASHTO MSCR standartları.	79
5.1 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların geleneksel test sonuçları	81
5.2 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılara ait kütle kayıbı deney sonuçları	83
5.3 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların dönel viskozite deney sonuçları.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.4 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların DSR deney sonuçları	87
5.5 PAV kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları	98
5.6 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi $J_{nr}(kPa-1)$ değerleri	100
5.7 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi $R(\%)$ değerleri	101
5.8 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi $J_{nr,diff}(\%)$ ve $R_{diff}(\%)$ değerleri	102

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
τ	Kayma Gerilmesi
F	Uygulanan Kuvvet
A	Plaka Alanı
$\dot{\gamma}$	Kayma Hızı
η	Viskozite
E	Elastisite Modülü
ε_E	Elastik Deformasyon
ε_{η}	Kalıcı Deformasyon
G^*	Kompleks Kayma Modülü
G''	Depolama Modülü
G'	Kayıp Modül
δ	Faz açısı
$G^*/\sin \delta$	Tekerlek izi parametresi
ZSV	Sıfır kayma viskozitesi
a_T	Kaydırma faktörü
C_1, C_2	Ana eğri denklem sabitleri
ΔH	Aktivasyon enerjisi
ω	Açısal frekans
$* 0$	Sıfır kayma viskozitesi
R	Ortalama elastik geri dönme
J_{nr}	Geri dönmeyen sünme uygunluğu
$J_{nr,diff}$	İki yükleme arasındaki geri dönmeyen sünme uygunluğu farkı
R_{diff}	İki yükleme arasındaki geri kazanılan deformasyon farkı
$G^*\sin \delta$	Yorulma çatlağı parametresi

Kısaltmalar

KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
BSK	Bitümlü sıcak karışım
SBS	Stiren-Butadien-Stiren
EVA	Etilen Vinil Astatat
PVC	Polivinil Klorür
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
PI	Penetrasyon İndeksi
RTFOT	Dönel ince film halinde ısıtma deneyi
AC	Asfalt çimentosu
CA	Aktif Karbon
RV	Dönel viskozimetre
SBR	Styrene-Butadien-Erubber
DSR	Dinamik Kayma Reometresi
SEBS	Styrene ethylene butadiene styrene
PAV	Basıncılı yaşlandırma kabı
BBR	Kiriş eğme reometresi
MSCR	Çoklu gerilme sünme-toparlanma deneyi
NHCRP	Ulusal ortak karayolu araştırma programı
PG	Performans sınıfı
DTT	Doğrudan Çekme Deneyi
AASHTO	Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık Birliği

1.GİRİŞ

Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında atık bir organik olan ceviz kabuğunun kurutularak toz haline getirilmiş halinin bitümlü bağlayıcı numunelerinin reolojik ve fiziksel özellikleri üzerinde nasıl tesirler oluşturacağı hedeflenmiştir. Organik bir atık olan kuru yeşil ceviz kabuğu tozu, B 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitüme ağırlıkça %7, %10, %12, %15 ve %17 oranlarında ilave edilerek 5 ayrı katkılı numune hazırlanmıştır. Belirlenen bu oranlar organik maddelerin kullanımı kapsamında literatür çalışması yapılarak belirlenmiştir.

Atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ile hazırlanmış olan bağlayıcılarla penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri, dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFO) ile bitümlü bağlayıcının kısa süreli yaşlandırılması işlemleri, dönel viskozite (RV) ile bitümlerin viskoz düzeyinin tespiti, basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) sayesinde bitüm numunelerinin uzun süreli yaşlandırılması işlemleri, PG sınıflarının belirlenmesi çalışmaları için de dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi uygulanmıştır. Atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilaveli bitüm numunelerinin deneysel veri sonuçları ile saf B 50/70 bitümlerine ait deney sonuçları analiz edilerek bu numunelerin fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki tesirleri belirlenmiştir.

Atık ceviz kabuğu tozu ile modifiye edilmiş bağlayıcı numuneleri ile saf bağlayıcılar üzerinde yapılan deney sonuçları analiz edilerek bitüm içerisindeki katkı oranları için optimum katkı oranı belirlenmiştir. Bu oranlar üzerinde farklı frekans deneyleri yapılarak bitüm numunelerinin reolojik özelliklerine ait veriler bulunmuştur. Yapılan araştırma ve deneyler sonucunda optimum katkı oranının saptanması amaçlanmıştır.

2.GENEL BİLGİLER

Bir ülkede bulunan kaliteli bir ulaşım ağı, o ülkenin kalkınması açısından son derece önemli bir güç oluşturmaktadır. Ülkenin koşulları dikkate alınarak diğer ulaşım çeşitleri ile bağlantılı bir biçimde yapılan karayolları, Türkiye sınırları içerisinde güvenli bir ulaşım, hızlı bir ulaşım ve ekonomik bir ulaşım hizmeti oluşturması söz konusudur (Yayla, 2018).

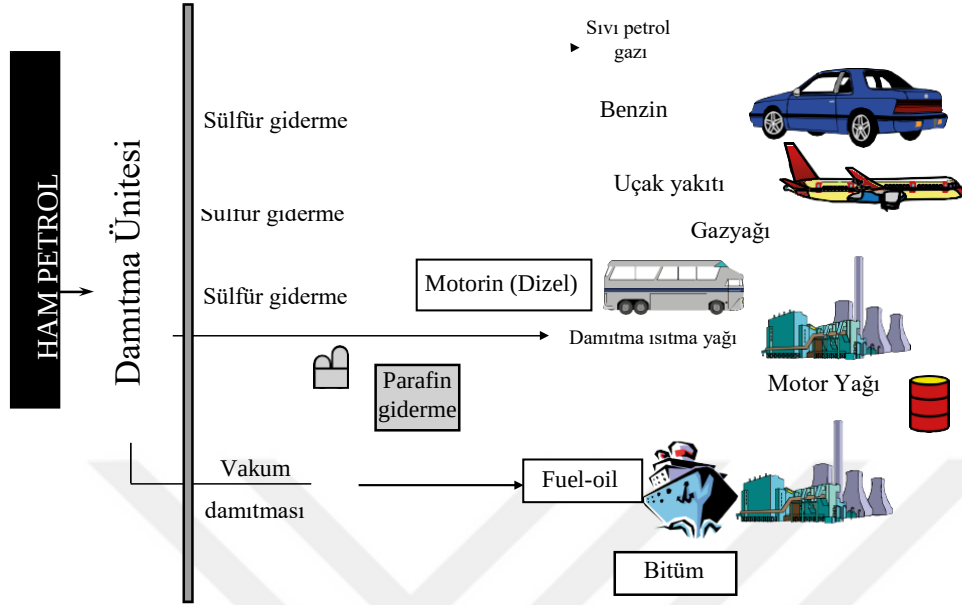
Dünya coğrafyasındaki beşeri ve ekonomik hareketliliğin yoğun olduğu ülkeler göz önüne alındığında ulaşım sistemlerinin önemli ölçüde gelişmiş olduğu görülmektedir. İster yük taşımacılığı olsun, ister yolcu taşımacılığı olsun ulaştırma sistemleri içerisinde karayollarının çok önemli ve kritik bir lokasyonda olduğu görülmektedir. 21. yüzyıl da aynen diğer gelişmekte olan devletler gibi ülkemizde de insan ve yük taşımacılığı da hızlı bir şekilde artmaktadır. Yük ve yolcu taşımacılığındaki ihtiyaçlar doğrultusunda karayolu alanında yapılan yatırımlarda bu duruma paralel bir şekilde artış göstermektedir. Genel olarak karayolu tasarım en kesitleri göz önüne alındığında asfalt kaplama tabakası olarak esnek üst yapılar ve beton (rijit) kaplama türlerinin yaygın olduğu bilinmektedir. Başka devletlerde olduğu gibi ülkemizde de karayolları inşaatının üst yapısında çoğunlukla esnek üst yapılar seçilmesi söz konusudur (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013).

İnsan ve araç trafiğine uygun yuvarlanma yüzeyinin en uygun olduğu esnek üst yapılar trafik yükünden gelecek olan yükleri alt temel ve temel gibi yolun altyapısını meydana getiren tabakalara ileten bölümlerdir. Esnek üstyapı bölümleri kaba agrega, ince agrega ve filler biçimindeki agregalar ile bitümün çeşitli oranlarda karıştırılması ile oluşturulurlar. Esnek üst yapı bölümleri, araç ve yaya trafiğinin güvenli bir şekilde sürdürülebilmesi için; bu yüklerin yanı sıra su, sıcaklık ve don olayları gibi iklim koşullarına karşıda yolun stabilitesini koruması beklenmektedir (Umar ve Ağar, 1982).

2.1. Bitüm

Bitüm kelimesi için TDK sözlüğü incelendiğinde “keskin bir kokuya sahip, alev ve koyu duman salarak yanan, karbon ve hidrojen bakımından çok zengin doğal yakıt maddelerinin genel adı, yer sakızı” şeklinde tanımlanması söz konusudur (TDK,2021). Bitüm, ham petrolün rafine edilmesi esnasında ham petrol içerisindeki mevcut bulunan benzin, sıvı petrol gazı ve dizel gibi ağır olmayan fraksiyonların ortadan kaldırılmasıyla oluşturulan hidrokarbonun bir türevidir (Hunter vd., 2015).

Bitüm, (ASTM) Amerikan Malzeme ve Test Birliğinin tabiriyle asfaltlar, ziftler, katranlar ve asfaltitler gibi hafif olmayan hidrokarbonlardan bir araya gelen ağır moleküllü bir malzeme olarak ifade edilmektedir. ASTM bu tanımında bitümü, koyu renkli veya siyah doğal yada yapay, yeryüzünde katı, yarı katı ya da viskoz bir şekilde varlığını sürdürebilen bağlayıcı bir madde olarak tanımlamıştır. Bitümlü bağlayıcılar, katran ve asfalt olmak üzere iki başlıkta incelenir. Asfaltlar ise yapay asfaltlar ve doğal asfaltlar olmak üzere iki şekilde incelenirler (Orhan, 2005).

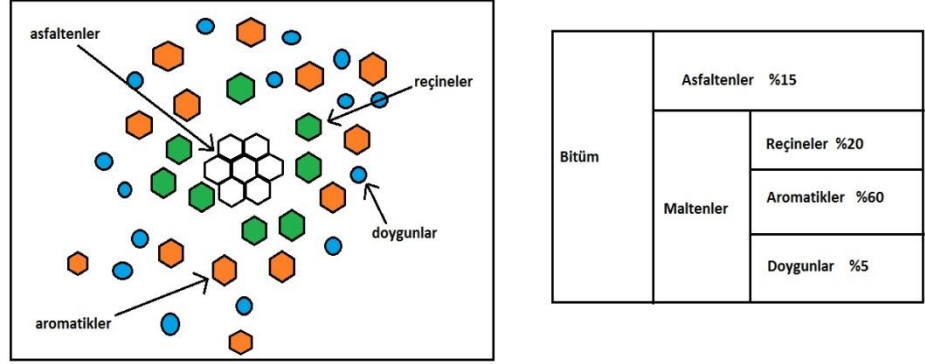


Şekil 2.1 Ham petrolün damıtılması işlemi (Hunter vd., 2015).

Bitümlü bağlayıcı numuneleri ile yapılan çalışmalarda farklı bir terminoloji durumu söz konusudur. Bundan dolayı çalışmaları incelerken bazı durumları göz önüne alması gerekir. Bitümlü sıcak karışım içerisindeki bağlayıcı maddeye ‘bitüm’ denildiği gibi, kaplamaya ise ‘asfalt’ denildiği durumlar var iken bağlayıcı maddeye ‘asfalt’, kaplamaya ise “asfalt kaplama” denilen terminolojiler de vardır. Bunun yanı sıra, asfalt, asfalt çimentosu, bitüm ve asfalt bağlayıcı ifadeleri de çoğunlukla birbirlerinin yerine kullanıldığı durumlar da mevcuttur. Bu çalışmam da bağlayıcı özelliğe sahip yapı için bitüm, kaplama tabakasını oluşturan kısım için ise bitümlü sıcak karışım, BSK terimleri kullanılacaktır.

2.1.2. Bitümün Kimyasal Yapısı

Bitüm veya bitümlü sıcak karışımın kimyasal oluşumu kompleks bir yapıdır. Bundan dolayı tam olarak kimyasal analizör olmakta ve analiz neticesinde sayısal değerler oluşmaktadır. Bitümü, asfaltenler ve maltenler olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Maltenler de üç gruba ayrılmış olup bunlar; aromatikler, doyunlar ve reçinelerdir (Geçkil, T., 2008; Yelken, F., 2009).



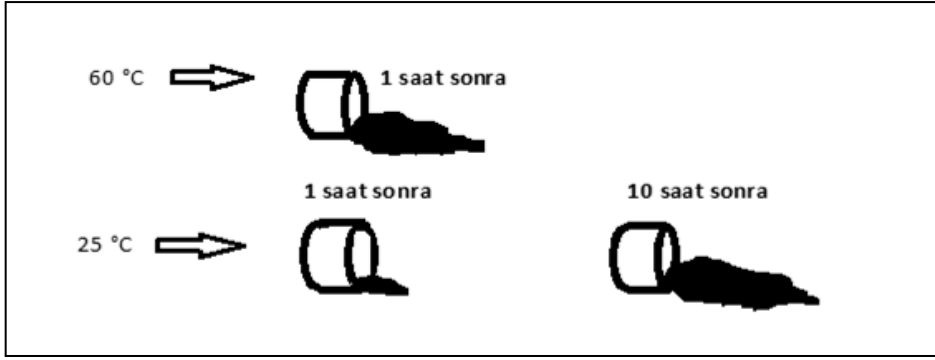
Şekil 2.2. Bitümün yapısı ve oluşum oranları (Geçkil, T., 2008).

Asfaltenler, genel olarak hidrojen ve karbondan meydana gelen ve içerisinde biraz sülfür, nitrojen ve oksijen içeren n-heptan içerisinde çözünme gibi bir duruma sahip olmayan siyah veya kahverengi olan kendine has şekilleri olmayan yapılardır. Genelde yüksek molekül ağırlığına sahip olup, polar yapıda bulunurlar. Asfaltın yaklaşık olarak %5-25'ini meydana getirirler (Yılmaz, M., 2011).

Bitümün n-heptan kısmında çözünen bölümü olan maltenler üç grupta incelenir (Yılmaz, M., 2011). İlk olarak reçineler n-heptanda çözülebilen moleküllerdir. Asfaltenlere benzer durumunda olan ve yüksek ölçüde karbon ve hidrojenle ve az ölçüde sülfür, oksijen ve nitrojen barındırarak meydana gelmiştir. Aromatikler ise asfaltın %40-65'ini oluştururlar. Koyu kahverengine sahip viskoz yağ şeklinde olmaları söz konusudur. Neticede doymunlar genel itibariyle yağlı ve renksiz bir yapı barındırarak parafinik ve naftanik yağ çemberlerini barındıran yapılardır. Asfaltın hemen hemen % 5-20'sini oluştururlar (Geçkil, T., 2008, Yılmaz, M., 2011).

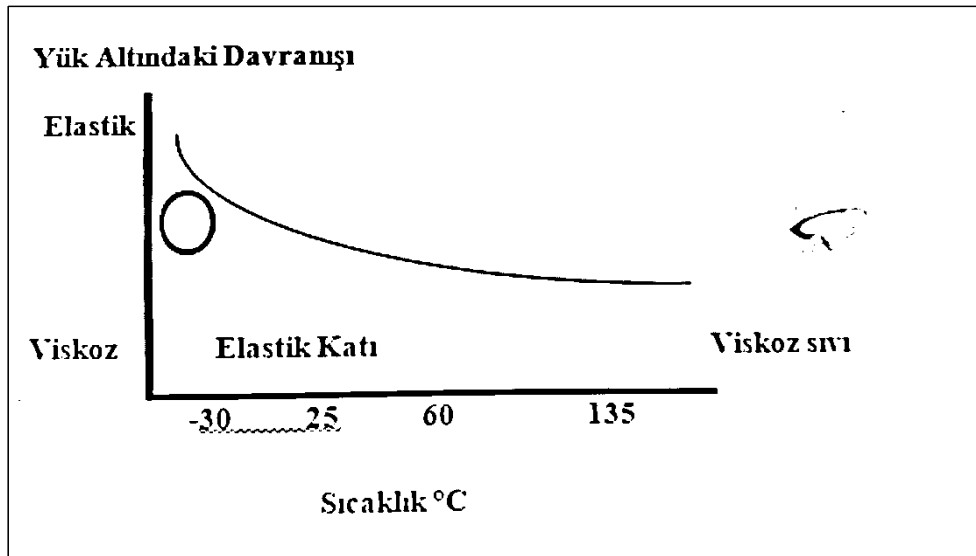
2.2. Bitümün Reolojik Davranışı

Bitümün bilimsel yapılı özellikleri açısından ele alındığında viskoelastik bir özellik ortaya koyan termoplastik bir oluşum olup trafik yüklerinin altında sıcaklığa, yükün uygulanma süresine ve yükün şiddetine göre değişik davranışlar ortaya çıkaran bir malzemedir.



Şekil 2.3 Bitümün çeşitli sıcaklık ve zamanlardaki davranışı (Tunç, A., 2001)

Bitümün 60 °C’de ve 1 saatte gösterdiği akma hareketi ile 25 °C ve 10 saatte gösterdiği akma hareketini farksız olduğu kanıtlanmıştır. Bu durum da uygulama zamanı ile sıcaklık arasında benzer ilişkiler olduğunun ispatıdır. Bu tür cisimler az yük altında viskoz hareketi, orta yük altında orta elastik, büyük bir yükleme hızında da elastik bir yapı sergilemiştir. Bitümün sahip olduğu reolojik özellik bitümlü sıcak karışımların da viskoelastik bir yapı göstermesini sağlamıştır. Bundan dolayı yükleme süresi ve sıcaklık karışımın rijitliğini doğrudan tesir ettiği söylenebilir (Seloğlu, M.,2015).

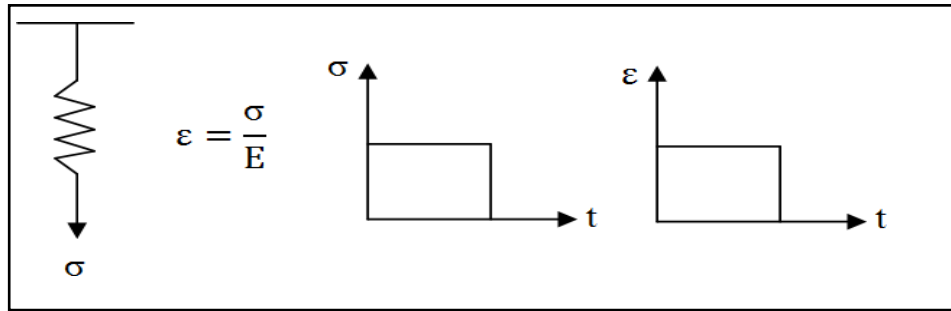


Şekil 2.4 Bitümün sıcaklıkla değişimi (Tunç, A., 2001).

2.2.1. Düşük sıcaklık davranışı

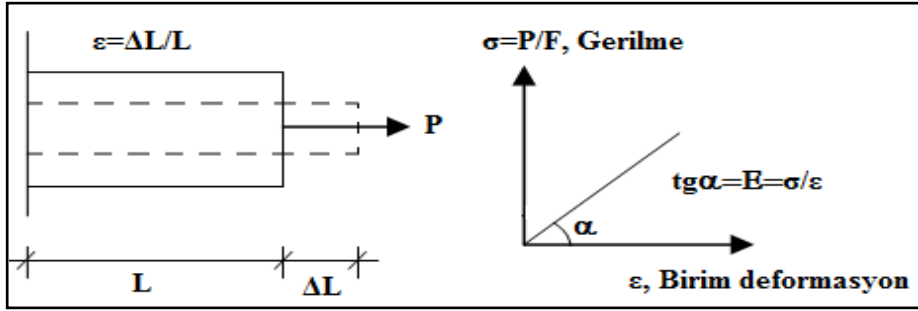
Bitüm, soğuk hava koşullarında veya düşük olmayan hıza sahip araç trafiğinin neden olduğu kısa zamanlı yüklemeler altında elastik bir katı hareketi sergiler. Böyle durumlara maruz kalan bitümlü bağlayıcılara taşıma potansiyelinden daha fazla araç yüklemesi yüklendiğinde, bitümlü bağlayıcı içerisinde kopmalar meydana gelmesinin yanı sıra kırılma ve çatlamalara da maruz kalabilir. Bu durumdan dolayı yüksek olmayan sıcaklıklarda elastik bir katı gibi davranmasına rağmen, bitüm aşırı yüklenmeden dolayı kırılma özelliği sergileyerek çatlayabilir. Bu nedenlerden dolayı esnek üst yapılar soğuk iklim şartlarında termal çatlaklar (düşük sıcaklık çatlakları) görülmesi yüksek olasıdır. Adı geçen çatlakların görülmesine yüksek olmayan sıcaklık nedeniyle üst yapının yüzeyinin büzülme hareketi yaparak meydana getirdiği iç gerilmeler olması söz konusudur (Altaş, 2002; Dinç, 1999).

Elastik bir malzemenin üstüne herhangi bir yük tesir edildiğinde, malzemedeki deformasyon değeri ile orantılı bir şekilde artar. Ama malzeme üzerindeki yük kaldırıldığı zaman deformasyon ortadan kalkarak malzeme eski halini tekrar alır (Altaş, 2002; Dinç, 1999).



Şekil 2.5 Elastik malzemede oluşan geçici deformasyonun yük ve zamana bağlı değişimi (Uncu, D., 2017).

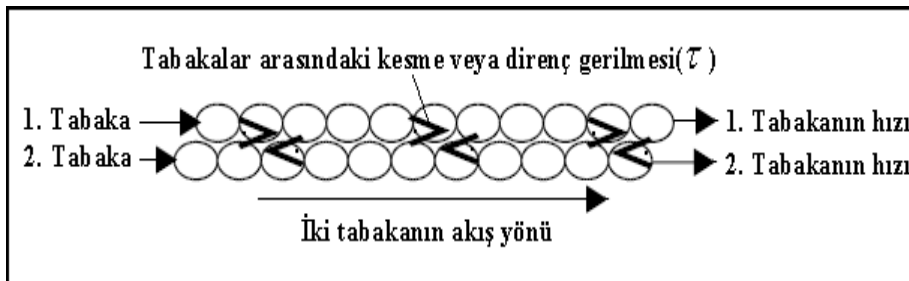
Böyle malzemeler Şekil 2.6'da gösterilen yük-deformasyon arasında lineer bir ilişki olan Hooke kanununu işaret eder.



Şekil 2.6 Elastik malzemelerde yük-deformasyon ilişkisi (Uncu, D., 2017).

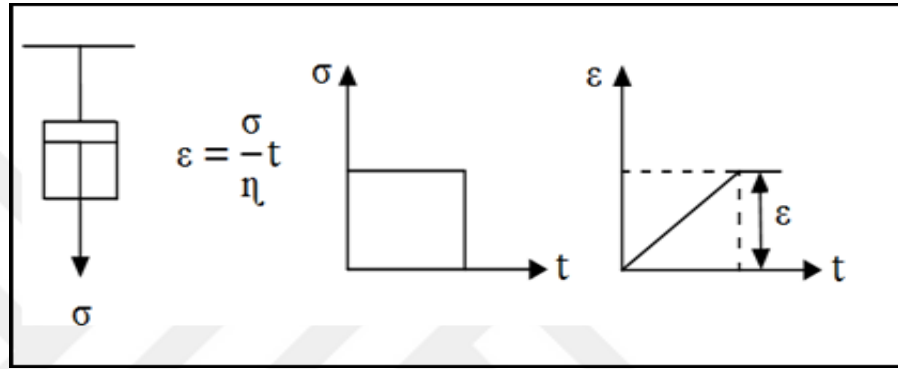
2.2.2. Yüksek sıcaklık davranışı

Soğuk olmayan hava koşulları veya durgun haldeki, yavaş hareketli ve/veya hafif olmayan araçların sebep olduğu değişmeyen ve sürekli yük şartlarıyla baş başa kalan esnek üst yapıya sahip yollarda, bitüm viskoz davranış sergiler. Böyle durumlarda yol esnek üst yapısını oluşturan bitümlü sıcak karışımın yük taşıyan elemanı sadece agrega olmaktadır. Sıcak bitümün yavaş akış hareketi güçlü bir mikroskop altında incelendiğinde, moleküllerin tabakalarının Şekil 2.7'de gösterildiği gibi birbirlerinin üzerinden kayarak ayrıştığı tespit edilmiştir. Taneciklerin oluşturduğu katmanlar arasındaki kayma direnci ya da sürtünme kuvveti, tanecikleri üzerinde kayma hareketi gösteren tabakaların hızı ile ilgili bir oluşumdur. Bu direnme kuvveti üst tabaka alt tabakayı ileri doğru itmeye çalışırken alt tabaka üst tabakayı yerinde tutmaya çalışmasıyla bilinmektedir (Dinç, 1999).



Şekil 2.7 Bitüm taneciklerinin akış hareketi (Berkers,2005; Fitzgerald,2000).

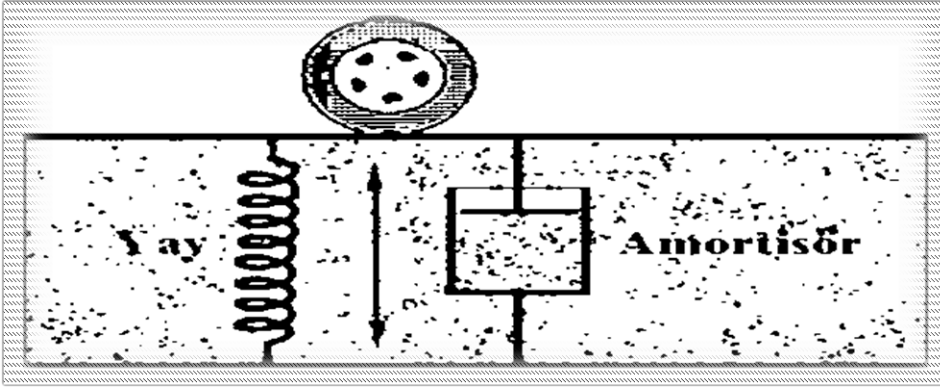
Yağ kutusu modeli ile açıklanan bu davranış viskoz maddelerin sergilediği bir davranış durumu olması söz konusudur. Viskoz malzemelere yük uygulandığı zaman, malzemede deformasyon oluşmakta ve yükün uygulama süresince deformasyonunun artması söz konusudur. Viskoz malzemeden yük kaldırılrsa bile, oluşan deformasyon devam edip kalıcı deformasyonu meydana getirir. Viskoz davranış sergileyen bitüm ideal bir sıvı gibi davranır. İdeal sıvı haldeki malzemelerin enerji depolayamamalarının nedeni şekil değiştirmeleridir. Şekil değişimleri kalıcı ve geri dönüşümü olmamaktadır (Choquet,1994).



Şekil 2.8 Uygulanan yük ve zamana göre kalıcı deformasyon durumu (Uncu, D., 2017).

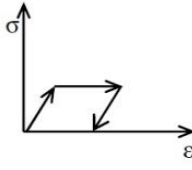
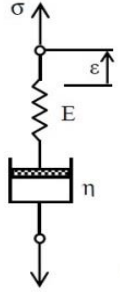
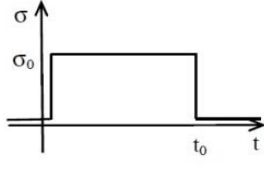
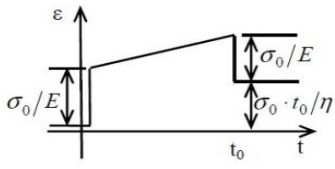
2.2.3. Orta sıcaklık davranışı

Dünyayı göz önüne alırsak iklim şartları ne aşırı soğuk nede aşırı sıcak olduğu açıkça görülmektedir. Bu sebeple bitüm, kıvama sahip bir sıvı halin oluşumunun yanı sıra elastik katı özelliğini de sergilemektedir. Bu davranış biçimiyle esnek üstyapı da kullanılan bitüm, çok iyi bir yapışkan malzeme olmasının yanı sıra sergilemiş olduğu özelliklerinden dolayı da karmaşık bir durumu söz konusudur. Bitüm bu özelliklerinden dolayı literatürde viskoelastik bir malzeme olarak açıklanmaktadır. Bitüm ısıtıldığı zaman, rahat şekil alabildiğinden dolayı pürüzsüz ve çok az boşluğa sahip bir yüzey oluşturacak şekilde karıştırmaya müsait bir malzeme olduğu bilinmektedir. Böyle bir durum söz konusu olunca da agreganın dış yüzeyinin bitümle sarılmasına ve rahat bir şekilde sıkıştırılabilmesine imkan vermektedir. Soğuduğu zaman ise viskoz bir katı gibi hareket eden bitümün yapıştırıcı özelliği sayesinde agregayı bir arada tutmasına olanak sağlar. Bitümün yük tesirlerine karşı oluşturduğu bu hareket şekli Şekil 2.9'da olduğu gibi “yay-amortisör” modeliyle gösterilebilir (Avcı,2009).



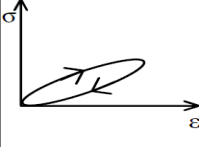
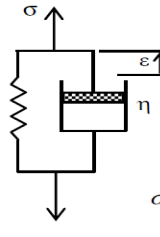
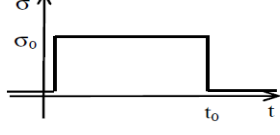
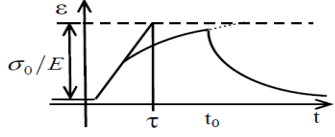
Şekil 2.9 Yay-amortisör modelinin viskoelastik davranış modeli (Avcı,2009).

Esnek üst yapı da herhangi bir yüke maruz kalan bitüme yay tarafından gösterilen ilk tepki olurken, viskoz durum tepkisini de sıcak havalarda yay temsil etmektedir. Bazen plastik davranış gösteren bitüm bazen de trafik yük tesiri altında elastik ya da viskoelastik bir hareket göstermesi söz konusudur. Bu durumda esnek üst yapı da görülen deformasyonlar uygulanan kuvvetin büyüklük derecesine göre eski durumuna gelmekle beraber kısmen de görülmeyebilir (Avcı, 2009). Viskoelastik malzemelerin davranışlarını araştırmak amacıyla; Maxwell ve Kelvin teoremleri kullanılmaktadır. Maxwell'in sisteminde Şekil 2.10'da gösterildiği gibi birbirine seri olarak bağlanmış yağ kutusu ve bir adet yay mevcuttur. Maxwell'in sisteminde ilk kuvvet uygulanmasından sonra oluşan ani deformasyonun yanı sıra elastik deformasyon olayı da yay sayesinde görülmesi durumu söz konusudur. Uygulanan kuvvetin sürekliliğinin artması ile beraber, oluşan deformasyon viskoz özellikteki yağ kutusuna transfer edilir. Modele uygulanan yüklemenin ortadan kaldırılmasının akabinde yay eski halini alır, ama yağ kutusunun hareketi durmasına rağmen meydana gelen değişim eski halini almaz. Bu zincir esnek üst yapıda oluşan kalıcı deformasyonu sembolize etmektedir (Mezger, 2011).

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	Şekil Değiştirme
 $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$ $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ $\varepsilon_1 = \sigma_1 / E$ $\varepsilon_2 = \sigma_2 / \eta$ $\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} / E + \sigma / \eta$	  	Zamanla bağımlı	Geri dönebilir / Geri dönebilme yok

Şekil 2.10 Maxwell modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi (Öner,2016).

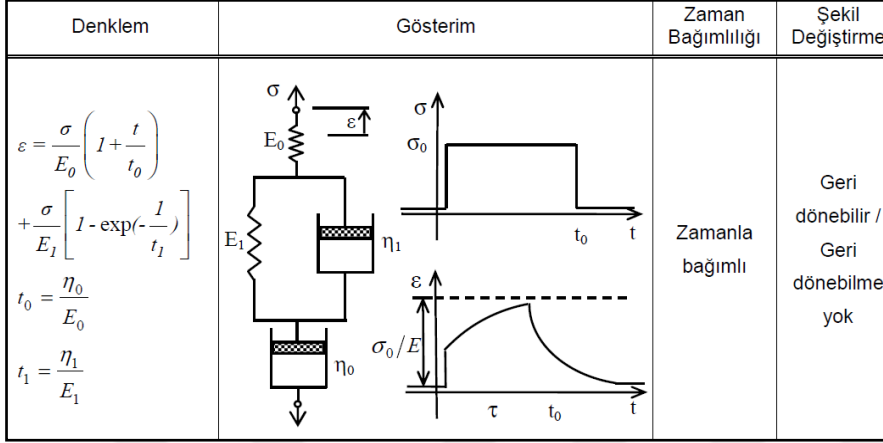
Viskoelastik davranışı sembolize eden başka bir model sistemi de Kelvin diye adlandırılmaktadır. Kelvin modelinde ise, Şekil 2.11' de belirtildiği gibi yay ve yağ kutusu paralel bir biçimde oluşmaktadır. Kelvin'de sisteme yükleme yapıldığında deformasyon miktarı yavaş yavaş artarken, yük ortadan kaldırıldığında ise yay sayesinde deformasyonda artan bir azalma durumu mevcuttur.

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	Şekil Değiştirme
 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ $\varepsilon_1 = \sigma_1 / E$ $\varepsilon_2 = \sigma_2 / \eta$ $\eta \dot{\varepsilon} + E \varepsilon = \sigma$	  	Zamanla bağımlı	Geri dönebilir

Şekil 2.11 Kelvin modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi (Öner,2016).

Bitümlü sıcak karışımların viskoelastik davranışını modellemekte bu iki modelin eksik durumundan dolayı Maxwell ve Kelvin modelleri beraber düşünülerek birbirlerine Şekil 2.12'de ki gibi seri olarak bağlanma ihtiyacı hissedilmiştir. Meydana gelen bu model Burger modeli olarak tanımlanmıştır. Modelde mevcut olan ilk önceki yay ani elastik deformasyonu temsil etmekte ve paralel bir şekilde bağlanmış olan yay ve yağ kutusu zamanla değişen

deformasyonu (viskoz ve gecikmiş elastik deformasyonu), sondaki yağ kutusu ise viskoz (kalıcı) deformasyonu temsil edecek şekilde dört farklı unsurdan meydana gelmiştir.



Şekil 2.12 Burger modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi (Öner,2016).

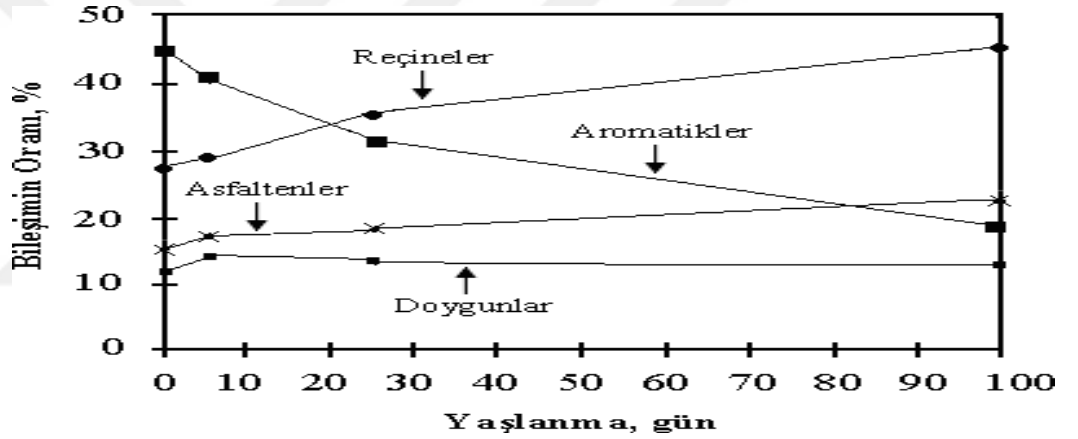
Böyle reolojik modeller tam anlamıyla bitümün reolojik davranışlarını temsil etmekte yetersiz kalmıştır. Bu modeller yalnızca viskoz ve elastik deformasyonların meydana gelişini ve gerilme deformasyon zaman ilişkisini göstermek açısından genel bir fikir vermektedir (Tunç, A,2007).

2.2.4. Yaşlanma (sertleşme) davranışı

Esnek üstyapı kaplamalarının kullanım sürelerini bozulmadan tamamlamaları söz konusudur. Bunun oluşumu ise bitümün muhafaza edilmesi, üretim ve hizmet süresi süresince aşırı derecede sertleşmemesi istenir. Ancak, bitümün organik bir malzeme olmasından dolayı, oksijen, ultraviyole ışınları ve sıcaklık değişimleri gibi dış atmosferik tesirlerden etkilenecek sertleşme davranışı göstermektedir. Bitüm adı geçen atmosferik etkenler nedeniyle ağır ağır oksidasyona maruz kalır. Sıcaklığa, bitüm tabakasının kalınlığına ve zamana göre oksidasyon oranının sahip olduğu derece çeşitlilik gösterebilir. Bu çeşitlilik 100°C'nin üstündeki her 10°C'lik artış bitümün oksidasyonunu hemen hemen iki katına çıkarmaktadır. Bitümün sertleşmesinde en önemli faktör olan oksidasyon, bitümün daha kırılgan olmasına ve yaşlanma sürecinin başlamasına sebep olur.

Bunun sonucunda bitüm daha sert ve daha kırılğan, geniş ve karmaşık moleküller oluşturmaktadır. Yaşlanma nedeniyle eski bitümlü sıcak karışımlar çatlamaya karşı daha duyarlı oldukları bilinmektedir (Dinç, 1999; Whiteoak and Read, 2003).

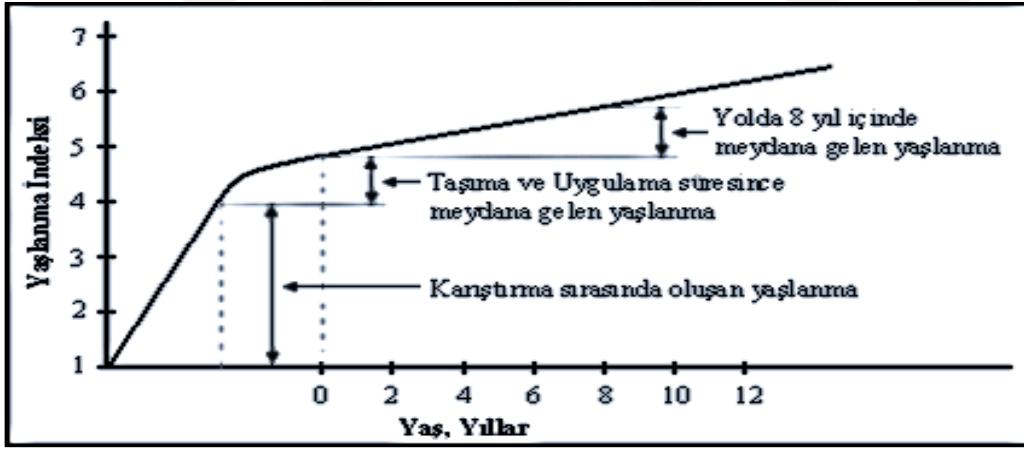
Bitümün barındırdığı uçucu bileşenlerin, sıcaklık tesiri ve havayla teması sonucu buharlaşmasında bitüm içerisindeki moleküllerin oranları da değişmektedir. Şekil 2.13'de bitümün 85°C sıcaklıkta 100 günlük zaman zarfında oluşan yaşlanma sonucunda, farklı zamanlarda alınan bitümlü bağlayıcı numunelerdeki oluşumlarının % olarak miktarları gösterilmiştir. Bitümün yaşlanma sürecinde, bünyesindeki reçine ve asfalten yüzdeleri artarken, aromatiklerin oranı düşmekte ve doygunların oranı da yaşlanma süresince çok fazla tesir altında kaldıkları söylenemez (Alqudah, 2016).



Şekil 2.13 Bitümdeki bileşenlerin yaşlanma sonucunda değişimi (ZengandIsacson,1997).

Uygulamada, bitüm yaşlanmasının büyük bir bölümünü agrega ile bitümün karıştırılması esnasında da, daha az bir bölümü ise karışımın saklanması ve taşınması esnasında, farklı bir söylemle sıcak karışım yola serilmeden hemen önce oluşur. Bitümlü sıcak karışımların hazırlık aşamalarında, asfalt çimentosu agregaya eklenerek belli bir zaman yüksek ısıda karıştırılır. Bitümün karıştırma sırasındaki durumu, bitümün agregayı 5 ile 15 mikron arasındaki bir kalınlıkla ince bir film şerit halinde sarması söz konusudur. Bu karıştırma işlemi esnasında yüksek ısı ve bol hava ile karşı karşıya gelen ince asfalt katmanı, oksitlenmeye uğrayarak içerisinde bulundurduğu ve uçucu elemanları kaybetmesi durumu ortaya çıkabilir. Böylece bitüm sertleşerek kırılğan bir hal alır (Dinç, 1999).

Bitümün karıştırması, saklanması, transfer edilmesi ve uygulanması için geçen sürede oluşan yaşlanma kısa süreli yaşlanma olarak isimlendirilmektedir. Bitümlü sıcak karışımların karıştırma, saklama, transfer ve hizmet süresindeki uygulama sonucundaki yaşlanma durumu Şekil 2.14'te görülmektedir. Bu zaman zarfında oluşan yaşlanma, toplam yaşlanmanın yaklaşık %70 seviyesindedir. Bu süreç boyunca sertleşmiş asfaltın viskozitesi orijinal viskozitesine göre tahminen beş kat fazladır. Bitümlü karışımların 8 yıllık hizmet süresi boyunca oluşan uzun süreli diye adlandırdığımız yaşlanma, bütün yaşlanma sürecinin %30'unu oluşturur (Whiteoak and Read, 2003).



Şekil 2.14 Bitümün karıştırma, taşıma ve uygulama sürecindeki yaşlanması grafiği (Whiteoak and Read, 2003).

Bitümün yaşlanmasının bir diğer sebebi ise uygun olmayan hava koşullarıdır. Olumsuz atmosferik şartlar altında yol esnek üst yapısındaki kusurlu ve yetersiz sıkıştırma noksanlıklarından dolayı kaplama içerisinde hava boşlukları kalması muhtemeldir. Yol tabakaları bünyesinde bağlantıya sahip hava boşluğu havanın karışım içerisine daha fazla difüzyon etmesine yol açar. Uygulanan deneysel çalışmalar karışımın bünyesindeki boşluk oranı %5'in altında ise hizmet esnasında çok ufak miktarlarda sertleşme meydana geldiğini kanıtlamıştır. Ama boşluk oranının %9'dan daha yüksek olduğu koşullarda, bitümlü sıcak karışımın penetrasyon değerinin 70 seviyesinden 25 seviyesinin altına düştüğü görülmüştür (Whiteoak and Read, 2003).

2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)

Günümüzde karayolu kaplama yapımında en fazla kullanılan yol kaplama türü esnek kaplama türüdür. Esnek üst yapı, hem imalatları basit ve daha kısa sürede oluşturulmasının yanı sıra, yapım maliyetleri daha ekonomiktir. Bunların haricinde bütün seviyelerdeki trafik hacmine hizmet edecek şekilde çok farklı çeşitlerde üretilmesi sebebiyle daha fazla önerilip kullanılmaktadırlar. Esnek üst yapı katmanları kaplama katmanı, temel katmanı ve alt temel katmanı olmak üzere 3 çeşit katman olarak imal edilmektedir. Esnek kaplamaların imalatında kullanılan agrega gradasyonu ve optimum oranda bitümlü bağlayıcı kullanılmaya gayret gösterilmektedir. Asfalt plentinde yaklaşık olarak 170°C'ye kadar ısıtılan agreganın yaklaşık olarak 150°C sıcaklığa dek ısıtılan bitüm ile karıştırılmasının sonucunda bitümlü sıcak karışım üretilmesi söz konusudur. Üretilen karışımlarda; agrega oranı %93-95, bitüm oranı ise %5-7 oranında kullanılması söz konusudur (Geçkil, T., 2008). BSK (Bitümlü Sıcak Karışım) kullanılarak yapılan kaplamalarda, kaplama performansına direk tesir eden agrega ve bitümün fiziksel özelliklerinin çok iyi bilinmesi yapılan karışımın daha iyi performans göstermesini sağlayabilir. BSK'ların ağırlıkça %5-7'sini, hacimce %13-15'ini meydana getiren bitüm, agrega daneleri ile bir araya geldiğinde birbirine bağlanarak ve düzgün bir kaplama yüzeyi meydana getirerek yük altındaki kaplamanın moleküllerinin ayrılmasını önler. Bunun haricinde sürüş konforu sağlar ve bitümlü sıcak karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizlik konusunda büyük katkıları olduğu göz ardı edilmemektedir (İsfalt Bilimsel Yayınları, 2001).

2.4. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar

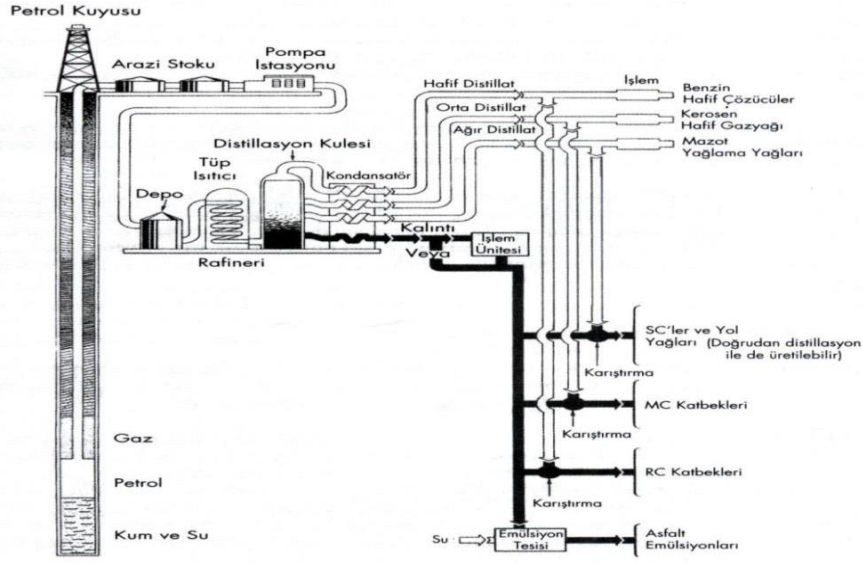
Esnek üst yapıların performansını ciddi bir ölçüde tesir eden bitümlü bağlayıcı numuneleri, bitümlü sıcak karışımların en önemli malzemesinin başında gelir. Bu karışımlar ağırlıkça %5-7 oranında, hacimsel olarak da %13-15 oranında meydana getirilerek agrega danelerinin kenetlenmesine yardımcı olan bitümlü bağlayıcılar, trafik yükleri altında kaplamanın dağılmasını ve parçalanmasını engeller. Bu tür katkıları iyi bir sürüş konforuna olanak tanınmasının yanı sıra meydana getirdiği kohezyon kuvveti ile kaplamanın stabilitesini artırır ve

geçirimsiz bir özellik kazanmasını sağlar (Anonim, 2002).

İki grupta incelenen bitümlü bağlayıcılar asfaltlar ve katranlar olarak ayrılmaktadır. Asfaltın kökeni doğal olup, petrolün damıtılması sonucu oluşan koyu kahverengi ile siyah rengi arasında rengi değişebilen bağlayıcı bir malzeme olarak literatüre geçmiştir. “Asfalt”, “asfalt çimentosu”, “bitüm” ve “asfalt bağlayıcı” terimleri esnek kaplamalarda aynı anlama gelmekte olup genellikle birbirlerinin yerine kullanıldığı durumlar yok değildir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013).

Asfaltlar, oluşturulma şekillerine göre doğal asfalt ve asfalt olarak üzere iki grupta incelenmektedir. Doğal asfaltlar; doğada genel olarak mineral maddeler ile bütünleşmiş bir durumda varlıklarını sürdürmektedirler. Yapay asfaltlar ise ham petrolün damıtılması ile meydana gelirler. Damıtmada uçucu olan bölümler damıtma kulesinin üst kısmından ayrılır ve daha sonra soğutucular yardımıyla yoğunlaştırılarak birbirinden ayrılmış olur. Bu şekilde oluşturulanlar hafif ürünler, daha az uçucu olarak meydana gelen ürünler ise orta ürünleri oluşturması söz konusudur. En yavaş uçan ürünler de ağır ürünleri meydana getirir. Kalıntı kısımlar ise kulenin dibinde biriktirilmiş bir şekilde kalmaktadır. Böylece ham petrol benzin, dizel yağları, gaz yağı, yağlama yağlar ve ağır kalıntı malzemeleri olarak temelde beş ana başlığa ayrılmış olurlar. Şekil 2.15’de ham petrolün damıtılma şeması gösterilmiştir. Meydana getirilen bu ürünler gerektiği takdirde tekrar tekrar damıtılarak farklı petrol ürünleri oluşturması söz konusudur (Geçkil, T., 2008, Shell Bitüm El Kitabı, 2004).

Katranlar; petrol ürünlerinin sık kullanımı başlamadan önce bir kömür ürünü olarak bilinen ve günümüzde çok sık kullanılan bitümlü malzemelerin başında gelmektedir. Katran, bitüm ile hafif ve ağır yağların yapay ya da doğal karışımından oluşan bir malzemedir. Genel itibarıyla saf taşkömürünün karbonizasyonu esnasında oluşan buharların yoğunlaştırılması sonucu bir yan ürün olarak elde edilmesi söz konusudur. Katranın damıtılması sonucu bilinen organik maddeler ayrıldıktan sonra arta kalan maddeden de bitüm elde edilir (Shell Bitüm El Kitabı, 2004).



Şekil 2.15 Ham petrolün damıtılması sonucu oluşan asfalt emülsiyonları (Yelken, F., 2009)

2.5. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK) ile meydana getirilen kaplamaların performansı, sıcak karışımın sahip olduğu özelliklerle doğrudan ilişkili olduğu için bahsi geçen bu özelliklerin iyi bilinmesi elzem bir durum oluşturmaktadır. Bu sebepten dolayıdır ki; bitümlü sıcak karışımlara dizayn yapılmalı ve hazırlanan karışım stabilite, işlenebilirlik, durabilite, geçirimsizlik, yorulmaya karşı direnç, esneklik, kaymaya karşı direnç gibi özellikleri göz önünde bulundurularak incelenmelidir (Geçkil, T., 2008).

2.5.1. Stabilite

Esnek üst yapının trafik yükü altında, sıcaklık etkisi ve diğer çevresel faktörlere karşı göstermiş olduğu dirence 'Stabilite' denir. Stabilitenin adı geçen özelliklerin tamamını karşılaması gerekmektedir. Bunların haricinde stabilitenin çok yüksek olması da iyi karşılanmayan bir mevzudur ve böyle bir durumda kaplamanın trafik yükleri altında çatlaması söz konusudur (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013; Anonim, 2002).

2.5.2. Durabilite

Esnek üst yapının trafiğin aşındırıcı, hava, sıcaklık ve suyun tesir edici etkisine karşı koyma yeteneğine ‘Durabilite’ denir. Bu tesirler arasına, asfaltta var olan oksidasyon ve buharlaşma gibi değişik durumlar ile suyun donma ve çözülme etkisinden dolayı esnek üstyapı ve agregası üzerinde oluşan değişimlerde buna dahil edilebilmektedir. Durabilite, genel itibarıyla bitüm içeriğinin yüksekliği, yoğun ya da iyi grade edilmiş agregası gradasyonu ve sıkıştırma işlemi başarılı bir şekilde yapılmış karışımlar neticesinde iyi bir performans gösterebilmesi söz konusudur (Geçkil, T., 2008; Kırbaş, H., 1999; Anonim, 2002).

2.5.3. Geçirimsizlik

Geçirimsizlik; bitümlü sıcak karışımın barındırdığı hava boşluğu yüzdesiyle tespit edilmektedir. Bitüm içeriğinin az oluşu ve bitümlü sıcak karışımındaki yüksek boşluk oranı asfaltın kaplamasının çok geçirimli bir durum oluşmasına yol açar. Bu yüzden bitümlü sıcak karışımlar belirli oranlardaki esnekliğe sebep olacak boşluk yüzdesine uygun tasarlanması gerekmektedir (Anonim, 2002).

2.5.4. İşlenebilirlik

Bitümlü sıcak karışımın plentte hazırlanıp yolda serilmesi ve sıkıştırılırken zorlanmaması olarak tanımlamak mümkündür. İşlenebilirlik çoğunlukla;

- ♦ Kaba agregası miktarı ve agreganın maksimum dane çapı arttıkça,
- ♦ Kullanılan agreganın kırma taşı olması ve agregası kırılmışlığı ile yüzey pürüzlülüğü arttıkça,
- ♦ Bitümlü sıcak karışımın ısısı düştükçe,
- ♦ Asfalt kaplama katılaştıkça veya viskozluğu arttıkça,
- ♦ Mineral fillerin miktarı ve ara boyutlu malzeme miktarı arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır (Tunç, A., 2001).

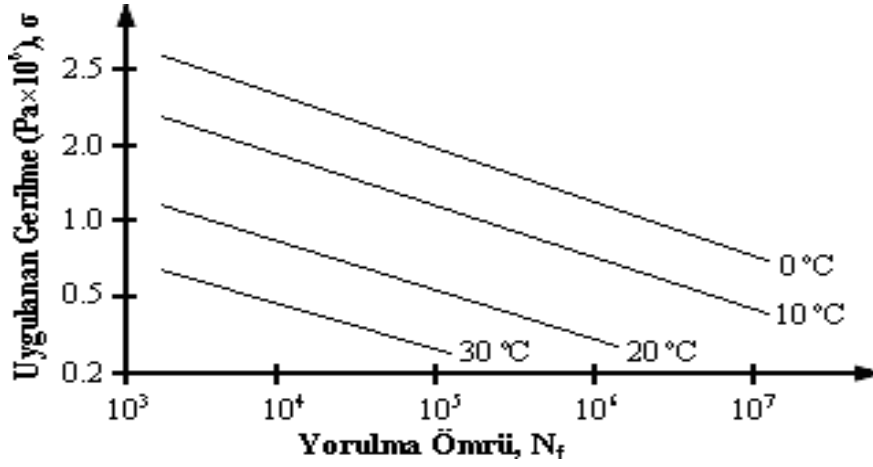
İşlenebilirliği düşük olan bitümlü sıcak karışımlar, serme ve sıkıştırma zorlukları meydana getireceğinden dolayı, çoğunlukla homojen olmayan ve stabilitesi yüksek olmayan kaplamalar meydana getirmektedir (Geçkil, T., 2008).

2.5.5. Esneklik

Asfalt kaplamanın geçici oturmalarına ve kaplamanın hareketlerine karşı, herhangi bir çatlamaya, ya da deformasyona neden olmasını engellemeye 'Esneklik' denir. Bitümlü sıcak karışımdaki bitüm yüzdesi ve agrega gradasyonu esnekliğe tesir eden temel faktörlerin başında gelir (Anonim, 2002).

2.5.6. Yorulmaya Karşı Direnç

Yorulmaya karşı direnç; trafik yüklerinden kaynaklı oluşan deformasyonlara karşı asfalt kaplamanın göstermiş olduğu tepki olarak açıklanmaktadır. Bitümlü sıcak karışımın boşluk yüzdesi ve viskozite değeri yorulmaya tesir eden önemli faktörlerdir. Asfalt kaplamanın yorulma ömrü, genellikle karışımdaki boşluk oranı azaldıkça, rijitliği ve tabaka kalınlığı arttıkça ve bitüm miktarı ve bitümlü sıcak karışımın sertliği azaldıkça yorulmaya karşı direnç artış göstermesi söz konusudur. Aynı temel özelliklere sahip bitümlü sıcak karışımların çeşitli sıcaklıklarda ve sabit bir gerilme kuvveti altındaki yorulma ömürleri Şekil 2.16'da gösterildiği gibidir. Anlaşılabacağı üzere aynı özellikteki asfalt kaplamaların yorulma ömrü uygulama gerilmelerinin büyüklüğü ile ters orantılı, ama daha düşük sıcaklıklarda ise doğru orantılı olduğunu söylemek daha basit olabilir (Geçkil, T.,2008).



Şekil 2.16 BSK'ların sıcaklık, gerilme ve yorulma ömrü bağlantısı (Geçkil, T., 2008)

2.5.7. Kaymaya Karşı Direnç

Asfalt kaplamanın ve kaplamanın üzerinde bulunan taşıtların, pozitif ya da negatif iklim koşullarında durulması gereken mesafede durabilmeleri için kaplamanın yeterli bir sürtünme gücünü barındırması gerekmektedir. Kayma direnci genel itibariyle; bitüm miktarı az, cilalanma direnci fazla, kırma taş ve pürüzlü yüzeyle agreganın yanı sıra yoğun gradasyonlu bitümlü sıcak karışım kullanıldıkça artması söz konusudur. Asfalt kaplamaların kayma direnci Şekil 2.17'de gösterildiği gibi makro ve mikro pürüzlülüğü göre değişkenlik göstermektedir. Agreganın yüzey yapısına bağlı olan özellik 'Mikro Pürüzlülük' diye adlandırılırken, bitümlü sıcak karışımında kullanılan agreganın nominal boyut kısmı ise 'Makro Pürüzlülük' diye adlandırılır (Geçkil, T., 2008; Kuloğlu, N., ve ark., 2008).



Şekil 2.17 Kaplama pürüzlülüğü (Geçkil, T., 2008).

2.6. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar

BSK'lar, esnek üst yapılar yapıldıktan belli bir süre sonra çevreden dolayı maruz kaldıkları birçok faktörden dolayı deforme olmaları söz konusudur. Bitümlü sıcak karışımlar açısından düşünüldüğünde oluşan bozulmaların temel sebepleri; yapım ve bakım hataları, uygunsuz malzeme seçimi, yol tasarım hataları, iklim koşulları yeteri kadar dikkate alınmadan yapılan malzeme ve proje tasarımı, yeterli denetimi yapılmayan aşırı yüklü araçların varlığıdır. Bütün bu durumların neticesi olarak asfalt kaplamada deformasyonlar, tekerlek izi oluşumu, oturmalar ve çökmeler, ondülasyonlar ve kabarmalar, çatlamalar (yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlakları), kuma, ayrışmalar, dağılmalar ve sökülmeler ve soyulma meydana gelmektedir (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013).

2.6.1. Deformasyonlar

Asfalt kaplama tabakaları inşa edildikten belli bir süre sonra kaplamanın bir bölümü veya kaplamanın tamamında görülebilen şekil değiştirmeler 'Deformasyon' diye adlandırılır. Araştırmacıların büyük bir çoğunluğu, ulaştırma mühendisliği ile ilgili çalışmalardaki ehemmiyetten ötürü, araştırmalarını esnek kaplamalar üzerinde oluşan kalıcı deformasyonlar (oluklanma yada tekerlek izi) üzerinde sıklıkla çalışmışlardır. Kalıcı deformasyonlar, asfalt kaplamanın servis ömrünü kısaltmaya sebebiyet vermesi söz konusudur (Anonim, 2002.; Kırbaş, H., 1999).

Deformasyonlar genel itibari ile stabilitesi yüksek olmayan bitümlü sıcak karışımların yapım aşamasından kaynaklansa da;

- ♦Kaplama tabakalarının uygunsuz bir parametrede sıkıştırılması
- ♦Aşınma tabakasında yoğun şekilde filler ve bitüm kullanımı
- ♦Katman kalınlıklarının standartlara uygun olmayışı
- ♦Drenajın yetersiz kalışı

gibi sebepler önemli faktörlerdir (Torun, S., 2015, Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004).

2.6.2. Tekerlek izi oluşumu

Tekerlek izi oluşumu, genel itibari ile sıcak havalarda ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda daha sık rastlanılan , kalıcı deformasyonun en yoğun şeklidir ve genellikle şu sebeplerden kaynaklanmaktadır (Kırbaş, H., 1999; Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004).

2.6.2.1. Ağır trafik yükü ve tekerrür sayısının çok oluşu ve ağır taşıtların hızı,

2.6.2.2. Yeterli olmayan temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemeti,

2.6.2.3. Aşırı bitüm ve filler yüzdesi veya filler/bitüm yüzdesi,

2.6.2.4. Yuvarlak dere malzemesi,

2.6.2.5. Sıkıştırmanın yeterli olmayışı.

Kalıcı deformasyona neden olan tekerlek izi oluşumu Şekil 2.18’de gösterildiği gibi çoğunlukla ağır trafiklerin seyir ettiği platformda oluşmaktadır (Kırbaş, H., 1999).



Şekil 2.18 Tekerlek izi oluşumu (Kırbaş, H.,1999).

2.6.3. Oturmalar ve çökmeler

Kaplama altındaki alt tabakalarda oluşan bozulmaların yüzeye yansması olup bitümlü tabakayla ilgisi yoktur. Bu kusurlar 0,5–2 m yarıçaplı daire şekli veya dairesel şekle yakın ölçüde meydana gelir ve bitümlü tabakalar esnek yapıları sayesinde genel itibariyle çatlamadan alt tabakaların yeni kotuna yetişebilir. Lakin kırılğan asfalt kaplamalarda da çatlamaların görülme olasılığı çok yüksektir (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013). Oturmaların oluşmasının sebepleri; alt tabakaların yetersiz oluşu, yeterli olmayan sıkıştırma, üstyapı tabanının taşıma gücünün yeterli olmayışı, dolgu şevinde görülen noksanlıklar, yer altı su seviyesinin fazla oluşu, drenajın yetersiz oluşu, bakım yöntemlerindeki uygunsuzluk gibi sebepler öne sürülebilir (Kırbaş, H., 1999).

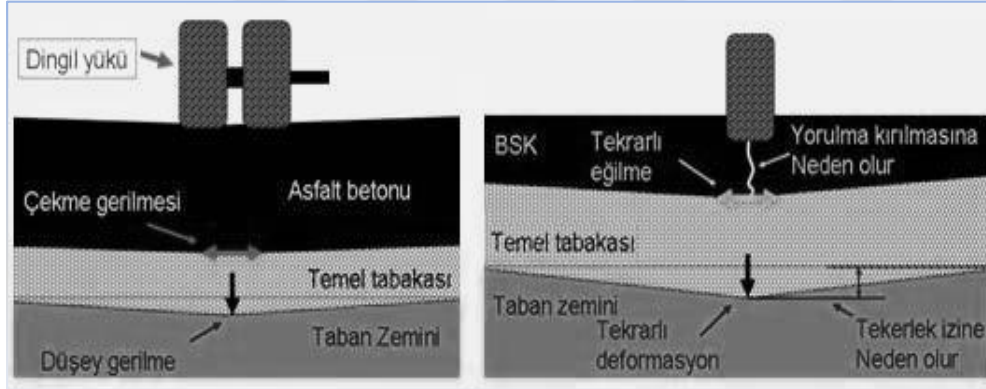
Normal kaplamanın yüzeyine göre daha düşük kotta kalmış küçük çukurlardan oluşan bozulmaya ‘Çökme’ denir. Derinlikleri 2,5 cm veya daha fazla olma ihtimali yüksek olup ve yağmur yağdıktan sonra bu çukurlar su ile dolmaktadır. Temel ve alt temel tabakalarında var olan yetersiz stabilite, sıkıştırma yetersizliği, drenajın kusurlu oluşu, kaplamanın maksimum taşıyabileceği yükten daha ağır trafik yüküne maruz kalışı, kötü işçilik ve inşaa aşamasındaki hatalar çökmenin meydana gelmesinin temel sebepleridir (Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004).

2.6.4. Ondülasyonlar ve kabarmalar

Ondülasyonlar, yol şeridinde trafiğin akışına göre enine doğrultuda oluşan ve daha çok bir dalgayı andıran, plastik bir yer değiştirme neticesinde meydana gelen bir çeşit deformasyondur. Böyle deformasyonlar otobüs durakları, kavşaklar ve tırmanma şeritleri gibi yerlerde ondülasyon şeklinde olması söz konusudur. Bunların dışında çoğunlukla tabaka kalınlığının yetersiz oluşu, stabilitesi düşük karışım, düşük viskoziteli bitümlü sıcak karışım, yüksek miktarda bitüm oranı, nem miktarının fazla oluşu, yapıştırma tabakasındaki noksanlıklar ve ağır taşıtların sık bir şekilde dur-kalk hareketleri ondülasyona sebep olan önemli faktörlerdir. Kaplamanın belirli bir kısımda yukarıya doğru çıkmasıyla kabarmalar oluşur. Bu hareketin meydana gelmesinin temel sebepleri genel olarak doğal zeminin ve üst tabakaların şişmesi gösterilebilir (Geçkil, T., 2008).

2.6.5. Çatlamalar

Kaplama yüzeyindeki trafik, iklim koşulları ve çevre koşullarının tesiri altında farklı şekillerde, farklı genişlikte ve derinlikte meydana gelen kusurlara ‘Çatlamalar’ denir. Çatlamalar genel itibariyle stabilite çatlakları, yorulma çatlakları ve yansıma çatlakları olmak üzere 3 şekilde incelenirler. Stabilite çatlakları trafik yüklerinin tesiri ile kaplamanın altında meydana gelen çekme gerilmelerinin, kaplamanın çekme mukavemetini geçmesi durumunda tabakanın alt kısmında oluşmaya başlayan ve zamanla kaplama yüzeyine yetişmesi neticesinde var olmaktadır. Yorulma çatlakları ağır trafikselsel yüklerin sürekli tekrarı ile kaplamanın yorulma mukavemetini geçmesi sonucu meydana gelmektedir. Yansıma çatlakları ise daha önce deforme olmuş kaplama tabakasının üzerine yeniden bir kaplama tabakası inşa edildiğinde, alttaki tabakada meydana gelmiş olan çatlakların üstteki tabakaya kadar ulaşarak deformeye sebebiyet vermesidir. Esnek kaplamalarda genellikle yorulma çatlakları meydana gelmektedir (Geçkil, T., 2008, Kırbaş, H., 1999).



Şekil 2.19 Esnek üstyapı ve oluşan bozulmalar (Geçkil, T., 2008, Kırbaş, H., 1999)

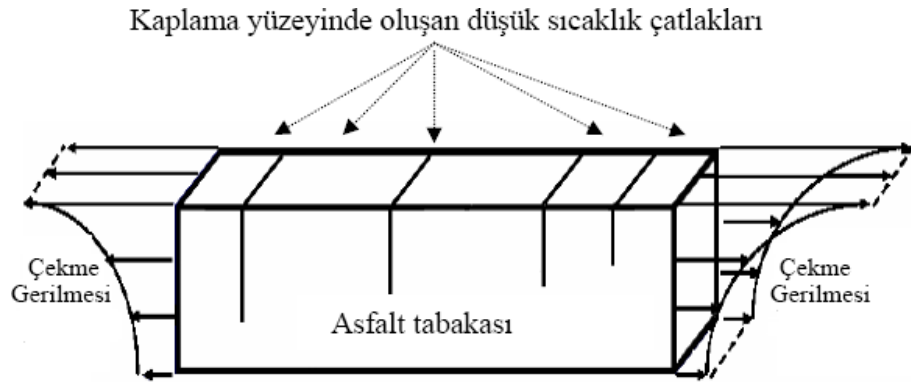
2.6.6. Yorulma Çatlakları

Esnek üst yapılara uygulanan tekrarlı bir şekilde ağır tekerlek yükleri sebebiyle, kaplama da çatlak oluşumuna neden olacak biçimde kaplamanın çekme gerilme dayanımının geçilmesi ile yorulma çatlakları oluşur. Yorulma çatlakları varlığının ilk göstergesi, trafik ile aynı yönde olacak şekilde süreksiz bir biçimde

boyuna tekerlek izi çatlaklarının var olmasıdır. Meydana gelen aralıklı boyuna çatlaklar zamanla bir yerde buluşarak ve akabinde bu çatlaklar enine çatlakların meydana gelmesine sebep olarak daha fazla çatlakların oluşumunu tetikler. Bu çatlaklar çoğunlukla; kaplama ya da kaplama altındaki tabakaların kalınlıklarının yetersiz oluşu, ağır dingil yükleri ve hesaplandığından daha fazla miktarda oluşan yük tekrarı, tabakaların hacimlerinde meydana gelen değişiklikler ve drenaj yetersizliği gibi sebeplerden meydana gelmektedir (Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004).

2.6.7. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Trafiğin tesirlerinden ziyade, soğuk iklime sahip havalarda asfalt kaplamanın büzülmesi ile asfalt kaplamada artan çekme gerilmelerinin meydana getirdiği ve trafiğin akışına dik olacak şekilde oluşan enine doğrultudaki çatlaklardır diyebiliriz. Soğuk hava koşullarında büzülme için uğraşan kaplama yüzeyinde büyük çekme gerilmeleri meydana gelir ve oluşan bu tekrar eden çekme gerilmeleri, asfalt kaplamanın çekme mukavemetini geçtiği zaman, Şekil 2.20’de görüldüğü gibi yüzeyde çatlak oluşumuna sebebiyet verir.



Şekil 2.20 Kaplama gerilme durumu ve düşük sıcaklık çatlakları

Oluşan bu çatlakların en önemli sebebi bitümlü sıcak karışımın kıvamı ve sıcaklığa olan hassasiyetidir. Düşük sıcaklıklarda ise rijit bir davranış sergileyen bitümlü sıcak karışım, çekme gerilmesine maruz kaldığında deforme olmadan kırılma davranışı sergiler. Bitümlü sıcak karışımda kullanılacak bitüm miktarı, asfaltın sertleşmesi, bitümlü sıcak karışımın katılığı, hava sıcaklığı ve çok soğuk gün sayısı, kaplamanın kalınlığı ve tabakalar arasındaki sürtünme kuvvetleri de

düşük sıcaklık çatlaklarının oluşumuna neden olabilmektedir (Geçkil, T., 2008, Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004).

2.6.8. Kusma

Kusma; yol kaplamasında kullanılan bitümün sıcaklıktan dolayı kaplama tabakasının yüzeyine doğru çıkarak yüzeyde bitümle kaplı kalın bir film tabakası meydana getirmesi durumudur. Meydana gelen bu kalın bitüm tabakasından dolayı kaplama yüzeyinde sürtünme katsayısı azalması söz konudur (İSFALT Bilimsel Yayınları, 2001).

Kusmanın meydana gelmesi daha çok bitüm yüzdesi yüksek bitümlü sıcak karışımlarda ve sıcak havalarda daha yüksek olasıdır. Ancak çok ağır dingil yükleri altında kalan kaplama tabakalarında da bitümün yüzeye çıkma ihtimali söz konusudur. Bitümün yüzdesi optimum olmakla beraber, bitümlü sıcak karışımda boşluk yüzdesi çok düşük olduğu takdirde, sıcak havalarda genleşen ve yeterli boşluğu barındırmayan bitümün yüzeye çıkma ihtimali çok daha büyük bir olasılıktır. Kusmanın bir başka nedeni de astar veya yapıştırma tabakalarının gereğinden daha kalın serilmesi durumu da söz konusudur. Bağlayıcı ve boşluk yüzdeleri özenle seçildiği takdirde yolların bakım-onarım görmüş kesimlerinde kuma olayının önlenmesi daha olası bir durumdur (Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004).

Kusmaya sebep olan başka bir faktörde agrega gradasyonundaki ince malzeme miktarının da direk etkili olduğu bunun haricinde sıcaklık, trafik yükü ve bitüm miktarının arttıkça kuma olayının arttığı yapılan incelemeler sonucunda fark edilmiştir (Balta, İ.,2004).

2.6.9. Ayrışmalar

Kaplamanın aşınma tabakasının trafik ve iklim tesiri ile küçük parçalar halinde birbirinden ayrılması neticesinde kopma ve parçalanma biçiminde görülmekle beraber, kaplamanın bu tabakasından agrega danelerinin birbirinden koparak ayrılmasına ‘Ayrışma’ denir. Ayrışma durumu genellikle yanlış imalat, kötü kalitede malzeme kullanımı, kirli ve ıslak agrega kullanımı, yanlış serim ve sıkıştırma ve yetersiz bitümlü bağlayıcı veya yetersiz adezyon gibi durumlardan kaynaklandığı bilinir (Geçkil, T., 2008).

2.6.10. Dağılmalar ve sökülmeler

Kaplama tabakalarında dağılma olayı, bitümlü sıcak karışımda mevcut bulunan agrega tanelerinin ufalanması neticesinde agrega tanelerinin küçük çukurlar oluşturarak sökülmesiyle oluşması söz konusudur. Sökülmelerin başlaması öncelikle ince agrega danelerinin asfalt kaplamasından kopmasıyla başlar ve daha sonraki basamakta iri agrega danelerinin ayrılması ile devam etmesi söz konusudur. Dağılma ve sökülmelerin oluşmasındaki en önemli etkenlerin başında bitümlü sıcak karışımda kullanılan agregaların kirli olması ve soğuk hava şartlarında imal edilmesi olarak gösterilebilir (Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004).

2.6.11. Soyulma

Bitümün, agregaların etrafını bir film tabakası halinde sarması gerekir. Fakat asfalt kaplamalarda zaman geçtikçe artan trafik yüklemeleri, su ve kil tesiri ile bu bitümlü film tabakası agregadan ayrılarak ortada kalmasıyla sonuçlanabilir. Ancak Türkiye’de soyulma olayı pek rastlanan bir durum olmadığından dolayı önemli bir kusur haline gelmediği bilinmektedir (Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004).

3.BİTÜM MODİFİKASYONU

Asfalt kaplamaların stabilite ve performans bakımından nitelikli olması, kısa ömürlü olmaması ve bakım-onarım giderlerinin az olması temel hedeflerden bazılarıdır. Asfalt kaplamaların adı geçen bu nitelikleri taşıması asfalt kaplamanın ömrüne tesir eden bazı niteliklerden kalıcı deformasyonlar, yorulma ve düşük sıcaklık çatlaklarının, su tesiri ile soyulma durumunun ve düşük dayanıklılığının çok düşük seviyelere çekilmesi elzem bir durum olduğu açıkça ifade edilmiştir. Bu nedenledir ki bitüm modifikasyon işlemi yaparak hem bitümün hem de gerekli durumlarda bitümlü sıcak karışımın performansını daha da arttırmak için bir dizi inceleme çalışmaları yapılmış olması durumu söz konusudur.

Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların performanslarını artırmak maksadıyla, modifiyer olarak kullanılacak olan katkı maddelerin belli miktarlarda ya bitümle ya da bitümlü sıcak karışım içerisine eklemesiyle yapılan işleme ‘Modifikasyon’ denir. Böyle bir metodla oluşturulan bitüme ‘Modifiye Bitüm’ ve bitümlü sıcak karışıma ise ‘Modifiye Edilmiş Karışım’ adı verilmektedir (Sağlık, A. ve Güngör, G.A., 2006).

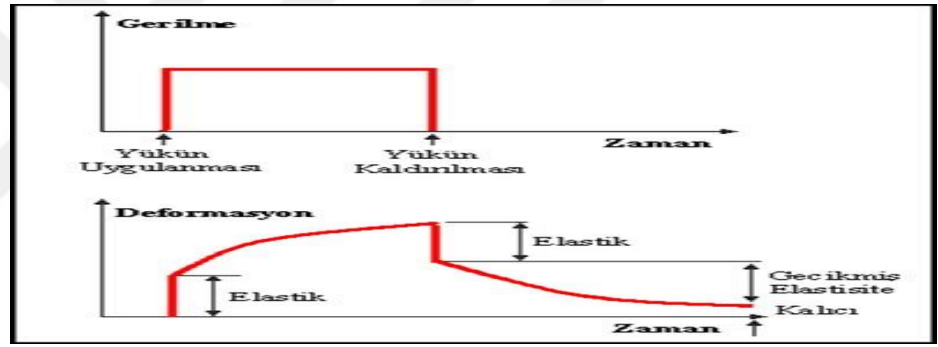
3.1. Modifikasyonun Amacı

Bitüm ve bitümlü sıcak karışımların modifiye edilmelerinin nedenleri genel itibariyle şu şekilde özetlenebilir (Geçkil, T., 2008):

- Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek bitümlü sıcak karışımlar oluşturarak çatlakları en az düzeye indirmek,
- Yüksek sıcaklık değerlerinde daha katı (rijit) karışımlar meydana getirerek tekerlek izlerini en az seviyeye düşürmek,
- Kayma direnci büyük yüzeyler meydana getirmek,
- Karışımların durabilitesini, dirençlerini ve işlenebilirliğini artırmak.

3.2. Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımlardaki Rolü

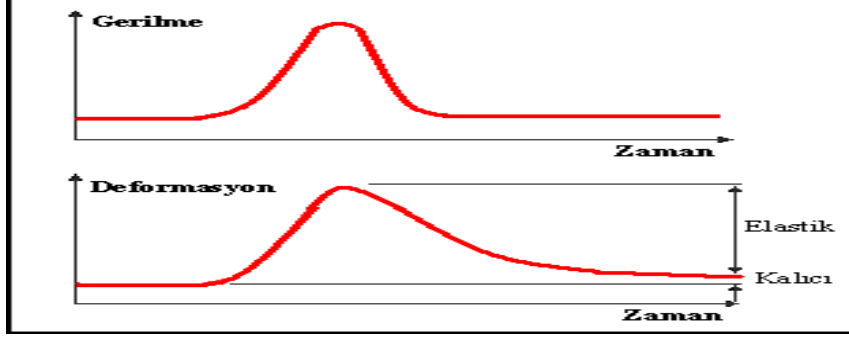
Bitüm, reolojik bir oluşum olarak visko-elastik özellik taşımasından dolayı, kalıcı deformasyon ve çatlamalara karşı gösterdiği direnç olmak üzere asfalt kaplama performansının çok sayıda özelliğinde kilit rol oynayarak bitümlü sıcak karışımların da visko-elastik bir özelliğe sahip olmalarına sebebiyet vermiştir. Çoğunlukla, bitüm barındıran bir malzemede meydana gelen deformasyon miktarı, sıcaklık ve yükleme süresine göre değişiklik göstermesi söz konusudur (Geçkil, T., 2008). Bitüm içeren bir malzemeye uygulanan yük neticesinde meydana gelen gerilme ve deformasyonların zamanla değişimi Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de olduğu gibi yapılan araştırmalar sonucu tespit edilmiştir (Geçkil, T., 2008).



Şekil 3.1 Statik yükler altında bitümün visko-elastik davranışı (Geçkil, T., 2008).

Şekil 3.1, bitüm barındıran bir malzemenin statik yüklere karşı meydana getirmiş olduğu tepkiyi göstermektedir. Yük uygulandıktan sonra oluşan şekil değiştirme, anlık bir elastik tepki biçiminde meydana gelmekte ve akabinde uygulanan yük ortadan kaldırılana kadar kademeli şekilde bir artış olduğu görülmüştür. Yükün uygulanma zamanına bağlı olarak deformasyonda oluşan değişim, malzemenin viskoz özellik taşımasının bir nedeni olarak bilinmektedir. Yük ortadan kaldırıldığında elastik deformasyon ani bir şekilde geri dönmekte ve zamanın geçmesi ile beraber bir miktar daha toparlanma durumu meydana gelmektedir. Bu oluşuma “gecikmiş elastisite” denilmekte ve netice olarak geri dönüşü mümkün olmayan bir miktar kalıcı deformasyon durumu oluşmuştur (Geçkil, T., 2008).

Bitüm barındıran bir malzemenin hareket halindeki bir aracın tekerleklerinde meydana gelen bir dinamik yüklemeye karşı oluşturduğu tepki Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Dinamik yükler altında bitümün visko-elastik davranışı (Geçkil, T., 2008).

Şekil 3.2’de deformasyon-zaman grafiğinde gösterildiği gibi, yük etki etmeden önce ve yük etki ettikten sonra meydana gelen istatistiki değerler incelendiğinde büyük bir oranda elastik şekil değiştirmenin yanı sıra küçük bir oranda ise kalıcı şekil değiştirme görülmektedir. Yalnız tek bir tekerlek yükü için işaret edilen şekil değiştirme, gerçekte çok küçük olabilir. Lakin bu durumuna benzer çok sayıda dingil yükünün uygulanması neticesinde kalıcı şekil değiştirmelerin toplam sayısı artmakta ve asfalt kaplamada kalıcı deformasyon meydana gelir. Yukarıda belirtilen her iki durum baz alınırsa deformasyon miktarındaki artış; yüksek sıcaklık, ağır trafik veya duran trafik tesiri ile meydana gelmektedir (Geçkil, T., 2008).

Bitümü modifiye eden malzemelerin temel görevlerinden bir tanesi de, bitümün veya bitümlü sıcak karışımların yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyona karşı direncini ve diğer sıcaklıklardaki bitüm yada bitümlü sıcak karışım özelliklerini olumlu bir şekilde artırması söz konusudur. Yapılan bu modifiye işlemi, bitümlü sıcak karışımın toplam visko-elastik etkisini düşürmek ve bunun yanı sıra kalıcı şekil değiştirmeyi azaltmak için bitümün sertleştirilmesi, geçici olmayan şekil değiştirmeyi azaltmak için bitümün elastik özelliklerini artırarak viskoz özelliğini düşürerek meydana getirmektedir. Bitümün sertliği arttığı zaman bitümlü sıcak karışımın da sertliğini artmış olacak ve akabinde malzemenin uygulanan yükü diğer bölgelere yayma kabiliyeti ile kaplamanın yapısal

mukavemetini ve olması istenen tasarım ömrünü iyileştirmesi söz konusudur (Geçkil, T., 2008).

3.3. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitümü meydana getiren modifiyerler çeşitli şekillerde gruplandırılmıştır. Katkı maddesinin çeşidini, numunelerini ve ilave edilen maddenin bitümün kıvamına tesirine işaret eden daha genel bir sınıflandırma Çizelge 3.1’de gösterildiği gibidir (Geçkil, T., 2008; Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T., 2007).

Çizelge 3.1 Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması (Geçkil, T., 2008)

Tip	Özellikler	Modifiyerlerin Bağlayıcı Kıvamına Genel Etkisi
1. Filler	-Taş Tozu Kireç -Mineral Filler -Uçucu Kül -Karbon Siyahı Sülfür -Portland Çimentosu	Sertleşme
2. Genleştirici (Ekstender)	-Odun Özü (Lignin) -Sülfür	Sertleşme
3.Kauçuk a-Doğal Lateks b-Yapay Lateks c-Blok Kopolimer d-İşlenmiş Kauçuk	-Doğal Kauçuk Strene-Butodien veya SBR -Strene-Butodien-Strene veya SBS Dönüştürülmüş Kauçuk	-
4. Plastik	-Polietilen Polipropilen -PVC, Polivinil Klorid -EVA, Etil-Vinil-Asetat	Sertleşme
5. Bileşim	3 ve 4’deki polimerlerin karışımı	-
6. Fiber	-Doğal: Asbest Taş Yünü -Yapay: Polipropilen -Polyester Fiberglas	Sertleşme
7. Oksidan	-Manganez Tuzu	Sertleşme
8. Antioksidan	-Kalsiyum Tuzu -Kurşun Karışımları Karbon	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	-Gençleştirme ve Yeniden Kullanma -Yağları Sertleştirme ve Doğal Asfaltlar	Yumuşatma veya Sertleştirme
10. Soyulma Önleyici	-Aminler -Kireç	Yumuşatma

Genel olarak kullanılan bazı katkı maddelerinin bitüm üzerindeki tesiri Çizelge 3.2’de, bunun haricinde bitümlü sıcak karışımlara ilave edilen kimyasal katkılarının pozitif tesirleri Çizelge 3.3’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.2 Sık kullanılan modifiyerlerin bitüm üzerindeki etkisi (Geçkil, T., 2008).

Modifiyer	Etkilenmiş Özellik
1-Fiberler	-Viskozite -Tiksotropik -Çatlak direnci
2-Filler Tozu	-Viskozite -Sertlik -Yumuşama noktası -Yoğunluk -Mekanik sağlamlık -Maliyet
3-SBS(Stren-Butodien-Stren)	-Yumuşama noktası -Elastik geri dönüş -Penetrasyon değeri -Düşük sıcaklık kırılmanlığı
4-Solvent	-Viskozite
5-PP(AtaktikPolipropilen), EVA (Etilen Vinil Asetat)	-Yumuşama noktası -Sertlik -Penetrasyon değeri -Frass kırılma noktası
6-Balmumu	-Adezyon -Viskozite (sıcak) -Sertlik (soğuk) -Bağlayıcılık
7-Yağ	-Bitümün yapısı

	-Bağlayıcı Yumuşama noktası -Viskozite Penetrasyon değeri
8-Emülsifikasyon	-Islatma kabiliyeti -Viskozite -Uygulama sıcaklığı
9-Islatma Ajanları	-Adezyon -Islatma yeteneği

Çizelge 3.3 Bitüm numunelerine kimyasal ilavelerin pozitif etkileri (Geçkil, T.,2008)

Kimyasal Katkıların Rolü	Kimyasal Katkılar					
	Hidrate Kil	Portland Çimentosu	Manganez Modifiyesi	Katyonik Yüzey Aktif Ajanları	Sülfür	Organik Polimer
1-Nem hasarı	x			x		
2-Yaşlanma	x			x		
3-Agrega bağlayıcı değişikliği			x			
4-Adezyon	x	x	x	x		
5-İşlenebilirlik	x	x	x	x	x	x
6-Stabilite	x	x		x	x	x
7-Tekerlek izi	x	x	x		x	x
8-Sertlik	x		x		x	
9-Soyulma	x		x			

x: Olumlu etki

Günlük hayatta sık bir şekilde kullanılan doğal ve elde edilmiş katkıların çeşitleri ve bu katkı maddelerinin bitümlü sıcak karışımlarda kullanılması ile meydana gelebilecek temel noksanlıkları azalttığı kanıtlanan, belirtilen veya önerilen sınıflandırması ve olası yararları Çizelge 3.4’te gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.4 Sık kullanılan asfalt modifiyerlerin olası olumlu etkileri (Geçkil, T.,2008)

Modifiyer Tipi	Sınıfı	Bozulmalara Etkisi				
		KD ¹	YÇ ²	DSC ³	NH ⁴	Y ⁵
Filler	Mineral: Sönmüş kireç	x				x
	Siyah Karbon	x				x
	Portland çimentosu	x				
	Uçucu kül	x				
	Kiremit tozu	x				
Genleştiriciler (Ekstendenler)	Odun lignini				x	
	Sülfür	x	x	x		
Polimerler-Elastomerler	Styrene butadiene triblock/radial block (SBS)	x	x	x		
	Styrene butadiene di-block SB	x		x	x	
	Styrene isoprene (SIS)	x				
	Styrene ethylbutylene (SEBS)					
	Styrene butadiene rubber latex SBR	x		x		
	Doğal Kauçuk	x				
	Polychloroprene latex	x	x			
Polimerler-Plastomerler	Ethylene vinyl acetate (EVA)	x	x			
	Ethylene propylene diene monomer (EDPM)	x				
	Ethylene acrylate (EA)	x				
	Polypropylene	x				
	Polyethylene (low density and high density)	x		x		
Ufalanmış kauçuk	Farklı boyutlar, iyileştirmeler ve işlemler	x	x	x		
Oksidanlar	Manganez bileşikler	x				
Hidrokarbonlar	Naftenik					
	Aromatikler			x		
	Vakum gaz yağı			x		
	Parafmiks/mum			x		
	Asfaltlar: yüksek işlem reçineler	x				
	Asfaltlar: DEMEX	x				
	Asfaltlar					
	SDA asfaltlar	x				
	Tall oil					
	Shale oil				x	x
Soyulma önleyiciler	Doğal asfaltlar: Trinidad	x	x	x	x	
	Organo-metallikler				x	
	Sönmüş kireç				x	
	Polyaminler				x	
	Aminler: Amidoaminler				x	
Fiberler	Polyester	x		x		
	Polipropilen	x	x	x		
	Fiberglass					
	Güçlendiriciler	x	x	x		
	Çelik	x	x	x		
	Mineral	x				
Antioksidanlar	Doğal: selüloz	x				
	Çinko			x		x
	Karbamatlar: Kurşun			x		x
	Siyah karbon	x				x
	Fenollar					x
	Sönmüş kireç				x	x
	Kalsiyum tuzlar					x
	Aminler				x	x
¹ : Kalıcı Deformasyon		⁴ : Nem Hasarı				
² : Yorulma Çatlağı		⁵ : Yaşlanma				
³ : Düşük Sıcaklık Çatlağı		x: Olumlu etki				

3.4 Atıklar ve Literatür Taraması

Günümüzde tarım ve endüstri sektörlerinin ilerlemesi ile birden fazla atık madde oluşmuş olması söz konusudur. Meydana gelen atık maddeler çevre kirliliğine sebep olmasından dolayı inşaat sektöründe katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi durumu gündeme gelmiştir. Tarım ve endüstriyel üretim sonucu oluşan bir takım organik atıkların karayolu mühendisliğinde hem bitüm hem de bitümlü sıcak karışım modifikasyonunda ilave bir malzeme olarak kullanılması son zamanlarda bilim dünyasını oldukça meşgul etmektedir. Bu amaçla, bu katkı maddelerden biri olan atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozunun bu tez çalışmasında bitümlü bağlayıcıların sahip olduğu fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki tesiri ve bitümlü sıcak karışımların asfalt kaplamalardaki performansı üzerindeki pozitif katkısı incelenmiştir.

Yakın tarihte bitümlü sıcak karışımların performansını artırmak gayesi ile polimer yapıda olan çeşitli katkı maddeleri, filler malzemeler, çeşitli yağlar, çeşitli sanayi atıkları, tarımsal atıklar ve endüstriyel atıklar artan bir ivme ile kullanılmaktadırlar. Yapılan incelemelerde tarımsal bir atık olan kuru yeşil ceviz kabuğu tozunun bitümü modifiye etmek amaçlı şu zamana kadar hiç kullanılmadığı tespit edilmiştir.

Mermer tozu, uçucu kül, fosfo alçı ve cam tozu gibi endüstriyel atıkların filler madde ürünleri olarak kullanılabilirliğinin araştırılacağı bir çalışmanın neticesinde cam tozu haricinde atık filler oranı arttıkça, boşluk oranı ve stabilitenin arttığı, akma değerinin azaldığının güçlü bir göstergesi olmuştur. Yapılan bu çalışmalar neticesinde endüstriyel atıkların kullanılması ile meydana getirilen asfalt kaplamalarının iyi bir mukavemet gücüne sahip olduğu kanısına varılmıştır (Üstünkol, F.N ve Turabi, A., 2009).

Uçucu külün filler malzemesi olarak uygulanabilirliğinin incelendiği bir çalışmada çeşitli içerikteki bitümlerden %0.5'lik artış oranı ile %3.5 ile başlayıp %6.5'a kadar, %2'lik hidratlı kireç kontrol karışımı dahil olacak biçimde ve bunun haricinde %2, %4, %6 ve %8 katkılı değerlerde uçucu kül filler malzemesi olacak biçimde bir seri Marshall numunesi meydana getirilmiş olup bu incelemenin neticesinde düşük bitüm içeriğine sahip filler oranının artmasına

istinaden stabilitenin de arttığını, bitüm içeriğinin artmasıyla filler oranında artış olmasına rağmen stabilitenin düştüğü yapılan çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir (Mistry, R. ve Roy, T.K., 2016).

Çimento ve uçucu külün modifiye edilmiş asfalt beton karışımları üzerindeki tesirinin araştırıldığı bir deneysel araştırmada çimento, uçucu kül ve % 5 oranında bir bitüm içeriği ile sayıca 11 grup olacak şekilde değerlendirilmeye alınmıştır. Oluşturulan bu grupların fiziksel özellikleri 25°C ve 55°C olarak tespit edilmiş olup nem hasarı kapasitelerini tespit etmek için 55°C’de nem hassasiyet deneyleri yapılmış olup bulunan veriler ışığında uçucu kül ve çimento maddelerinin bitümlü sıcak karışımlarının durabilitesini, sertliğini ve kayma direncini arttırdığı sonuçlarına varılmıştır (Likitlersuang, S. And Chompoorat, T., 2016).

BSK’da taş tozu maddesinin yerine filler malzemesi olarak uçucu kül kullanılan deneysel bir çalışmada uçucu kül karışımların fiziksel özellikleri üzerindeki tesirleri ele alınmıştır. Bu deneysel çalışmanın neticesinde bitümlü sıcak karışımların Marshall stabilite değeri, çekme mukavemeti değeri, kalıcı stabilite ve statik sünme çalışmaları gibi durabilite özellikleri üzerinde yapılan deneyler sonucu optimum oranının %7 olduğu takdirde uçucu külün üst düzey bir kapasite ile çalıştığı tespit edilmiştir (Sharma, V., Chandra, S., & Choudhary, R. 2010).

Doğal kauçuk maddesinin bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki tesirinin incelendiği bir araştırmada; doğal kauçuğun değişik oranlarda modifiye edilmiş bitüm üzerinde geleneksel ve reolojik özelliklerinin tespiti ile devam eden bir çalışma neticesinde doğal kauçuk ile modifiye edilmiş bitüm numunelerinin sıcaklık tesirine karşı hassasiyetinin azaldığı, sertlik özelliği, viskozite ve elastik özelliklerinin artmasının yanı sıra, düşük sıcaklıklarda yorulma çatlaklarına karşı dayanımını güçlendirdiği görülmüştür (Al-Mansob, R.A., Ismail, A., Alduri, A.N., Azhari, C.H., Karim, M.R., Yusoff, N.I.Md., 2014).

Tarımsal atıklardan oluşturulan biyomodifiyerlerin bitümlü bağlayıcı üzerindeki tesirinin incelendiği bir araştırmada, tarımsal atık olarak mısır koçanları, şeker kamışı küspeleri ve pirinç kabukları kullanılmış olup farklı oranlarda modifiye bağlayıcılar ile deneysel çalışma gerçekleştirilmeye

çalışılmıştır. Meydana getirilen bu bitümlü bağlayıcı numuneleri 0.1 Hz ve 100 Hz gibi iki değişik frekansta DSR deneyi test edilmiştir. Yapılan bu inceleme neticesinde tarımsal atıklarla modifiye edilmiş bağlayıcı numunelerinin tekerlek izine karşı durabilitesini arttırdığı ve bağlayıcı numunesinin yüksek sıcaklıklarda yüksek performans sergilediği kanıtlanmıştır (Caro, S., Vega, N., Husserl, J., Alvarez, A.E., 2016).

Bitümlü sıcak karışımlarda filler maddesi olarak pirinç kabuğu külünün değerlendirilmesinin test edildiği bir çalışmada değişik oranlarda pirinç kabuğu külü katılmış bitüm numunelerine Marshall Stabilite deneyi uygulandıktan sonra, pirinç kabuğu külünün stabiliteye olumlu katkısı olduğu ve akmaya karşı direncin arttığı tespit edilmesinin haricinde, pirinç kabuğu küllerinin kullanımının optimum bitüm yüzdesinde artma sağlamadığı yapılan deneyler sonucunda tespit edilmiştir (Sargin, Ş., Saltan, M., Serin, S., Morova, N., Terzi, S., 2013).

Nişasta malzemesinin modifiyer edilmiş bitümde taşmastic asfalt kaplama üzerindeki tesirinin incelendiği bir deneysel çalışmada değişik oranlarda hazırlanmış nişasta ilaveli bitümlü sıcak karışımın fiziksel ve reolojik özelliklerinin incelenmesinin yanı sıra modifiye edilmiş taşmastic bağlayıcı numuneleri üzerinde Marshall Stabilite deneyi uygulanmış olup, bu deney neticesinde nişasta modifiyeli bitümlü bağlayıcı numunelerinin sertleşmesi ile penetrasyon sınıfının değiştiğini görülmüştür. Bu deneysel çalışmalar neticesinde taşmastic asfalt bağlayıcı örnekleri üzerinde yapılan Marshall stabilite deneyi neticesinde nişasta katkılı numunelerin stabilite ifadesinin arttığı, akma derecesinde azalma olduğu kanıtlanmıştır (Al, A., Yi-qiu, T., Hameed, A.T., 2011).

Ağaç kabuğu küllerinin bitüm üzerindeki tesirinin incelendiği bir deneysel çalışmada, piroliz edilmiş yumuşak ağaç kabuğu kömürünün değişik yüzdelerde bitüme katkısı ile modifiye edilmiş bitüm numunelerinin fiziksel ve reolojik özellikleri incelenmiştir. Uygulanan deneyler sonucunda, yumuşak ağaç kabuğu kömürünün ilavesi ile gerçekleşen çalışmalarda bitümün sertleştiği ve sertleşme olayı neticesinde bitüm performansının olumlu etkilendiği kanıtlanmıştır (Chebil, S., Chaala, A., Roy, C., 2000).

Mısır yağı ile oluşturulan modifiye bitümün reolojik özellikleri üzerindeki tesirinin incelendiği bir araştırmada, farklı oranlarda ilave edilen mısır yağı ile modifiye edilmiş bitüm numuneleri üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, RTFO ve DSR gibi deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel veriler ışığında bitümlü karışımda yaşlanma ve tekerlek izine karşı mukavemetin olumlu sonuçlandığı kanısına varıldığı tespit edilmiştir (Portugal, A.C., Lucena, L.C., Costa, D.B., Lucena, A.E., Lima, K.A.,2017).

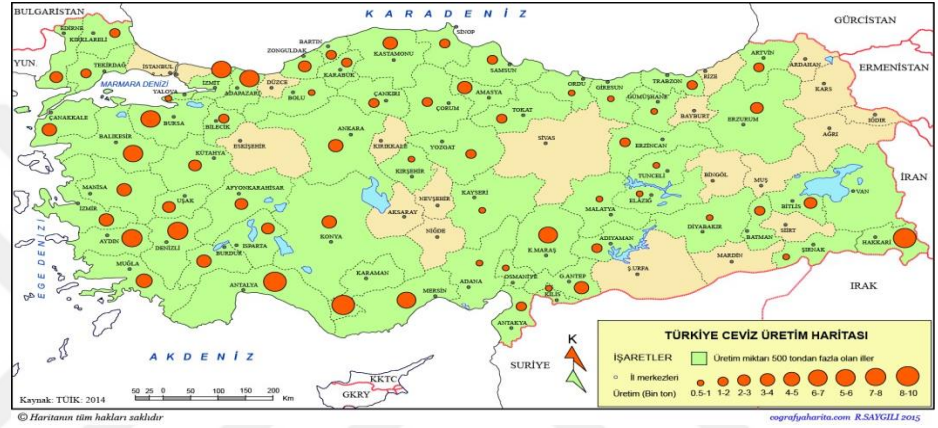
3.5. Juglansregial (Ceviz) Türünün Genel Özellikleri

Yapılan araştırmalara göre cevizin (Juglansregial) kökeni, Hazar Denizi kıyısında var olan Ghillan bölgesi olduğu yönünde güçlü iddialar mevcuttur. Anadolu ve Güney Kafkasya bu ceviz türünün ana vatanı diyebileceğimiz bölgeler arasında sayılması söz konusudur. Ceviz asırlar boyunca çok stratejik bir tüketim maddesi olarak tüketilmektedir. Pliny (M.S. 23–79) 'Tabiat Tarihi' isimli kitabında 9 tane ceviz türünden söz etmekte ve cevizin (M.Ö.750-500 yılları arasında İran'dan Yunanistan'a götürüldüğü mevzusu iddia edilmektedir. Sonraki dönemlerde Yunanistan'dan Roma'ya ulaşan ceviz, o bölgede Jovis Glans yada Jupiterin Kral Meyvesi olarak geçmiştir ki, bugün günümüzde cevizin bilimsel ismi olarak atfedilen Juglans ifadesi, Jovis Glans'dan oluşturulmuştur (Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004).



Şekil 3.3. Yeşil kabuklu ceviz meyvesi (Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004).

Anadolu'da yaşayan toplumların yaklaşık olarak 3000 yıl boyunca bu bitkiyi bildikleri ve bu bitkiden yararlandıkları tahmin edilmektedir. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi Türkiye'de Ege, Karadeniz, kuzey ve orta bölgelerimiz ceviz üretimi bakımından ilk sıralarda yer aldığı görülmektedir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi Türkiye dünya ceviz yapımında Birleşik Devletler, Çin ve İran'dan sonra dördüncü sırada yer almaktadır (Filya, İ., Hanoğlu, H., Canbolat, Ö., Sucu E. 2006; Üstünkol, F.N ve Turabi, A., 2009). Yıllara göre Türkiye'de ve Dünya'da ceviz üretim miktarı (ton), Çizelge 3.5'te görüldüğü gibidir (Mistry, R. ve Roy, T.K., 2016).



Şekil 3.4 Türkiye’de ceviz yetiştirilen iller (Mistry, R. ve Roy, T.K., 2016).

Juglansregial.(Ceviz)’in Sınıflandırılması

Alem : Plantae (Bitkiler Alemi)

Bölüm : Magnoliophyta (Kapalı Tohumlular)

Sınıf : Magnoliopsida (İki Çenekliler)

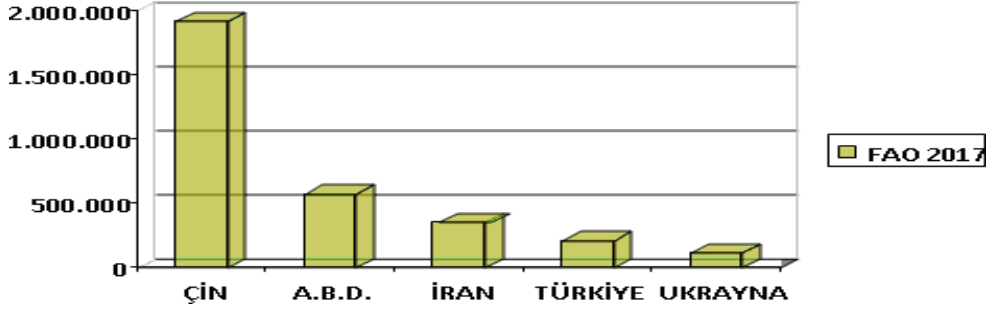
Altsınıf : Hamamalidae

Takım : Juglandales

Aile : Juglandaceae (Cevizgiller)

Cins : Juglans

Tür : Juglansregial (Ceviz)



Şekil 3.5 Dünyada başlıca ceviz üreticisi ülkeler (Likitlersuang, S. And Chompoorat, T., 2016).

Çizelge 3.5 Yıllara göre Türkiye'de ve Dünya'da ceviz üretim miktarı (ton) (Likitlersuang, S. And Chompoorat, T., 2016)

Üretim (Ton)		
Yıllar	Dünya	Türkiye
2006	1.854.600	129.615
2007	1.983.730	172.573
2008	2.242.180	170.890
2009	2.475.300	177.299
2010	2.767.610	178.143
2011	3.198.940	183.241
2012	3.660.149	203.211
2013	3.007.937	212.141
2014	3.385.870	180.808
2015	3.589.650	190.148
2016	3.747.550	195.287

Ceviz, 20-30 metre uzunluğuna kadar erişebilen boylara sahip, monoik bir ağaç türüdür. Alternat bir yaprak dizilişine sahip olup, yaprakları bileşik yapıdadır. Drupa tipinde bir meyveye sahiptir. Cevizin bu türünde var olan yeşil bölümü yenmemektedir. Sadece yenilebilen bölümü tohum taşıyan bölümdür. Tohumları yağ bakımından zengindir. Ceviz meyvesinin yapraklarında ve mezo karpında tanen, uçucu yağ ve juglon diye isimlendirilen biralkoloid maddesi mevcuttur. Bunun haricinde daha yetişkinlik düzeyine gelmemiş ceviz meyvelerinde limonun hemen hemen 30 katı kadar C vitamini bulunmaktadır. Tohumu %15 yağ, %3 protein içeriği, %35 linoleik asit içeriği, fosfor ve B, D vitaminlerini barındırmaktadır. Cevizin meyvelerinden, yağından ve kerestesinden faydalanılır (Sharma, V., Chandra, S., & Choudhary, R. 2010; Al-Mansob, R.A., Ismail, A., Alduri, A.N., Azhari, C.H., Karim, M.R., Yusoff, N.I.Md., 2014).

Oldukça değerli bir yemiş olan ceviz; Asya'da, Avrupa'da ve dünyanın çoğu bölgesinde mide ve öksürük ağrısını iyileştirme de kullanılır (Caro, S., Vega, N., Husserl, J., Alvarez, A.E., 2016). Bu bölgelerin dışında Hindistan'da geleneksel tedavi teknikleri ile kanamayı durdurma etkisi, diüretik, antifungal, laksatif, tonik, kan temizleme özelliği ve detoksifiye olarak kullanılmasının haricinde, antikanser özelliğini de barındırmaktadır. Deney fareleri üzerinde yapılan bir araştırmada, anti kanser ilaçların (cyclophosphamide CP), metabolizmayı deforme eden ve antioksidan enzimleri yavaşlatan toksik özelliklerine karşı pozitif tesirde bulunduğu incelemeler sonucu keşfedilmiştir (Sargın, Ş., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., Terzi, S., 2013. Al, A., Yi-qiu, T., Hameed, A.T., 2011).

Cevizin yalnız kuru meyvesinin yanı sıra yeşil kabukları ve sert kabukları da kozmetik, boya ve ilaç sanayisinde beklenilenin üzerinde bir kullanımı mevcuttur. Cevizin sahip olduğu yeşil kabuklu bölümü fenolik bileşim açısından oldukça zengin olduğu bilinmektedir. Kafeik asit, klorojenik asit, sinapik asit, ferulik asit, gallik asit, elajik asit, protokatehuik asit, vanilikasit, sirinjikasit, kateşin, epikateşin, juglon ve mirisetin. Mevcut olan bu bileşenlerin yanısıra yeşil ceviz kabukları hem sağlığı korur hem de antimikrobiyal bir yapıyı barındırması söz konusudur (Chebil, S., Chaala, A., Roy, C., 2000). Organik bir madde olan ceviz kabuğunun başka bir özelliği ise doğada çok çabuk kuruması ve kolaylıkla

çürümesidir. Bütün bu adı geçen durumlardan ziyade kuru yeşil ceviz kabuğunun kullanım alanı oldukça azdır. Haliyle atık bir madde olarak görülen ceviz kabuğu işlenip toz haline getirilmesi ve nakliye masrafları dışında başka bir ekonomik külfet getirmemektedir.

Cevizin ekolojik istekleri konusuna değinirsek; ceviz ağacı, sonbahar ve kış aylarında soğuk iklim ihtiyacını karşılayacak kadar soğuk bir dönem geçirmesinin yanı sıra, normal yetiştirme ve olgunlaşma zamanında ilkbahar ve yaz dönemlerinde 25-30 °C kadar sıcak iklim ister. Ceviz yetiştirmek için yağış miktarı açısından düşünüldüğünde düzenli bir yağış istemenin yanı sıra yıllık ortalama 500-550 mm yağış şartlarını yerine getirmesi gereklidir. Bu durumların haricinde çiçek açma dönemindeki şiddetli rüzgar ve aşırı yağışlar polenlerin tozlaşma ve dölleme olayları açısından sağlıklı olmayan durumlar meydana getirmektedir (Portugal, A.C., Lucena, L.C., Lucena, A.E., Costa, D.B., Lima, K.A.,2017).

Ceviz ağacının kök sistemi güçlü bir yapı istemesinin yanı sıra hemen hemen 2-4 metre derinlik olması söz konusudur. Ceviz ağacının yetiştirileceği toprağın pH'sı 6 ile 7 arasında olmasının yanı sıra toprak içerisinde tuz ve alkalilik sorunu bulunmaması elzem bir durumdur. Toprağın iyi drene edilmesi, geçirgen bir yapıda olması, organik madde bakımından fakir olmaması ve hava ile temasın yüksek olması gerekmektedir. Cevizin yetiştirildiği ortamdaki toprağın suyu iyi tutması açısından yüksek olması önemli başka bir husustur. Toprak açısından en kritik özelliklerden birisi de hususi olarak toprak seçen bir meyve türü olmaması da yetiştirilme açısından geniş kapsamlı bir coğrafyaya sahip olduğunun göstergesidir (Portugal, A.C., Lucena, L.C., Lucena, A.E., Costa, D.B., Lima, K.A.,2017).

4. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN YÖNTEMLER

4.1. Geleneksel Test Yöntemleri

Esnek kaplamalarda kullanılan bitümlü bağlayıcıların farklı özelliklerinin tespit edilmesi maksadıyla bitüm üzerine yapılan temel deney tekniklerine ‘Geleneksel test yöntemleri’ denir. Penetrasyon deneyi bitümlü bağlayıcıların kıvam derecesini tespit etmek maksadı ile, yumuşama noktası deneyi ise bitümün yüksek sıcaklıktaki hareketlerini tespit etmek için uygulanan deneylerdir. Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri kadar çok sık uygulanmazsa da; depolama stabilitesi deneyi bitümün depolamasını, nakliyesini ve serme esnasındaki bitüm ile katkı maddesi arasında faz bölünmesinin olup olmadığını belirlemek maksadı ile uygulanmaktadır. Adı geçen bu deneylerin yanı sıra parlama noktası deneyi, bitümün sıcaklığının artırılması ve uygulanması esnasında, bitümlü bağlayıcının tutuşma ve yanma tehlikesini önlemek ve gerekli tedbirlerin alınması gereken sıcaklık değerini tespit etmek için kullanılır.

4.1.1. Penetrasyon deneyi

Bitüm özelliklerini belirlemede bir çeşit geleneksel test tekniğidir. Bitümün penetrasyon değerini belirlemek için kullanılan cihaz ise 'penetrometre cihazı' ismini almaktadır. Penetrasyon deneyi sayesinde bitümün sertlik düzeyi ile ilgili araştırmalar yapmak için kullanılır. Penetrasyon değeri kıvam değeri ile ters orantılı olup, bitüm yumuşadıkça penetrasyon değeri artmaktadır, bitümün sertliği arttıkça penetrasyon değeri azalır. Türkiye’de penetrasyon deneyi; TS EN 1426, ‘Bitüm ya da bitümlü bağlayıcılara iğne batma miktarı tayini’ şartnamesine göre uygulanmaktadır. Penetrasyon deneyi ile tespit edilecek olan bitümlü bağlayıcı, penetrasyon kabına homojen şekilde dökülebilecek akışkanlığa ulaşana kadar ve çok fazla yaşlanmaya sebep olmayacak şekilde, yani 100-110°C' ye ulaşınca dek etüv içerisinde ısıtılarak deneye başlanır. Yeteri kadar akıcı kıvama ulaşan bitüm, standart deney kabına hava kabarcıkları olmayacak hassas bir şekilde aktarılır. Bitüm penetrasyon kabına aktarıldıktan sonra oda sıcaklığında 1,5 ile 2 saat boyunca bekletilir (TS EN 1426, 2008).

Deney ortamının sıcaklık durumuna bağılı olarak penetrasyon deneyi, iki farklı biçimde gerçekleştirilebilir. Şayet her iki deneyin gerçekleştirileceği ortam sıcaklığı, oda sıcaklığına eşit ise, penetrasyon deneyi standart deney kabının içerisinde penetrasyon cihazının içerisine konularak gerçekleştirilebilir. Ama, deney ortamının sıcaklığı ile oda sıcaklığı eşit değil ise daha güvenli değerler oluşturmak için, bitüm numunesi 25°C sıcaklığa sahip saf su banyosunda yaklaşık olarak 1-1,5 saat arası dinlendirilmeye bırakılır. Bütün bu işlemlerden sonra boş bir beherin içerisine su banyosundaki su alındıktan sonra, içerisinde bitüm muhafaza eden deney kabı su banyosunun içinden alınarak su dolu beherin içerisine konulur.

Deneye başlamadan önce penetrometre cihazının göstergesi sıfıra getirilir ve düzgün bir şekilde uygulanıp uygulanamayacağı test edilir. Bu kontrol işleminin akabinde üzerinde 100 gr ağırlık bulunan penetrasyon iğnesi hassas hareketli başlık üzerine monte edilir. Penetrasyon iğnesi cihaza yerleştirilmeden önce kirli olmaması konusunda hassasiyetli bir şekilde davranmak gerekir. Bu işlemlerden sonra iğne, hassas ve hareketli başlık sayesinde ağır bir şekilde aşağıya doğru hareket ettirilerek bitüm numunesine değdirilmeyecek biçimde hemen üzerinde sabit bir şekilde durdurulur. Hassas iğne, alette bulunan sayaç yardımıyla 5 saniye zaman zarfında bırakılır. 5. saniyenin bitiminden hemen sonra alet sabitlenmiş bir biçimde gösterge üzerindeki batma miktarı not edilir. Bu işlemler, aynı numune kabı üzerinde üç farklı noktada okunur. Bundan dolayı penetrasyon iğnesi hassas hareketli başlık üzerinden alınıp üzerine yapışmış bitüm tortusu çakmak veya başka bir çeşit ısıtıcı kullanılarak eritildikten sonra temiz bezle silinerek temizlenir. Bu temizleme işlemi bittikten sonra ısıtma işlemi esnasında ısınan iğnenin tekrar soğuması için birkaç saniye beklenmesi gerekmektedir. İğnenin ucunun soğuması için gerekli zaman verilmediği durumlarda sıcak iğne ile sonucu güvenilir olmayan değerlerle ölçüm işlemi yapılabilmektedir. İğnenin ucu tam anlamıyla temizlendikten sonra penetrasyon deneyi bir daha yapılır ve bu şekilde penetrasyon kabının kenarlarından ve birbirlerinden en az birer santimetre uzak olacak biçimde üç farklı yerden okuma yapılır. İğnenin bitümlü bağlayıcı içerisine batma miktarı dmm cinsinden hesaplanıp bu üç okumanın aritmetik ortalaması alınarak penetrasyon değeri hesaplanmış olur. Yarı otomatik kontrollü penetrasyon aleti Şekil 4.1'de

gösterildiği gibidir (TS EN1426,2008).



Şekil 4.1 Penetrasyon deney aleti

4.1.2. Yumuşama noktası deneyi

Bitüm ya da bitümlü bağlayıcıların sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetlerini belirlemede kullanılan ve hangi sıcaklıkta akmaya başladıklarının belirlenmesinde kullanılan bir diğer geleneksel deney ‘Yumuşama noktası deneyidir (Önal ve Kahramangil, 1993).

Yumuşama noktası deneyi için gerekli olan gereçler; ısıtıcı, iki tane standart halka, iki tane standart bilye, halkaların içerisine konulduğu çelik bir düzenek ve termometreden meydana gelmektedir. Deneye başlamadan önce kullanılacak olan bitüm çok fazla yaşlanmaya sebep vermeyecek şekilde homojen bir karışım oluşabilecek kıvama gelinceye dek 100-110°C’de etüvde ısıtılır. Bitümlü bağlayıcının ısıtılma işlemi sürerken standart halkalar daha önce gliserin-pudra içeren karışım ile yağlandıktan sonra seramik bir plaka üzerine konulur. Akışkan duruma ulaşan bitümlü bağlayıcı iyi bir şekilde karıştırıldıktan sonra, iki tane standart yumuşama noktası halkasının içerisine hiç boşluk bırakmayacak biçimde dikkatli bir biçimde dökülür. Bitümlü bağlayıcı malzemesi konulan yumuşama noktası halkaları, buzdolabına konularak yumuşama noktası deneyi

sıcaklığı olan 5°C ye varana dek soğutulmaya bırakılır. Soğutulmuş şekilde buzdolabından alınan halkaların bitüm taşıdığı takdirde taşan kısmı sıcak ıspatula ile uygun bir şekilde kesip alınır. Bitümlü bağlayıcı numuneleri hazırlanırken TS EN 1427'ye uygun kriterler göz önünde bulundurulur. Şekil 4.2'de Yumuşama noktası deney aracı bulunmaktadır (TS EN 1427, 2008)



Şekil 4.2 Yumuşama noktası deney cihazı

Bitümün yumuşama noktası tespit edilirken bitümlü sıcak bağlayıcının sıcak atmosfer şartlarında ne derece deforme olacağının bilinmesi için oldukça önemli bir veridir. Oda sıcaklığında penetrasyon değerleri eşit olan iki bitümlü bağlayıcıdan yumuşama noktası yüksek olan bağlayıcı, ortamdaki sıcaklık değişimlerine karşı durabilitesi daha yüksektir. Bundan dolayı asfalt kaplamalarında kullanılan bitümlü bağlayıcıların penetrasyon değerleri eşit sıcaklıkta penetrasyon değerleri eşit olmasına rağmen yumuşama noktası deneyinde bulunan verilerden küçük olan bitümlü bağlayıcı viskoz bir davranış sergilemekte ve tekerlek izi oluşumu (kalıcı deformasyon) diğer bağlayıcı türüne göre önceden başlaması söz konusudur. Yumuşama noktası deneyi sonucundaki verilerden 5-6 °C lik bir azalma durumu %20 daha fazla kalıcı deformasyona sebebiyet verdiği yapılan araştırmalar sonucu tespit edilmiştir (Çubuk, 2007).

4.1.3. Penetrasyon indeksi (PI)

Bitümün ısı değışiklikleri karşısındaki duyarlılıklarını tespit etmek gayesi ile penetrasyon ve yumuşama noktası verilerinin kullanılmasıyla Penetrasyon İndeksi (PI) ifadesi bulunur. Bu ifadeyi bulmak için Pfeiffer ve Van Doormal'ın oluşturduğu formül 4.1 geliştirilmiştir.

Formülde bulunan 'YN' ifadesi bitümün yumuşama noktasını gösterirken "Pen25" ifadesi, bitümlü bağlayıcının 25°C' deki penetrasyon verisini göstermektedir. Bir diğer ifade ile PI verisi bitümlü bağlayıcının ısı değışimlerine karşı hassasiyeti ifade etmektedir. Bitümün ısıya karşı hassasiyeti ile PI verileri arasında ters bir orantı ilişkisi mevcuttur. Penetrasyon İndeksi verisinin -2'den küçük olması durumunda tespit edilen bitüm numunesinin ısıya karşı hassasiyetinin arttığını, +2'den büyük olması durumunda ise bitüm numunesinin ısı değışimlerine karşı hassasiyetin azaldığının göstergesidir (Read and Whiteoak, 2003).

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(Pen_{25}) - 20 \times YN}{50 \times \log(Pen_{25}) - YN - 120}$$

(4.1)

4.2. Bitüm Performans Sınıflamasının Geleneksel Sınıflandırmaya göre Üstünlükleri

Geleneksel sınıflamaları belirlemek için kullanılan penetrasyon, viskozite ve düktilite gibi deneysel yöntemler bitüm üzerinde yıllarca yapılan uygulamalar sonucunda oluşturulan deneyimlere dayanarak geliştirilen deneysel yöntemlerdir. Fakat böyle ampirik deneyler, asfaltın hizmet süresi boyunca bitümün karşı karşıya kaldığı trafik yükü ve iklim şartlarını dikkate almadan oluşturulmuş deneysel uygulamalardır. Bundan bu test yöntemleri trafik ve iklim şartlarının

sabit kaldığı şartlarda ancak güvenilir sonuçlara ulaşılabilmektedir.

Ülkemizde günümüz şartlarının getirmiş olduğu trafik şartları, ister trafik hacmi olsun ister trafik yükü olsun viskozite ve penetrasyon sınıflandırmasının uygulanmaya başlandığı yıllardan beri çok daha karmaşık bir oluşuma ulaşmıştır.

Aynı şekilde iklim değişikliğinin sebep olduğu sıcaklık ve yağış rejimlerindeki farklılıklardan ötürü geleneksel sınıflandırmaya göre ayrılmış bitümlü bağlayıcılar asfalt kaplamalarda tahmin edilenden çok daha çabuk sürede bozulmalar olmakta ve ekonomik kayıpların oluşumunu tetiklemektedir. Bütün bu sebeplerden ötürü bitümün performans kategorileşmesinde sadece trafik değil aynı zamanda iklim şartları göz önünde bulundurularak sınıflandırma yapılmaktadır.

Geleneksel test yöntemleri ile yapılan iki temel deney sisteminde bulunan deneyler olan penetrasyon ve viskozite deneylerinden penetrasyon 25°C'de, viskozite ise 60°C'de yapılır. Bundan anlaşılabileceği üzere geleneksel test yöntemlerinde yalnızca birer sıcaklık değerleri için bitümlü bağlayıcıların özellikleri belirlenmekte başka sıcaklıklarda tespit etmek için bilgi vermemektedir. Bu da geleneksel test yöntemlerinin farklı sıcaklıklarda bitümün özelliklerini test etmek için yeterli bir uygulama bilgisine sahip olmadığının göstergesidir.

Bitümün viskoelastik özelliğe sahip bir malzeme olduğu bilinmektedir. Bitümün bu özelliğinden dolayı farklı sıcaklık ve farklı trafik yükleri altında farklı davranış sergilemesi söz konusudur. Uygulanan yükün uygulama zamanının uzunluğu bitümlü bağlayıcının daha yüksek sıcaklıkta sergilemiş olduğu hareketine karşılamamaktadır. Uygulanan yükün süresi geleneksel test metodlarında göz önünde bulundurulmamaktadır. Lakin, bitümün performans sınıflamasında ise uygulanan yükün etki zamanı da göz önünde bulundurulmaktadır.

Asfalt kaplamalarda kullanılan bitümlü bağlayıcı, oluşturuldukları petrol rezervleri açısından değişkenlik göstermektedir. Bundan ötürü bitümlü bağlayıcılar büyük oranda birbirlerinden farklı davranış ve özellikler sergilemektedir. Bu sebepten dolayıdır ki geleneksel test yöntemlerinin bitümlü

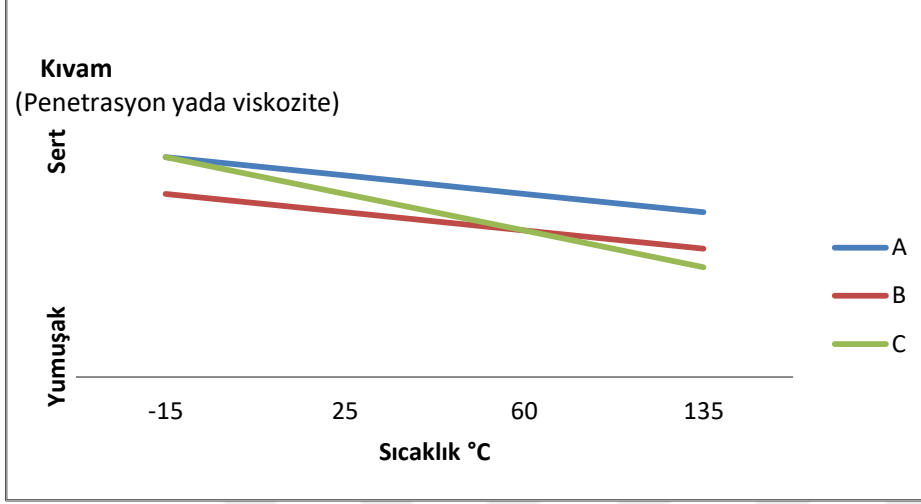
bağlayıcıları tanılamakta ve tanımlamakta noksan kaldığı yapılan çalışmalar sonucu var olduğu tespit edilmiştir. Değişik petrol rezervlerinden oluşturulan bitümlü bağlayıcılar uygulanan geleneksel test tekniklerine göre eşit penetrasyon ve viskozite kategorisinde değerlendirilmelerine rağmen Superpave performans kategorileşmesine göre trafik yüklerinin tesiri altında birbirlerinden daha farklı performanslar sergilemeleri durumu ortaya çıkmıştır.

Geleneksel sınıflandırma sistemlerinde yalnızca karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını temsil eden ‘İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi (RTFOT)’ ile kısa dönem yaşlanma dışında, bitümlü bağlayıcının trafik ve çevre koşulları altında uzun dönemli yaşlanması (hizmet ömrü boyunca meydana gelen yaşlanma miktarı) belirlenememektedir. Sadece, Superpave performans sınıflaması ile ‘Dönel İnce Film Etüvü (RTFO)’ deneyi ile bitümlü bağlayıcının kısa dönemli yaşlanması ‘Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)’ deneyi ile de bitümlü bağlayıcının uzun dönemli yaşlanması tespit edilmektedir. Superpave performans sınıflanması (PG); yüksek sıcaklık verilerinde tekerlek izinde oturma, orta sıcaklık verilerinde yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık değerlerinde termal çatlaklar olmak üzere esnek yol üstyapısının performansına tesir eden üç temel bozulma çeşidine göre sınıflandırma yapılması söz konusudur (Güngör ve Öztürk, 2009).

4.3. Superpave Test Yöntemleri

Geleneksel bitümlü bağlayıcı şartnameleri göz önünde bulundurulduğu zaman, bitüm farklı sıcaklık değerlerinde birbirinden farklı fiziksel özellikler barındırmasına rağmen aynı sınıf içerisinde değerlendirilebilmektedir. Durum böyle olunca da geleneksel bağlayıcı şartnamelerinin bitümlü bağlayıcının özelliklerini ifade etmekte eksik bir durumun olduğunun en büyük kanıtıdır. A, B ve C diye adlandırdığımız üç farklı bitümlü bağlayıcının sıcaklık ve kıvam (sertlik) arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil4.3’te gösterildiği gibidir (Cominsky et al., 1994). Bu grafik bitümün sıcaklık-kıvam arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek adına oldukça kritik bir durumdan bahsedildiğini göstermektedir. Şekil 4.3’e göre 25°C’de sıcaklıkta yapılan penetrasyon deneyine ait veriler incelendiğinde bitümlü bağlayıcıların kıvamlarına sıralandığında A,C,B şeklinde sıralandığı tespit edilmiştir. Ancak aynı bitümlü bağlayıcılar 135°C’de sıcaklıkta

uygulandığında viskozite deneyi göz önüne alındığında kıvamlarının sırayla A,B,C şeklinde olduğu tespit edilmiştir (Cominsky et al., 1994, Zaniwski and Pumphrey, 2004).



Şekil 4.3 Farklı bağlayıcıların sıcaklık-viskozite değişim grafiği (Cominskyetal.,1994).

Yapılan bütün bu deney ve uygulamalar neticesinde, geleneksel bitümlü bağlayıcı sınıflama sistemlerinin eksik kaldığının tespit edilmesi üzerine 1987-1993 seneleri arasında yapılan deneysel araştırma ve çalışmalar neticesinde Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Stratejik Karayolu Araştırma Programı (Strategic Highway Research Program, SHRP) Superpave (Üstün Performanslı Asfalt Kaplama) Performans Sınıflandırma Sistemi kurulmuştur. SHRP tarafından uygulanan sınıflandırma sisteminin saf, geri dönüşümü olan, yoğun gradasyonlu, saf ve katkılı bitümlü sıcak karışımlara uygulanabilmesinin yanı sıra taş mastik asfaltlara da yapılabileceğini, yapılan uygulamalar sonucunda netice alındığı görülmüştür.

Superpave bağlayıcı şartname standartlarının diğer bitümlü bağlayıcı standartlarından ayıran en önemli farkı, bitümlü bağlayıcının uygulanacak olan bölgenin sıcaklık değerlerinin de göz önünde bulundurulmasıdır. Asfalt kaplamanın uygulanacağı bölgenin sıcaklık verilerine göre deneylerin uygulanması bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerinden başka ortam faktörlerine karşı mukavemetin daha uygun bir şekilde bulunmasını sağlayacaktır (Altas, 2002).

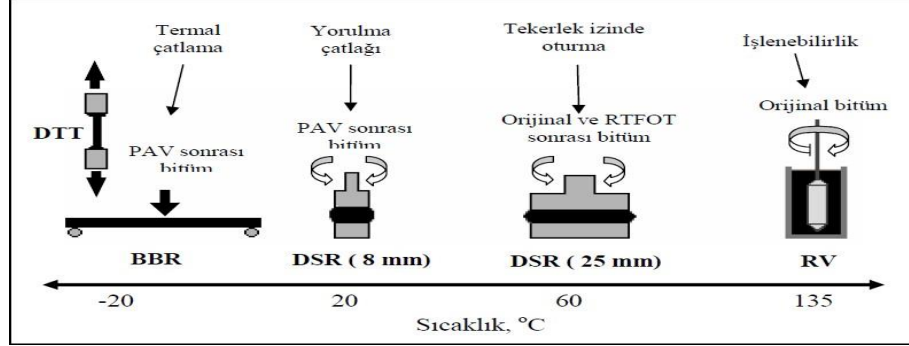
Bitümlü bağlayıcı seçimi performans sınıfına (PG) göre seçildiği takdirde asfalt kaplamanın uygulandığı bölgenin iklim ve sıcaklık şartları oldukça ehemmiyet taşımaktadır. Superpave bağlayıcı şartnamesinde bitümlü bağlayıcılar, bulundukları sıcaklık koşullarında uygulamış olduğu performansa göre sınıflandırılması söz konusudur. Bundan dolayı, böyle bitümlere 'Performans Sınıfı (Performance Grade)' bitüm denilmiş ve PG olarak isimlendirilmiştir. Performance Grade sisteminde, bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerinin belirlenmesi gayesiyle yapılan deneyler neticesinde bitümden beklenen özellikler aynı olmanın yanı sıra beklenen sıcaklık değerleri de değişkenlik göstermektedir. Bu durumda bitümlerdeki performans sınıfının fiziksel özellikleri aynı kalır; ama adı geçen özelliklerin ulaşacağı sıcaklık değerleri asfalt kaplamanın uygulanacağı bölgedeki iklim koşullarına göre değişken olması söz konusudur. Beklenen performans değerleri PG 58-22 olarak isimlendirilen bitümde; 58°C ve -22°C, PG 46-40 bitümde ise 46°C ve -40°C'ler de beklenmesi söz konusudur. PG isimlendirmesini izleyen sayılar, bitümlü bağlayıcının uygulanacağı bölgedeki en yüksek ve en düşük asfalt kaplama sıcaklık değerleri ile ilgili olması söz konusudur (Güngör ve Sağlık, 2008). Superpave bağlayıcı sisteminde uygulanan bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçları Çizelge4.1'de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.1 Superpave bitümlü bağlayıcı deneyleri, amaçları ve performans parametreleri (Dinç, 1999; The Asphalt Institute, 1996; McGennis et al, 1994).

Deneyin ismi	Deneyin Amacı	Performans Parametresi
Dönel İnce Film Etüvü (RTFO)	Bitümlü sıcak karışımın üretilmesi ve yapımı esnasında bağlayıcı yaşlanmasını tespit etmek (kısa süreli yaşlanma)	Yapım sırasında yaşlanma direnci
Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)	Bitümlü sıcak karışımın hizmet ömrü esnasında bağlayıcı yaşlanmasını tespit etmek (Uzun süreli yaşlanma)	Hizmet ömrü esnasında yaşlanma direnci
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Bağlayıcının yüksek sıcaklık ve orta sıcaklık özelliklerini tespit etmek	Kalıcı deformasyon (tekerlek izi) ve yorulma çatlağı direnci
Dönel Viskozimetre (RV)	Bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık özelliklerini tespit etmek	Aktarma ve pompalama
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük hizmet sıcaklık özelliklerini tespit etmek	Termal çatlak direnci (Düşük sıcaklık çatlakları)
Doğrudan Çekme (DTT)	Bağlayıcının düşük hizmet sıcaklık özelliklerini tespit etmek	Termal çatlak direnci (Düşük sıcaklık çatlakları)

Superpave bağlayıcı şartnamesinin esas araştırma konusu, esnek üst yapı kaplama tabakalarında tespit edilen üç ana bozulma türünün varlığı söz konusudur. Adı geçen bozulma çeşitleri; düşük sıcaklıklarda oluşan düşük sıcaklık çatlakları, ortalama hizmet sıcaklığında meydana gelen yorulma çatlağı ve yüksek sıcaklıklarda oluşan tekerlek izinde oturma şeklinde görülmesi söz konusudur. Asfalt kaplamada oluşan bu tip bozulmalardan anlaşılacağı gibi, bitümün hizmet ömrü esnasında karşılaşılabilecek üç önemli sıcaklık değeri ve bu değere bağlı olarak

üç farklı bozulma tipi getirmesi durumu söz konusudur. Bu tür bozulmaların hangi sıcaklık değerlerinde ve ne çeşit bozulma olduğu Şekil 4.4’de gösterildiği gibidir (Sağlık, 2009).



Şekil 4.4 Esnek üst yapısında bozulma çeşidine göre uygulanan performans deneyleri (Sağlık,2009).

Çizelge 4.2 Superpave bitümlü bağlayıcı deneylerinde kullanılacak bitüm çeşitleri (Sağlık,2009).

Deney Adı	Kullanılacak Bitüm Türü
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Orijinal Bitüm
	RTFO Uygulanmış Bitüm
	PAV Uygulanmış Bitüm
Dönel Viskozimetre (RV)	Orijinal Bitüm
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	PAV Uygulanmış Bitüm
Doğrudan Çekme Deneyi (DTT)	PAV Uygulanmış Bitüm

Çizelge 4.3 Superpave bağlayıcı şartnamesinde kullanılan deneyler ve bitümün yerine getirmesi gereken şartname değerleri (Altaş, 2002).

PERFORMANS SINIFI	PG 46-			PG 52-							PG 58-					PG 64-					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	< 46			< 52							< 58					< 64					
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> 16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
ORİJİNAL BAĞLAYICI																					
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230																				
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135																				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C	46			52							58					64					
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI																					
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00																				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	46			52							58					64					
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																					
PAV Deney Sıcaklığı, °C	90			90							100					100					
Dinamik Kayma, TP5, G*sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Fiziksel Sertleşme,	Rapor																				
Sünme Sertliği, TP1, S,Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	-36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	-36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30

Çizelge 4.3 Superpave bağlayıcı şartnamesine ilişkin deneyler ve şartname değerleri (devam).

PERFORMANS SINIFI	PG 70-						PG 76-					PG 82-				
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	< 70						< 76					< 82				
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34
ORJİNAL BAĞLAYICI																
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230															
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135															
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	70						76					82				
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI																
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00															
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	70						76					82				
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																
PAV Deney Sıcaklığı, °C	100 (110)						100 (110)					100 (110)				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Fiziksel Sertleşme,	Rapor															
Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, test sıcaklığı, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	0	- 6	- 12	- 18	- 24
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	0	- 6	- 12	- 18	- 24

4.3.1. Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT)

Superpave bağlayıcı şartnamesinin içerdiği, bitümün üretim, karıştırma, taşıma ve uygulanması basamaklarında oluşan kısa süreli yaşlanmayı belirlemek amacı ile yapılan bir uygulama biçimidir. Bunun yanı sıra Dönel İnce Film Etüvü Deneyi daha sonraki deney aşamalarında uygulanacak olan kısa dönem yaşlanmayı temsil eden bitüm numunesi üretmek gayesi ile uygulanan deneysel bir çalışmadır (Altaş, 2002).

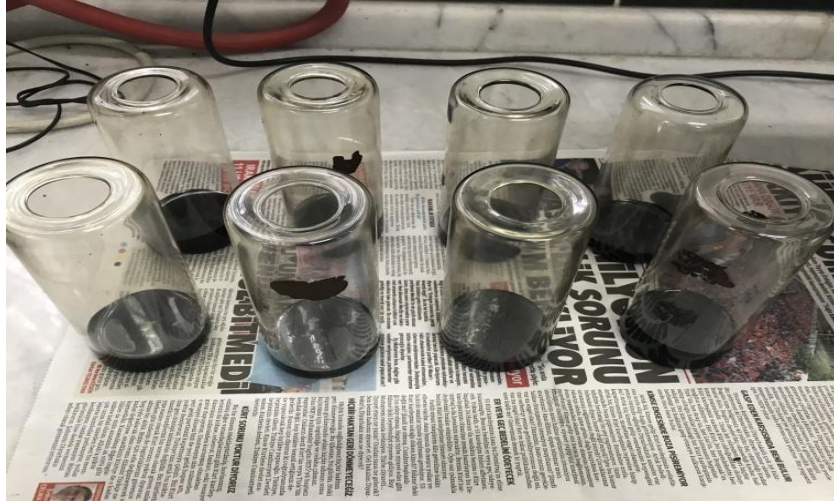
Bu deney ile alakalı olan standartlar ASTMD 2872 şartnamesinde tespit edilmiştir (ASTM D2872, 2012) . ASTMD 2872 şartnamesinde belirlenmiş standardına göre uygulanan deneyde, ince bir film halindeki bitümlü bağlayıcıda, sıcaklık ve hava etkisi altında oluşan kütle kaybı tespit edilerek kısa dönem yaşlanmayı temsil edecek biçimde yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı üzerinde yeniden penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi ve DSR deneyleri uygulanarak, bitümün fiziksel ve reolojik değişimlerini temsil etmektedir (Kennedy et al.,1994).

RTFO cihazı; bitüm numunelerin yaşlandırılmasına sebep olan özel bir etüv içerisine dikey olarak yerleştirilmiş daire biçiminde ve kendi etrafında dönen, içerisinde bitüm numune kaplarının yerleştirilebileceği 8 adet boşluklu çift katmanlı bir tablası vardır. Dönel İnce Film Etüvü Deneyi cihazı içerisinde bitüm numunelerin yaşlanmasına sebep olan hava üfleme aparatı konulmuştur. Dönel İnce Film Etüvü Deneyi cihazının yanı sıra standart ölçülerde 8 adet cam şişe RTFO deney aleti düzeneğinin doğal bir elemanıdır.



Şekil 4.5 RTFO deney cihazı

Dönel İnce Film Etüvü Deneyine başlamadan önce, RTFO cihazı 16 saat evvelden 163 °C sıcaklığa ayarlanmış bir biçimde bir ısıtma işlemi yapılır (Dinç, 1999). Belirtilen bu 16 saatlik süre bittikten sonra RTFO deney cihazı deney için hazır konuma gelmiş bulunur. RTFO cihazına konulacak olan adet cam şişelerin içerisine konulacak bitümlü bağlayıcı numuneleri 150°C'ye ulaşana dek etüvde ısıtılır. 150 °C'ye kadar ısınan bu numuneler homojen bir kıvam oluşana dek karıştırıldıktan sonra, 2 adet şişe daha önceden boş bir şekilde tartılmış olan 8 adet cam şişenin içine 35'er gram (0,5 g duyarlılıkla) olacak şekilde aktarılır.



Şekil 4.6 RTFO deney aletinde kullanılan cam şişeler

Bitümlü bağlayıcı ile doldurulmuş olan cam şişeler 1 saat boyunca oda sıcaklığında dik bir biçimde bekletildikten sonra bu 1 saatlik sürenin dolmasının ardından kütle kaybının tespit edilmesi için ayrılmış olan iki şişe tekrar tartılır. Bu tartma işlemi bittikten sonra cam şişeler yatay bir biçimde Dönel İnce Film Etüvü Deney cihazının etüvüne konulur. Bu cam şişeler RTFO deney cihazına konulurken etüvde sıcaklık kaybı olacağından dolayı etüvün sıcaklığı tekrardan 163°C ulaşana dek beklenilir. Etüv istenilen 163°C sıcaklığa eriştikten sonra dönen tabla, 15 dev/dk değişmeyen dönüş hızıyla 85 dakika boyunca aralıksız bir biçimde dönerek çalışması sağlanır. Bu esnada aynı sürede, bitümlü bağlayıcı numunelerine 4000±200 ml/dk olacak biçimde hava püskürtülmesi gerçekleşecek şekilde cihaz ayarlanır. Dönel tablanın dönme hareketi sayesinde akıcı kıvama sahip olan bitümlü bağlayıcı, şişelerin iç yüzeyinden hareket ederek ince bir film tabakası haline gelmesinin yanı sıra, yüksek sıcaklıkta püskürtülen hava sayesinde bu bitümlü bağlayıcı numuneleri yaşlandırılır. Deney bittikten sonra bitüm numuneleri cihazdan dışarıya alınır. Bu 8 adet numune şişelerinden daha önce tartılmış olan 2 tane bitümlü bağlayıcı numunesi kısa süreli yaşlandırma sonrası kütle kaybının tespit edilmesi için oda sıcaklığında bir saat boyunca yatay bir biçimde soğumaya terk edilir. Geride kalan 6 tane bitümlü bağlayıcı numune şişesi içerisindeki bitüm soğumadan bir sonra ki deneylerde kullanılmak için içerisi boş olan başka kaplara dökülür. Soğumaya terk edilmiş 2 adet bitüm numunesi kütle kaybını tespit etmek için tekrar tartılıp sonuç bir yere not olarak alınır. Bütün bu iş ve işlemlerin bitirilmesinden sonra bu 2 bitümlü bağlayıcı şişeleri bitüm akıcı kıvama gelene kadar 150°C sıcaklıktaki etüv içerisinde ısıtıldıktan sonra akışkan durumuna gelen bu bitümlü bağlayıcılar kaplara doldurulur. RTFO deney cihazı ile yaşlandırılmasının ardından, bitümün kütle kaybını hesaplamak için bu 2 şişeden alınan bitümler için aşağıdaki formül her iki numuneden bağımsız olarak uygulanarak, bu iki değer aritmetik ortalaması bulunduğundan sonra bitümün kütle kaybı değeri bulunması söz konusudur (ASTM D2872, 2012);

$$\text{Kütle Kaybı (\%)} = \frac{\text{İlkKütle} - \text{SonKütle}}{\text{İlkKütle}} \times 100$$

Dönel İnce Film Etüvü deneyinin bitmesinden sonra, kütle kaybının tespit etme deneyleri için kullanılmayan geriye kalan 6 adet bitümlü bağlayıcı şişeleri penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi, dinamik kayma reometresi, basınçlı yaşlandırma kabı deneylerinin uygulanmasında kullanılmak üzere başka bir kaba aktarılır (ASTM D2872, 2012).

4.3.2. Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi (PAV)

Yol esnek üstyapılarının ana elemanlarından olan bitümlü bağlayıcılar üzerinde hizmet süresi boyunca oluşan uzun süreli yaşlanmayı temsil etmek amacıyla SHRP tarafından geliştirilen bu deney, basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi olarak tanımlanmaktadır. Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi, RTFO deney aleti ile kısa süreli yaşlanmaya maruz bırakılan bitümlü bağlayıcılar üzerinde, özel bir etüv içerisinde sabit basınç ve sıcaklık tesiri altında 20 saat süre ile yapılan bir deney olması söz konusudur (Erkens et al., 2016).

PAV, bünyesinde çelik tepsiler barındıran özel bir raflı düzenek ve bir etüvden meydana gelmektedir. Basınçlı yaşlandırma kabının bünyesindeki hava basıncı, basınç düzenleyici boşaltma ve tedrici boşaltma valfli sayesinde yapılmaktadır. Şekil 4.7’de basınçlı yaşlandırma kabı deney cihazı gösterilmektedir.



Şekil 4.7 PAV deney aleti

PAV deneyinde kullanılacak olan bitüm (RTFO deneyi ile önceden kısa süre yaşlandırılan) akıcı bir duruma gelinceye kadar ısıtılır (hemen hemen 135°C). Akışkan duruma gelen bitümlü bağlayıcılar homojen bir duruma ulaşınca kadar karıştırılır. Bitümlü bağlayıcıların konulacağı kaplar daha öncesinde etüv (yaklaşık 135°C)’de bırakılarak ısıtılır. Bu şekilde bitümlü bağlayıcı yapılacak deney öncesinde ısı kaybına maruz kalması durumu ortadan kalkmış olur. Etüvden içerisinden alınan bu bitümlü bağlayıcılar, tekrar etüv içerisinden alınan 140 mm çapındaki kapların içine $3,2\pm 0,1$ mm kalınlığa sahip ve $50\pm 0,5$ gr kütlede olacak biçimde bu kaplar doldurulur. Kapların içine bitümlü bağlayıcılar konulduktan sonra bu bitümlü bağlayıcı numune kapları daha önceden ısıtılmış raf içerisine hafifçe ve sarsmadan konulur. Bir sonraki aşamadan sonra bu raf, hemen hemen 4 saat önceden açılarak deney sıcaklıkları 90°C , 100°C veya 110°C sıcaklıklardan biri seçildikten sonra bu sıcaklığa kadar ısıtılan PAV deney cihazı içerisine konulur ve aletin kapağı kapatılarak vidalar oldukça iyi bir şekilde sıkılır. Yapılan bu işlemler gerçekleştirilirken oluşan sıcaklık kaybı tekrardan elde edilene kadar beklenir. Deney esnasında yapılacak olan değişmeyen hava basıncı değeri $2,1\pm 0,1$ mPa yani $305\pm 0,5$ psi olacak biçimde ayarlanır. Uygulama sıcaklığı iklim şartları ve karışımda kullanılacak olan bağlayıcının sınıfına göre 90°C , 100°C ve 110°C ifadelerden biri olacak biçimde tercih edilir. Deneyin uygulama sıcaklıkları bitümlü bağlayıcıların daha önceden DSR cihazıyla tespit edilmiş yüksek sıcaklık sınıfları baz alınarak Çizelge 4.5’de gösterilene uygun biçimde tercih edilmektedir (Erkens et al., 2016).

Çizelge 4.4 Bitümlü bağlayıcı sınıflarına göre PAV deneyi sıcaklıkları

Bitümlü Bağlayıcı Sınıfları	Sıcaklık (°C)
PG46-Y	90
PG52-Y	90
PG58-Y	100
PG64-Y	100
PG70-Y	100-110
PG76-Y	100-110
PG82-Y	100-110

Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi bittikten sonra alet içerisindeki basınç yavaş bir şekilde dışarıya transfer edilmelidir. Bu durum yapılmadığı takdirde bitümlü bağlayıcılar üzerinde hava kabarcıklarının oluşması söz konusu olabilir. Deney cihazının içinde bulunan hava boşaltıldıktan sonra vidalar yavaş bir şekilde açılarak cihazın kapağı kaldırıldıktan sonra bitüm numuneleri kaptan dışarıya alındıktan sonra gaz alma (degas) cihazına konularak 30 dakika süre ile bitüm numuneleri içerisinde sıkışan hava kabarcıklarından ayrılmış bir hale gelir ve gaz alma (degas) cihazı Şekil 4.8’de gösterildiği gibidir (Günay, T., 2016).



Şekil 4.8 Gaz alma (degas) cihazı

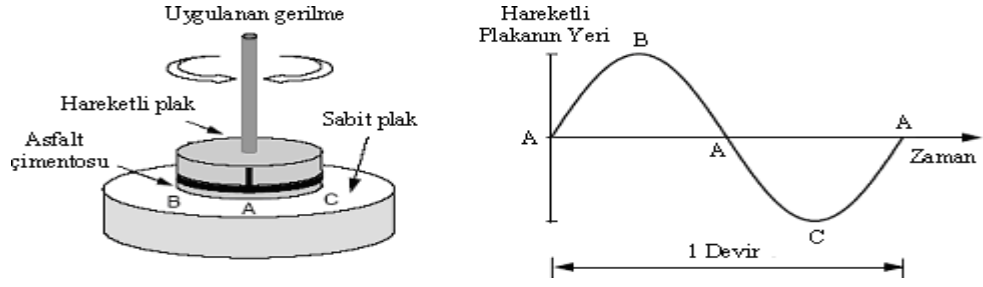
4.3.3. Dinamik kayma reometresi deneyi (DSR)

Superpave bağlayıcı şartnamesinin temel ve kritik bir öneme sahip deneylerinden bir tanesi de Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyidir. Belli bir sıcaklık değeri ve belli bir kayma gerilmesi altında bitümün elastik ve viskoz davranışını tespit etmek Dinamik Kayma Reometresi deneyinin ana gayesidir. Uzun yıllar boyunca bitüm üzerinde yapılan çalışmalar, sıcaklık değişimi ve yükleme süresi bitümlü bağlayıcıların davranışları üzerinde direk tesir ettiğinin kanıtıdır. Böyle olasılıklar söz konusu olduğu için, Superpave bağlayıcı şartnamesinde bu değişkenler dikkate alınarak Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyi geliştirilmiştir (Sağlık, 2009).



Şekil 4.9 DSR cihazının görünümü

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deney aletinde bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin oluşumunu sağlayan oscillation (salınım) hareketleriyle tespit edilir. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deney aletinin çalışma prensibi Şekil 4.10'da gösterildiği gibidir. Bu prensipte oluşan cihazın yapısını inceleyecek olursak, alt bölüm hareketsiz bir plaka üzerine konulan bitümlü bağlayıcı, üst bölüm ise hareketli plaka sayesinde sıkıştırılır. Bu iki plakanın arasında sıkışıp kalan bitümlü bağlayıcı, hareketli olan plaka sayesinde A noktasında iken B noktasına, ardından yine A noktasına, A noktasından C noktasına hareketinden sonrada yine A noktasına geri döndükten sonra bir devir tamamlanmış olur (Zaniewski and Pumphrey, 2004).



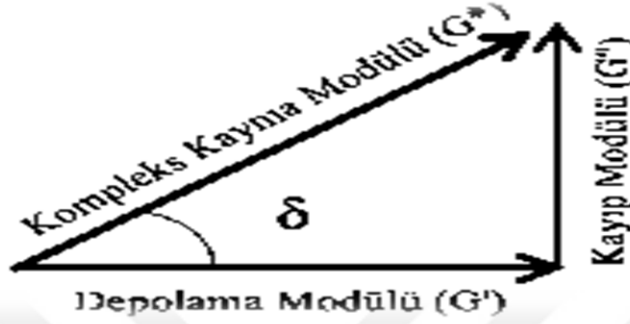
Şekil 4.10 DSR cihazının çalışma prensibi (McGennisetal.,1994;Zaniewskiand Pumphrey,2004).

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyini geleneksel test tekniklerinden ayıran önemli özelliklerin başında bitümlü bağlayıcıların reolojik değişkenlerini tespit eden kompleks kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) gibi verilerin oluşması söz konusudur. Bu değişkenler sayesinde bitümlü bağlayıcıların termoplastik özelliklerin yanı sıra viskoelastik özelliklerin tespit edilmesi söz konusudur (McGennis et al., 1994).

Adı geçen değişkenleri kapsamlı bir biçimde ele alırsak, kompleks kayma modülü (G^*), bitümün devamlı ve tekrarlı bir şekilde kayma gerilmelerine maruz kalması durumunda oluşan deformasyonlara karşı gösterdiği toplam direnci göstermektedir (Sağlık, 2009).

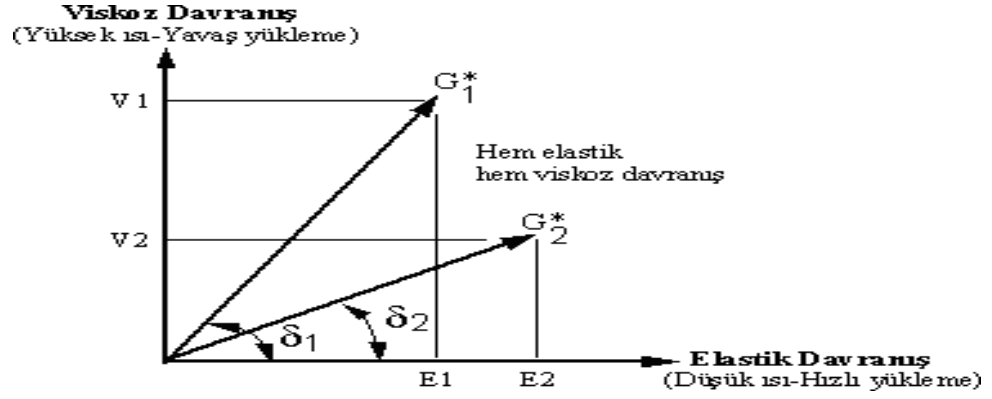
Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deney cihazı yüksek sıcaklık sınıfının tespit edilmesinde kullanıldığı zaman hareketli olan üst plaka 10 rad/sn değerinde sabit frekansta ve 10 defa ardı ardına olacak biçimde bir salımın hareketi yapması söz konusudur. Uygulanan frekans değeri, bitümlü bağlayıcıya uygulanan yükleme süresi ile aynı anlamdadır. Bu frekans gerçek anlamda 80 km/saat hızla hareket eden bir aracın bitüm üzerindeki yükleme zamanını göstermektedir. Dinamik Kayma Reometresi deney (DSR) cihazının uyguladığı hareketin sonucunda meydana gelen kayma gerilmesi deney cihazı tarafından otomatik bir biçimde hesaplandıktan sonra veriler kaydedilir. Bu durumda kompleks kayma modülü (G^*) değeri hesaplanmış olur. Kompleks kayma modülü (G^*); bitümlü bağlayıcının elastik hareketinin kriteri olan depolama modülü (G') ve viskoz hareketinin bir kriteri olan kayıp modülü (G'') olmak üzere iki farklı değişkenden meydana gelmektedir.

Depolama Modülü (G') her yükleme dönemi sırasında bitümlü bağlayıcı numunesinde saklanan enerjinin ölçüsünü göstermekte iken, kayıp modül (G'') her yükleme dönemi boyunca bitüm numunesindeki kaybolan enerjinin ölçüsünü işaret etmektedir (McGennis et al., 1994; Zaniwski and Pumphrey, 2004).



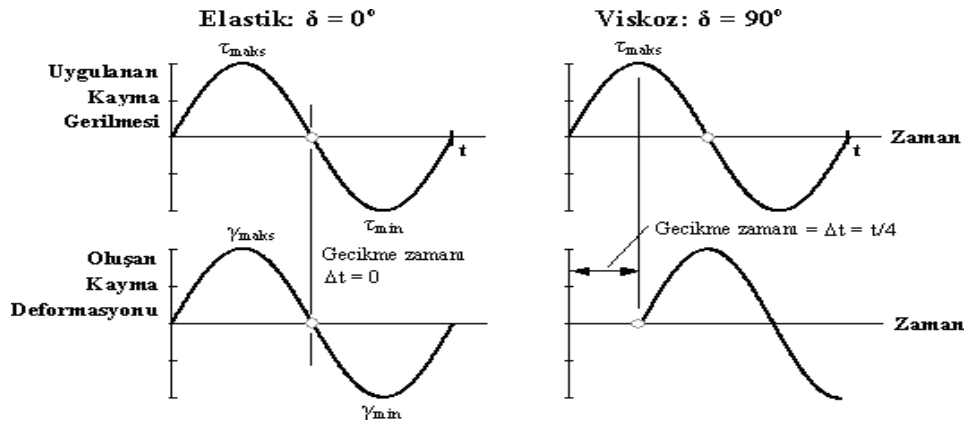
Şekil 4.11 Kompleks kayma modülü ve bileşenleri

Günümüze kadar uygulanan deneyler ve yapılan çalışmalar yalnızca kompleks kayma modülü verisinin bulunması ile bitümün reolojik özelliklerinin ifade edilemeyeceğini göstermiştir. Şekil 4.12’de gösterildiği gibi olan G_1^* ve G_2^* kuvvetleri iki farklı bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülünün davranışlarını göstermektedir. Grafikte de görüldüğü gibi her iki bitümlü bağlayıcıda viskoelastik bir özelliğe sahip olmasına rağmen, 2 numaralı bitümlü bağlayıcının faz açısının daha küçük olmasından dolayı 1 numaralı bitümlü bağlayıcıya göre daha elastik bir özellik sergilemektedir. Elastik davranışı sembolize eden bileşenin daha büyük olmasından kaynaklı 2 numaralı bitümlü bağlayıcının yük altındaki deformasyonlarının uygulanan yükün kaldırıldıktan sonra geri gelmesi, 1 numaralı bitümlü bağlayıcıya göre daha uzun bir zamanda ortaya çıkması söz konusudur. Bahsedilen bu durumdan yola çıkarsak kayma modülü (G^*) değeri tek başına bitümün davranışını ifade etmekte yetersiz kalmaktadır. Açıklanan bu durumlardan yola çıkarsak bitümün davranışının sağlıklı bir biçimde tespit edilmesinde kompleks kayma modülü (G^*)’nün yanı sıra faz açısı (δ) değerinin de bulunması elzem bir durum meydana getirmektedir (Tunç, A., 2001; McGennis et al., 1994).

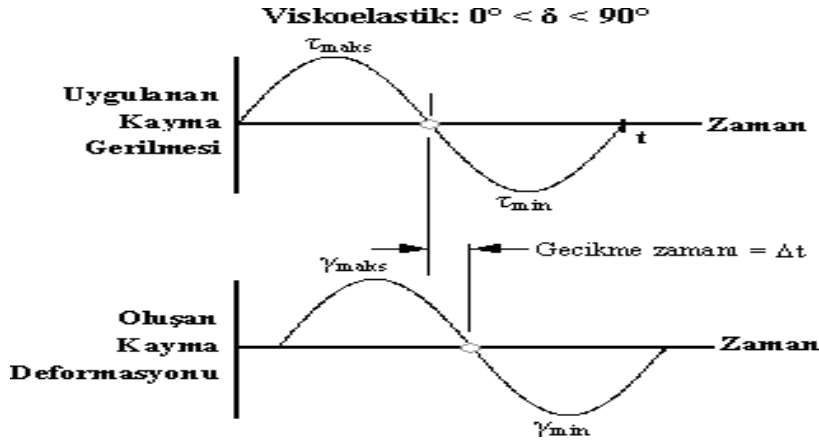


Şekil 4.12 Kompleks kayma modülü bileşenleri

Bitüme uygulanan kayma gerilmesi sayesinde oluşan kayma deformasyonu arasındaki süre farkı (Δt) olarak ifade edilmekte birlikte viskoz deformasyon ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının göstergesi de faz açısı (δ)'dır. Bu açının 0° olması bitümlü bağlayıcının elastik davranışa sahip olduğu, 90° olması durumunda ise bitümlü bağlayıcının viskoz özelliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bitümün davranışında da bahsedildiği gibi viskoelastik bir karakter sergilediği için normal şartlarda faz açısı 0° ve 90° arasında değişmesi söz konusudur (Tunç, A.,2001;Kennedyet al., 1994).

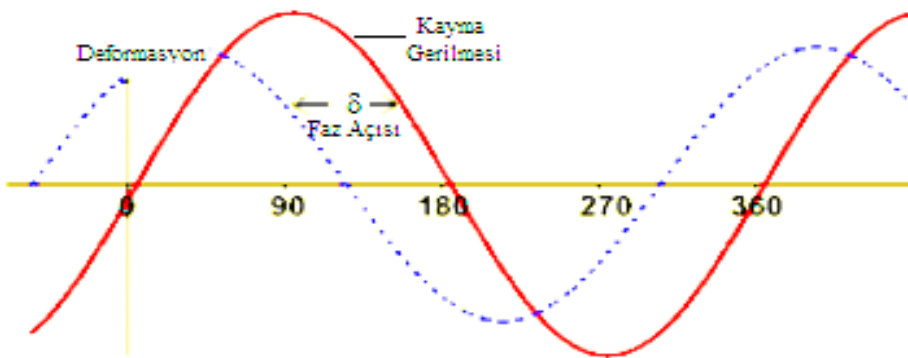


Şekil 4.13 Viskoz ve elastik malzemeler de gerilme-deformasyon ilişkisi (Tunç, A., 2001; Kennedyetal., 1994).



Şekil 4.14 Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi (McGennisetal.,1994; Kennedyetal., 1994).

Bitümün viskoelastik özelliği yukarıda belirtilen durumlarla belirlenirken, G^* ve δ değerleri beraber değerlendirilmelidir. Bitümün normal sıcaklık ve trafik yükleri ile karşılaştığında göstermiş olduğu hareketi daha net bir biçimde kavramak için kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) verileri beraber kullanılarak tekerlek izi parametresi olarak ifade edilen " $G^*/\sin\delta$ " ifadesi ortaya çıkmaktadır. Bu durum Şekil 4.15’de ki grafikte açıkça görülmektedir (Mezger, 2011).



Şekil 4.15 Kayma gerilmesi, deformasyon ve faz açısı bağlantısı (Mezger,2011).

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyleri deformasyon veya gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilmektedir. Deformasyon kontrollü deneysel

uygulamada, deney esnasında bitümlü bağlayıcıda oluşacak deformasyon değerinin geçilmemesi ve bu duruma göre bitümlü bağlayıcıya uygun ölçüde kayma gerilmesi uygulanması söz konusudur. Gerilme kontrollü deneylerde ise, belirli bir kayma gerilmesi sabit bir şekilde bitümlü bağlayıcıya tesir etmektedir. Bu durumda asıl önemli olan husus, kullanılan malzemelerin doğrusal viskoelastik (LVE) bir özellik ortaya çıkardığı ve bu sınır değerini geçilmemesi söz konusudur. Bu şekilde hareket edildiği takdirde asıl amaç numune üzerinde kalıcı deformasyonun oluşmamasıdır. Durum böyle olunca, Dinamik Kayma Reometre (DSR) deneylerinde değişik sıcaklık değerleri uygulanmasına rağmen her bitümlü bağlayıcı çeşidine ait sadece bir adet numuneyle bitümlü bağlayıcının PG sınıfının belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Günay, T., 2016).

Yukarıda belirtilen durumların haricinde Dinamik Kayma Reometresi (DSR) , bitümün çeşitli sıcaklık değerlerinde çeşitli bozulma tiplerine karşı dayanımını tespit etmek hedefiyle kullanılmaktadır. Dinamik Kayma Reometresi (DSR), yüksek sıcaklıkta meydana gelen değerlerin tekerlek izini (kalıcı deformasyon) meydana getirmesine, normal sıcaklık değerlerinde ise yorulma çatlaklarına karşı mukavemeti belirlemek gayesiyle kullanılmaktadır (Taşçı, 2010). Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyi, yüksek ve orta sıcaklık değerlerinde bitümde oluşan tekerlek izi oluşumu ve yorulma çatlakları oluşumunun tespit edilmesinde farklı sınır değerleri ve farklı bitümlü bağlayıcı numune özelliklerinin kullanılması durumu söz konusu olmaktadır. Adı geçen sınır değer ve bu değerlerin özellikleri aşağıda yazıldığı gibidir.

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyinde, yüksek sıcaklık ve tekrarlı trafik yüklerinin etkisi altında asfalt kaplamalarında bitümlü bağlayıcı malzemenin viskoz davranış sergilemesinin neticesinde oluşmaktadır. Superpave bağlayıcı şartnamesinde belirtildiği gibi, bitümün yüksek sıcaklık ve kalıcı deformasyona karşı direnci belirlemede bağlayıcı kıvamının miktarını temsil eden ‘tekerlek izi parametresinin ($G^*/\sin\delta$)’ vazgeçilmez olduğu dile getirilmiştir. Tekerek izi parametresinin tespit edilmesinde kullanılan ‘kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ)’ ifadeleri Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyi ile rahatlıkla bulunabilmektedir. Yüksek tekerlek izi direnci için ‘ $G^*/\sin \delta$ ’ ifadesi

orjinal bitüm için en az 1,00 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar için ise en az 2,20 kPa olması gerekir. Tekerlek izi parametresi ' $(G^*/\sin\delta)$ ' kayma modülü değeri ile doğru orantılı bir şekilde değişkenlik gösterirken faz açısı ifadesi ile ters orantılı bir özellik göstermektedir (McGennis et al.,1994).

Esnek üst yapılarda oluşan en önemli bozulma çeşitlerinden başka bir tanesi de yorulma çatlaklarıdır. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre, bitümlü bağlayıcıların yorulma çatlaklarına karşı direnci bulmak için 'kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ)' ifadeleri yardımıyla bulunmaktadır. Asfalt kaplamalı yollar hizmete açıldıktan sonra, bu çeşit yollarda normal ve düşük sıcaklıklarda yorulma çatlaklarının meydana gelmesinden dolayı Superpave bağlayıcı şartnamesi, Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneylerinde RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı numunelerin kullanılması gerektiği vurgulanmaktadır. Superpave bağlayıcı şartnamesinde yorulma çatlağı parametresi olan " $G^*\sin\delta$ " ifadesi ile bulunmaktadır. Yorulma çatlağı parametresinin 5000 kPa değerini geçmemesi beklenmektedir. Bu parametre değerinin PAV sonrasındaki bitümlü bağlayıcının elastik bir özellik sergilemesini yani yorulma çatlaklarına karşı bu direncin büyük olması gerektiği belirtilmektedir. Bu ifadelerde belirtildiği gibi yorulma çatlaklarına karşı oldukça yüksek bir direnç ortaya koyması için düşük G^* ve δ değerlerinin tercih edilmesi söz konusudur (McGennis et al., 1994).

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyine tabi tutulacak olan bitümlü bağlayıcılar etüv içerisinde yaklaşık 105°C - 110°C ısıtılarak akışkan bir duruma getirilmesi gerekmektedir. Akışkan duruma gelen bitüm, 25 mm çapa sahip 1 mm kalınlığa sahip DSR numune kaplarına akıtılarak oda sıcaklığında soğumaya terk edildikten sonra, soğuyan bitümlü bağlayıcı numuneleri DSR cihazının alt kısmında bulunan plakaya konularak alt ve üst bölümlerin plakaları deney konumuna, yani 1mm aralık kalacak konuma getirilmesi sağlanır. Alt ve üst kısımlardaki plakalar deney konumuna getirildikten sonra bitümlü bağlayıcı numunesinin cihazdaki fazla olan kısımları 50 - 60°C sıcaklıklarda rahatlıkla kesme (trimming) işlemi uygulanabilecek durumda gerçekleştirilir. Trimming işlemi için DSR aletinin hareketli olan plaka kısmı yazılım sayesinde deneyin

uygulanacağı plaka aralığına sabit bir hızla ulaştırılmaktadır. Alt ve üst plak arasındaki mesafe düştükçe bitümün fazla olan bölümü plakalar arasına sıkıştığı için dışarıya taşması söz konusudur. Alt ve üst plakalar arasındaki uzaklık sabit bir konuma ulaşana kadar dışarıya taşan fazla bitümlü bağlayıcı kısım bir bıçak sayesinde plakalar arasında kesilerek atılır. Böylece bitümlü bağlayıcı numunenin kalınlığı deneyde uygulanması gereken kalınlığına ulaşmış olur. DSR deney cihazının alt ve üst plakalarının 0,1°C hassasiyete sahip olmasının yanı sıra istenilen deney sıcaklığına eriştikten sonra bitümlü bağlayıcı numunenin de aynı sıcaklığa erişmesi beklenir ve akabinde deneyin başlaması söz konusudur (AASHTO T 315, 2012)

Dinamik Kayma Reometresi deneyinde 52°C, 58°C, 64°C, 70°C, 76°C ve 82°C'lik sıcaklık ifadeleri kullanılarak bitümlü bağlayıcıların PG sınıfları belirlenir. DSR aletinin içerisinde bulunan yazılım neticesinde bitüme uygulanan gerilme ve bu gerilmeye tepki olarak bitümlü bağlayıcının uygulamış olduğu deformasyon arasındaki bağlantı sayesinde bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değeri bulunmakta ve bununla beraber deneyin başlangıç sıcaklığı olan 52°C'den başlayarak 6°C'lik artış ile en yüksek deney test sıcaklığı olan 82°C'ye erişmektedir. Ancak, cihaz içerisinde bulunan yazılım deney sürdüğü esnada Superpave bağlayıcı şartname sınırlarını da kontrol etmesinden ötürü sınırların gerçekleşmediği sıcaklıkta deneyi bitirmekte ve bitümlü bağlayıcının hangi sıcaklıkta sınırları sağlamadığı ile ilgili sonuç raporu oluşmaktadır (Günay, T., 2016).

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyleri daha önceden de bahsedildiği gibi sadece orijinal bitüm üzerinde değil aynı zamanda yaşlandırılmış bağlayıcı numunelerine de uygulanmaktadır. $G^*/\sin\delta$ ifadesinin yaşlandırılmamış bağlayıcı numuneleri için en düşük 1000 Pa (1 kPa), RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcı numuneler için de bu değer 2200 Pa (2.2 kPa) olması gerektiği AASHTO TP5-98 standartlarına göre belirlenmiştir (Kuloğlu vd., 2008).

Sadece orijinal bağlayıcılar üzerinde değil aynı zamanda yaşlandırılmış bağlayıcılar için şartname kriterleri incelenmekte ve şartname kriterlerinin sağlanması gerektiği en son sıcaklık değerleri arasında kıyaslama yapılarak bulunan en küçük değer PG sınıfı olarak alınır. Bunun yanı sıra bitümlü bağlayıcıların yorulma sıcaklığını göz önüne almak amacıyla PAV ile yaşlandırılmış bitüm numuneler için uygulanan her deney sıcaklık değerleri arasında 3°C'lik fark olacak biçimde ve deneyin sıcaklık aralığı 4°C ve 40°C arasında Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyi gerçekleştirilir. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyleri için sıcaklık değerleri baz alınarak, 8 mm çapa sahip ve 2 mm kalınlığa ya da 25 mm çapa sahip ve 1 mm kalınlığa sahip iki değişik boyutta bitümlü bağlayıcı numuneleri kullanılır. Hem bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık sınıfının tespit edilmesinde, hem de PAV ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar üzerine uygulanacak olan DSR deneyleri için 25 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki bitümlü bağlayıcı numuneler kullanılır. 25 mm çapındaki DSR numune örnekleri Şekil 4.16'da gösterildiği gibidir (AASHTO T 315, 2012).



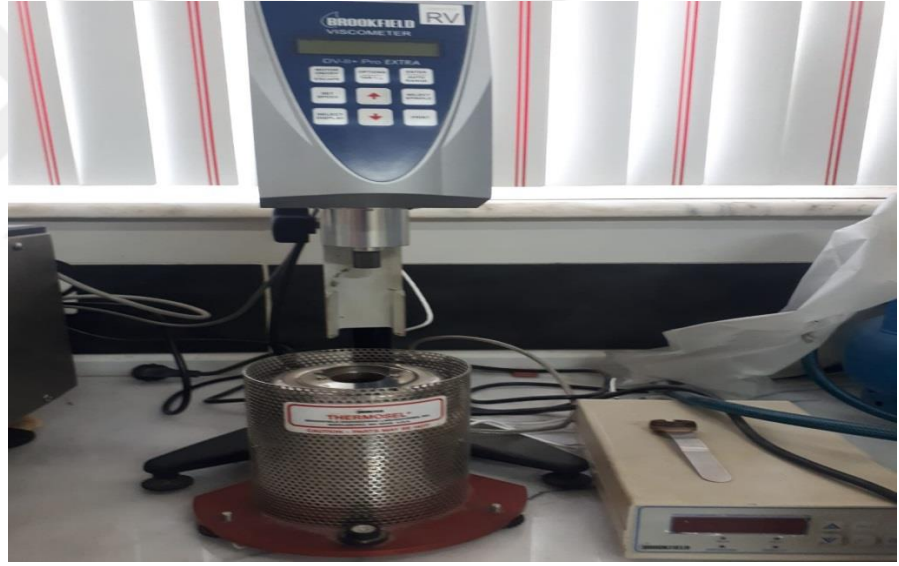
Şekil 4.16 25 mm çapa sahip DSR numuneleri

4.3.4. Dönel Viskozite (RV) Deneyi

Bitümlü sıcak karışımların yüksek sıcaklıkta, plentteki yapım düzeyinde ve uygulama aşamasında hangi derecede işlenebilir ve pompalanabilir olduğunu tespit etmek gayesiyle oluşturulmuş bir deneysel çalışmadır (ASTM D4402).

RV deneyinin gerçekleştirilebilmesi için iki çeşit viskozimetre deney cihazı kullanılmaktadır. Bu aletlerden birisi ‘Brookfield (döner mil)’ viskozimetre deney cihazı, diğer deney cihazı ise kapiler viskozimetre deney cihazıdır. Adı geçen bu iki deney cihazından ‘Brookfield Viskozimetre Deney’ aleti kapiler viskozimetre deney aletine göre daha sık kullanılması söz konusudur. Dönel viskozimetre deneyi yaşlandırılmamış saf ve modifiye katkılı bitümler üzerinde uygulanması söz konusudur (Uncu, D.,2017).

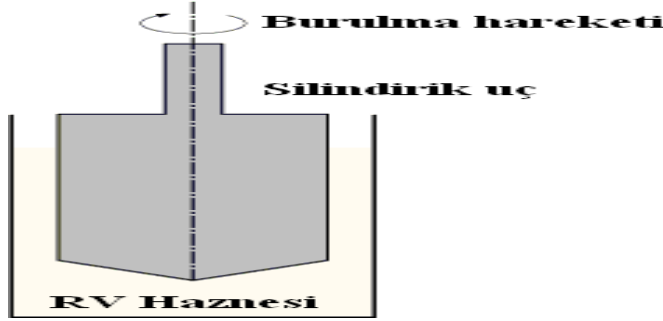
Bu deney aleti, termosel ısıtıcısı ve Brookfield viskozimetre aleti olmak üzere iki bölümden oluşur. Motor, mil, dijital gösterge ve kontrol paneli olmak üzere 4 parçadan oluşan kısım Brookfield viskozimetre aletidir. ASTM D 4402 standartlarına uygun olan Brookfield viskozimetresi Şekil 4.10’da bulunmaktadır.



Şekil 4.17 Dönel viskozimetre aleti ve sıcaklık ünitesi

Brookfield viskozimetre cihazında bulunan motor, mili döndürdüğü zaman bitümlü bağlayıcı üzerinde bir burulma kuvveti meydana getirmektedir. Bu deney cihazı biçimsel olarak şakulün topuzuna benzeyen bir mil kullanılması söz konusudur. Bitümlü bağlayıcının viskozitesini belirlemekte kullanılan silindir şeklinde bir mil, 21 ve 27 numara olmak üzere iki çeşitten meydana gelmektedir. Motorun çalışması ile 20 devir/dakika (20rpm) süratle döndürülen bu mil bitümlü bağlayıcının viskozite ifadesinin dijital gösterge sayesinde otomatik bir şekilde

okunabilmesine yardımcı olmaktadır. Deney esnasında sık bir şekilde No.27 mm'lik mil kullanılmaktadır. Dönel Viskozimetre deney aletinin çalışma prensibi



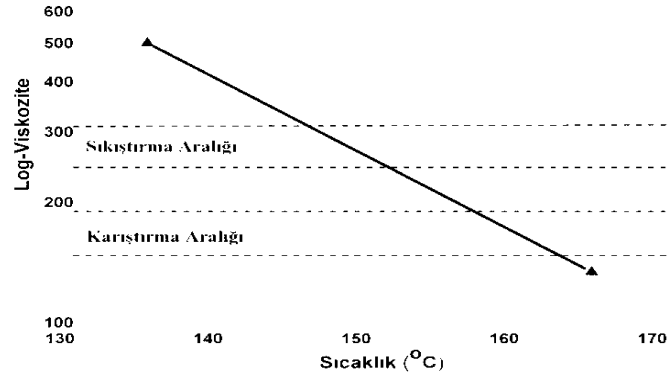
Şekil 4.18'de gösterildiği gibidir (McGennis et al., 1994; Zaniwski and Pumphrey, 2004; Petersen, 1994).

Şekil 4.18 RV cihazının çalışma prensibi (ASTMD4402,2015).

Dönel Viskozimetre deneyinde bulunan viskozite değeri santipois (cP) biriminde hesaplanır iken, performans esaslı bağlayıcı sınıflamasında ise bu değer paskal.saniye (Pa.s) birimi olarak kullanılması söz konusudur. Bundan dolayı, bu iki birim arasındaki bağlantıyı oluşturmak için $1000 \text{ cP} = 1 \text{ Pa.s}$ denklemi kurulabilir. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre 135°C sıcaklık değerinde hesaplanan viskozite değeri 3 Pa.s 'yi geçmemesi istenmektedir. Bu viskozite değerinin geçilmesi durumunda, adı geçen bağlayıcılarla hazırlanacak olan bitümlü sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları istenilen değerlerden fazla olması söz konusudur (McGennis et al., 1994).

Dönel Viskozimetre deneylerinin uygulanması, bitümün işlenebilirliği göz önünde bulundurularak 135°C sıcaklık ve 165°C sıcaklık olmak üzere iki değişik sıcaklık değerinde meydana getirilmesi söz konusudur. Böylelikle bitümlü bağlayıcıların viskozite değerlerinin sıcaklık değişimi ile olan alakası tespit edilmiş olur. 135°C ve 165°C 'de meydana gelen viskozite deneylerinin bitirilmesinden sonra, bitümlü bağlayıcıların logaritmik oranda viskozite-sıcaklık grafiği çizilir. Grafik sayesinde bitümlü sıcak karışımların planlanmasında kullanılacak olan optimum karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık ifadeleri tespit edilmiş

olur. Şekil 4.19 RV deneyinden sonra çizilen log.viskozite sıcaklık grafiğidir (Zaniewski and Pumphrey, 2004).



Şekil 4.19 Logaritmik viskozite-sıcaklık eğrisi (Uncu, D., 2017).

Dönel viskozite (RV) deneyinde kullanılacak olan yaşlandırılmamış saf ve modifiye katkılı bitümlü bağlayıcılar 135°C sıcaklığa ulaşana dek etüv içerisinde ısıtılmaya bırakılırken, dönel mil ve bitümlü bağlayıcı numunesinin bırakılacağı RV kabı da o esnada etüv içerisinde ısıtılır. Viskoz bir hal alan bitüm dönel viskozite kabının içine kullanılacak mile göre 8 ile 11 gr arasında bırakılır. İçerisinde bitüm muhafaza eden bitüm numune kabı önceden sıcaklık derecesi ayarlanmış olan termoselin içerisine konulur ve termoselin terazide olmasına ayrıca dikkat edilir. Dönel viskozimetre deneyine ait parametreler girildikten sonra, viskozimetrenin bağlantı noktasında var olan vida ile silindirik şekilli mil, uzatma teli ile montajlı bir şekilde viskozimetre değeri sıfırlanır. Viskozimetrenin sıfırlanmasından sonra, daha önceden ısıtılmış olan silindirik mil viskozimetreye monte edilerek numune kabındaki bitümlü bağlayıcının içerisine daldırıldıktan sonra bitüm numunesi, deney için ihtiyacımız olan 135°C olana kadar ısıtılır. Bu bekleme süresince silindirik milin dönme hızı 20 rpm'ye olarak ayarlandıktan sonra numune sıcaklığının dengeye erişmesiyle birer dakika aralarla üçer okuma yapılır. Bulunan bu değerler Brookfield viskozimetre deney cihazına ait yazılım tarafından otomatik bir şekilde kaydedilir (Zaniewski and Pumphrey, 2004).

4.5. İleri Test Yöntemleri

4.5.1. Farklı frekans ve sıcaklıklarda DSR deneyi

Bitümün yapısı gereği, düşük sıcaklık derecelerinde ve yüksek yükleme hızlarında elastik bir davranış biçimi sergileyerek yüksek dayanım, yüksek sıcaklık davranışı ve düşük yükleme hızlarında ise viskoz davranış sergileyerek düşük dayanım sergilemektedir. Orta sıcaklık değerlerinde ve orta yükleme hızlarında visko-elastik bir malzeme davranışı sergileyerek orta sertlikte bir malzeme olarak ifade edilmektedir. Sonuç olarak düşünüldüğünde bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklık şartları ve farklı trafik yükleri altındaki davranışlarını tespit etmek için Dinamik Kayma Reometresi aleti kullanılarak saf ve modifiyeli bitümler üzerinde farklı frekans deneyi olarak isimlendirilen bir takım ilave deneyler uygulanmaktadır. Yapılan bu deneysel test teknikleri sayesinde bitümün davranış şekli yükleme süresi ile ilişkili olarak daha detaylı bir biçimde ele alınabilmektedir. Farklı frekans ve sıcaklık deneylerinde, bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerini tespit eden kompleks kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) belirlenerek bitümlü bağlayıcının tekerlek izi oluşumuna karşı ortaya koydukları direnç farklı sıcaklık şartları ve farklı trafik yükleri için ayrı ayrı tespit edilmektedir (Günay, T., 2016).

Farklı frekanslarda uygulanacak olan Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyinde Çizelge 4.6'da gösterilen trafik hızlarına eşdeğer kabul görülen deney frekansları çalışma kapsamında kullanılacaktır. Yapılacak olan DSR deneyinde farklı frekansta yapılacak olan deneyler için DSR deney aletine 25 mm plaka çaplı başlık takılı olup, 25 mm çap ve 1 mm kalınlığa sahip bitümlü bağlayıcı numuneleri üzerinde uygulama yapılacaktır. Farklı frekans deneyinin uygulanmasında 6 farklı sıcaklık değeri seçilmiş olup bu sıcaklık değerleri 30°C, 40°C, 50°C, 60°C ve 70°'dir (Günay, T.,2016).

Çizelge 4.5 Trafik hızlarına eş değer deney frekansları

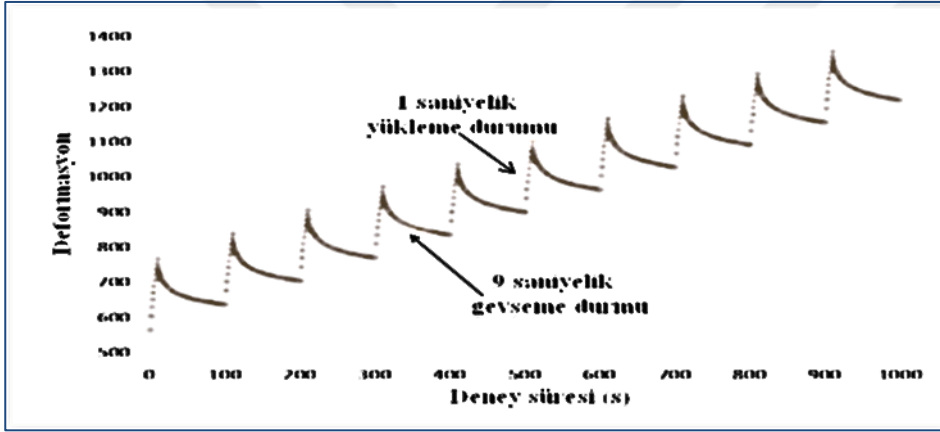
Trafik hızı, km/h		
Düşük	Orta	Yüksek
10 km/h	40 km/h	100 km/h
Trafik hızına eşdeğer olan frekanslar, Hz (rad/sn)		
1,25 rad/sn	5 rad/sn	12,5 rad/sn

Çizelge 4.6’da belirtildiği gibi trafik hızları, her farklı frekans deneyinde o frekansa karşılık gelen trafik hızlarına eşdeğer frekanslar aracılığıyla belirlenmektedir. Çizelge de yer aldığı gibi ilk başta değişmeyen bir sıcaklık değeri ve ardından 3 farklı frekans değeri için farklı deney sıcaklıklarına geçilmiştir.

4.5.2 Çoklu gerilmeli sünme geri dönme testi (MSCR)

Dinamik kayma reometresi (DSR) deney cihazıyla gerçekleştirilen oscillation (salınım) deneysel çalışmalarla hesaplanan G^* ifadesi, kayma gerilmelerine karşı bitümlü bağlayıcının hangi derecede direnç oluşturabileceğini göstermektedir. Yalnız, G^* parametresi, uygulanan yükün uygulanmasının ardından oluşan deformasyonun kalıcı mı yoksa elastik mi olduğu sonucunu açıklama da yeterli değildir. Böyle nedenlerden ötürü, farklı düzeyde kayma gerilmelerinin kullanılmasıyla oluşan deformasyonun detaylı bir şekilde araştırılabildiği, çoklu gerilmeli sünme geri dönme deneyi (MSCR) ulusal ortak karayolu araştırma programı (NCHRP) kurumu tarafından oluşturulmuştur. Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyi ile bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansının elastik deformasyonların da dikkate alınarak belirtilmesi ve kalıcı bozulmaların önceden tespit edilmesine sebep olabilmektedir (NCHRP, 2010).

Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyleri, tekrarlı sünme ve toparlanma (repeated creep recovery) deneyleri baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Bitümlü bağlayıcılara 3,2kPa ve 0,1kPa olmak üzere iki çeşit kayma gerilmesi uygulanmaktadır. Bu deneye göre, ilk başta 0,1 kPa değerindeki kayma gerilmesi 1 sn boyunca bitümlü bağlayıcı numunesine tesir etmekte ve akabinde 9 sn süresi boyunca yüksüz bir toparlanma zamanı meydana gelmektedir. Bu toparlanma döngüsü 10 kez tekrar edildikten sonra, bitümlü bağlayıcı numunesi tekrarlı bir şekilde 10 kez olmak üzere 1 sn'lik 3,2 kPa değerindeki yük ve 9 sn süresince yüksüz bir geri gelme süresi uygulanmaktadır. Çoklu gerilmeli sünme geri dönme deneyine (MSCR) uygulanan bir bitümlü bağlayıcının normal deformasyon vs. zaman eğrisi Şekil 4.20'de gösterildiği gibidir (AASHTO TP 70, 2013).



Şekil 4.20 MSCR deneyine ait deformasyon-zaman grafiği eğrisi (FHWA,2011).

Grafikten de anlaşılacağı üzere 1sn boyunca yüklemeye maruz kalan bitümlü bağlayıcıda belirli bir derecede deformasyon oluşmakta olup, akabinde 9 sn boyunca toparlanma süresi boyunca oluşan deformasyonun bir bölümü zamanla yavaşlayacak biçimde geri dönmekte, diğer bir miktar deformasyon ise kalıcı deformasyon olarak kalmaktadır. Tekrar yük yükleme yapılması durumunda sonraki döngülerde kalıcı olan deformasyon miktarı devamlı bir şekilde artmaktadır.

Çoklu gerilmeli sünme geri dönme deneyi (MSCR) aracılığıyla bitümün elastik geri dönme (R) ve geri dönmeyen sünme uyumluluğunun (J_{nr}) belirlenmesini içerir. Çoklu gerilmeli sünme geri dönme deneyi (MSCR) bazı

sıcaklıklarda dinamik kayma reometresini (DSR) kullanarak oluşturulmaktadır. Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyi yöntemi bitümlü bağlayıcıdaki elastik hareketin yapısını ve iki farklı gerilme düzeyindeki elastik davranış değişikliğini belirlemek için uygulanır. Geri dönmeyen sünme uyumluluğu (J_{nr}), bir bitümün tekrar eden yükler altında kalıcı deformasyonuna karşı direncinin kanıtı olduğunun en büyük göstergesidir (Alqudah, 2016).

Çoklu gerilmeli sünme geri dönme deneyinde (MSCR), eski haline gelen deformasyon ve geriye kalan deformasyon miktarlarının bir ölçütü olarak hem ortalama elastik geri dönme (R) hem de geri gelmeyen sünme uyumluluğu (J_{nr}) olmak üzere böyle temel reolojik parametreler kullanılması söz konusudur. Kriterler göz önünde alındığında, bitümlü bağlayıcının elastik özelliklerini gösteren R değeri, yüksek sıcaklık şartları maruz kalan bitümlü malzemede meydana gelecek olan kalıcı deformasyonu gösteren J_{nr} parametresi şartname kriteri olarak kullanılırlar. R ve J_{nr} parametre değerleri aşağıda gösterilen formüller aracılığı ile bulunmaktadır (Król, et al., 2015).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{10} \epsilon_{\tau}(\tau, N)}{10}$$

$$\epsilon_r = (\epsilon_1 - \epsilon_{10}) * 100 / \epsilon_1$$

$$J_{nr} = \frac{\sum_{i=1}^{10} J_{nr}(\tau, N)}{10}$$

$$J_{nr}(\tau, N) = \epsilon_{10} / \tau$$

Bu formüllerde;

τ = Kayma gerilmesi

N =Döngü sayısı

ε_1 = 1.saniye sonrası oluşan deformasyon miktarı

ε_{10} = 10.saniyedeki deformasyon miktarını göstermektedir.

Bunun yanı sıra deney akabinde bitümlü bağlayıcının polimer modifikasyonunun yeterli bir seviyeye sahip olup olmadığı R- J_{nr} grafiği yapıp grafikteki $R = 29,37 * J_{nr} - 0,26$ eğrisinin çizilmesi ile bulunması söz konusudur. Çizilen grafiğe bakılarak, eğrinin üzerinde bulunan R değerleri, bitümlü bağlayıcının elastik özellik oluşturulmasına yetecek bir ölçüde polimer modifikasyonun uygulandığının göstergesidir diyebiliriz. Ölçülen bu R değeri şayet eğrinin altında kalıyorsa, deneyde kullanılan sıcaklığın polimer modifikasyon için yeterli olmadığı anlamına gelmektedir.

Superpave bağlayıcı şartnamesinde var olan bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık sınıflarının tespit edilmesinde, yaşlandırılmış bağlayıcı numunelerin en az 2,2 kPa değerinde olması, tekerlek izi parametresinin ise ($G^* / \sin \delta$) koşulunu yerine getirmesi kriteri, çoklu gerilmeli sünme geri dönme deney (MSCR) kriteri ile güncel bir hal alma ihtiyacı hissedilmiştir (Domingos and Faxina, 2015).

Bunların haricinde, Superpave şartname kıstasına dahil edilen çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyi ile beraber DSR deneyleri ile elde edilen PG sınıflarında da değişiklik yapılması gereği duyulmuştur. Şekil 3.5'te trafik yoğunluğunun da göz önünde bulundurulduğu yeni şartname sınırları gösterilmiştir. Çizelgedeki değerler göz önüne alındığında, Superpave şartname limitlerinde olduğu gibi, standart trafik (S), ağır trafik (H), çok ağır trafik (V) ve aşırı ağır trafik (E) olmak üzere 4 çeşit trafik yoğunluğu belirlenmiştir. Belirlenmiş olan trafik yoğunluğu için belirli bir J_{nr} , 3,2 (3,2 kPa yük ile uygulanan MSCR deneyinde bulunan) değerinin geçilmemesi durumu göz önüne alınmıştır. Bu ifadelerden sonra, iki yük arasındaki (0,1 kPa ve 3,2 kPa) J_{nr} değeri, farklılıklarını gösteren $J_{nr\text{diff}}$ değerinin, %75'den büyük olması gerekmektedir.

Çizelge 4.6.AASHTO MSCR standartları (AASHTOMP19, 2010).

Sınıf	Standart Trafik (S)	Ağır Trafik (H)	ÇokAğır Trafik (V)	AşırıAğır Trafik (E)
Trafik düzeyi	Trafik < 3 milyon ESAL veya >72km/h	Trafik > 3 milyon ESAL veya 24-72 km/h	Tafik > 10 milyon ESAL veya <24km/h	Trafik > 30 milyon ESAL ve <24 km/h
$J_{nr,3,2 \max}$	4	2	1	0.5
$J_{nr diff \max}$	75	75	75	75

Deney kapsamında hazırlanan atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bağlayıcıların isimlendirmesi aşağıdaki gibi yapılmıştır.

B 50/70 saf bitüm – ‘B’

B 50/70 saf bitüm + %7 Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu – ‘B-7AC’

B 50/70 saf bitüm + %10 Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu – ‘B-10AC’

B 50/70 saf bitüm + %12 Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu – ‘B-12AC’

B 50/70 saf bitüm + %15 Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu – ‘B-15AC’

B 50/70 saf bitüm + %17 Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu – ‘B-17AC’

5. LABORATUVAR TEST SONUÇLARI

Tez çalışmasının bu kısmında uygulanan deneylerin sonuçları verilmiştir. Çalışma içeriğinde, bundan önceki kısımda ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı gibi hazırlanan, atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcı numuneleri üzerinde geleneksel ve Superpave uygulamalı sistem çerçevesinde kullanılan test yöntemleri verileri sunulmuştur.

Tez çalışması kapsamında hem orijinal hem de yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı numuneleri üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bitümlü bağlayıcılar üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkısının 50/70 penetrasyona sahip bitümle farklı oranlarda karıştırılmasının etkileri tespit edilmiştir.

5.1. Geleneksel Test Yöntemlerinin Sonuçları

Bu çalışma kapsamında, öncelikle saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcı numunelerine geleneksel test yöntemleri olan yumuşama noktası tayini ve penetrasyon deneyleri uygulanmış olup, elde edilen veri sonuçları Çizelge 5.1 ' de gösterildiği gibidir.

Yapılan bu çalışma sonrasında saf 50/70 bitümün penetrasyon değeri 62 dmm, olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, deney aleti ile ölçülen bitümün penetrasyon değerlerinin makul sınırlar içerisinde olduğunun kanıtıdır.

Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçlarını her bir bitüm türü için farklı bir şekilde uygulaması yapıldığında, Çizelge 5.1' de açıkça görüldüğü gibi tüm atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcı numunelerinin penetrasyon değeri saf 50/70 bitüme göre azalır iken, yumuşama noktası verisinde artma gözlenmiştir. Bu sonuçtan yola çıkılırsa, saf bitüm içerisine katılan atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu yüzde miktarının artması ile doğru orantılı bir şekilde bitümlü bağlayıcıların da fiziksel özelliklerinin giderek geliştiğinin ve bitümün sertleştiğinin bir göstergesidir (Airey, 2002).

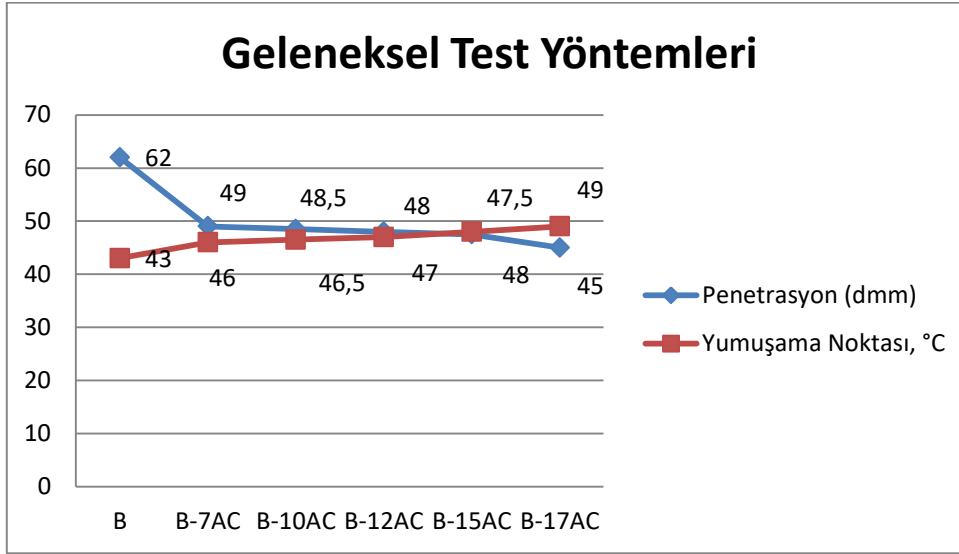
Çizelge 5.1 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların geleneksel test sonuçları

Özellikler	Bağlayıcılar					
	B	B-7AC	B-10AC	B-12AC	B-15AC	B-17AC
Penetrasyon(dmm)	62	49	48,5	48	47,5	45
Yumuşama Noktası °C	43	46	46,5	47	48	49
Penetrasyon İndeksi	-2,67	-1,55	-2,17	-1,82	-1,87	-2,60

Deney sonuçları incelendiğinde saf 50/70 bitümü için, penetrasyon değeri 62 dmm, yumuşama noktası değeri ise 43°C olarak tespit edilmiştir. %17 atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkı ile modifiye edilmiş bitümü için ise penetrasyon değeri 45 dmm, yumuşama noktası sonucu ise 49 °C olarak ölçülmüştür.

Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1’de gösterildiği gibi bulunan bu sonuçlar orta sıcaklık verilerinde atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkısının saf bitümünün sertliğini artırdığını göstermektedir.

Ancak, benzer durum yumuşama noktası deneyi için geçerli değildir. Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1’de verilen değerler incelendiği zaman bütün bağlayıcı karışımlar için de yumuşama noktası değerinin bitüm içerisindeki atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu miktarı arttıkça arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.1 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların geleneksel deney sonuç grafiği

Penetrasyon ile yumuşama noktası tayini deney sonuçlarıyla beraber hesaplanan Penetrasyon İndeksi (PI) verileri ele alındığında saf bitüm için -2,67 belirlenmiştir. B-7AC, B-10AC, B-12AC, B-15AC ve B-17AC bağlayıcıları için ise sırası ile; -1,55, -2,17, -1,82, -1,87 ve -2,60 olarak hesaplanmıştır. Yapılan deneyler neticesinde hesaplanan PI verileri göz önüne alındığında aralarında çok fark olmadıkları ancak B-17AC katkılı numunenin PI değeri saf bitüme yakın olduğu için ısı hassasiyetine diğer bitüm numunelerine oranla daha az hassas olduğunu göstermektedir.

Isı duyarlılığın azalması bitümlü bağlayıcı numunelerinin daha geniş bir sıcaklık yelpazesinde kullanılabileceğinin göstermiştir. Ancak, penetrasyon değerleri ve yumuşama noktası değerleri sıcaklık performansı değerleri için net bir sonuç vermemekle beraber daha sağlıklı analiz yapılması için DSR gibi daha kapsamlı deneyler uygulanarak daha kesin bir sonuç bulmamız daha mümkün görünecektir.

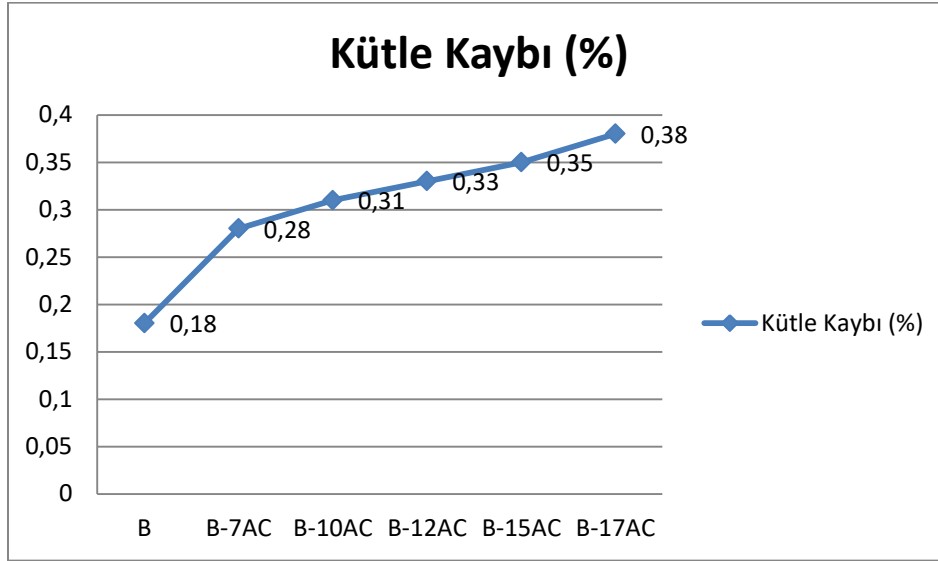
5.2. Saf ve Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu Bitümlerin Dönel İnce Film Etüvü ile Yaşlandırılması Sonucuna İlişkin Deney Sonuçları

Orijinal (yaşlandırılmamış) bitümlü bağlayıcılar üzerindeki geleneksel testler tamamlandıktan sonra, saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlerin dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT) ile kısa süreli yaşlanması yapılmıştır. Yaşlandırılan saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılarda oluşan kütle kaybı değerleri Çizelge 5.2’de hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra, RTFO yardımıyla yaşlandırılmış saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ile modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde penetrasyon deneyi ve yumuşama noktası deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede kısa süreli yaşlanmaya maruz kalmış bitümlü bağlayıcıların fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir.

Çizelge 5.2 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılara ait kütle kaybı deney sonuçları

Özellikler	Şartname sınırı(%)	Bağlayıcı					
		B	B-7AC	B-10AC	B-12AC	B-15AC	B-17AC
İlkkütle,gr	maks.1.0	34,766	34,895	35,008	35,020	35,145	35,163
Son kütle,gr		34,492	34,797	34,899	34,904	34,032	34,574
Kütle kaybı,%		0,18	0,28	0,31	0,33	0,35	0,38

Karayolları Genel Müdürlüğü’nün yayımlamış olduğu ‘Polimer Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesinde’ polimer katkılı bağlayıcıların kütle kaybı değerlerinin maksimum %1 olması gerektiğini dile getirilmiştir (KGM, 2016). Uygulanan deneyler neticesinde saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılması işlemi sonrası oluşan kütle kaybı değerleri göz önüne alındığında tüm bağlayıcıların kütle kaybı değerlerinin %1’den düşük olduğu Şekil 5.2’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.2 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı grafiği

Atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılarda, kısa süreli yaşlandırma sonrası oluşan kütle kaybı verisinin eklenen katkı miktarı ile doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Durum bu şekilde olunca, atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkısının bitüm içerisindeki bulunan aromatikler gibi, hafif moleküllü yapıların buharlaştığını gösterir. Ancak bu artış %1 değerinin altında kaldığı için hiçbir olumsuz durum gözlenmemektedir (Shahabadi et al., 2010).

5.3. Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu ile Modifiye Edilen

Bitümlerin Dönel Viskozimetre (RV) Cihazıyla Viskozitelerinin Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların viskozite değerleri 135 °C ve 165 °C sıcaklık altında The Brookfiels DV-II+Pro Extra Rotational Viscometer (RV) aleti kullanılarak bulunmuştur.

Çizelge 5.3'te görüldüğü gibi saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bağlayıcıların viskozite değerleri incelendiğinde, atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ile modifiye edilmiş bağlayıcıların sahip olduğu viskozite değerlerinin adı geçen iki sıcaklık değerinde de saf bitümlü bağlayıcılara göre, karıştırma ve sıkıştırma

değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. Bu durum atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu modifiyesiyle bitümün sertliğinin arttığını göstermiştir.

B bitümünün 135°C ve 165°C viskozite değerleri sırasıyla 554 ve 192,5 cP olarak belirlenmişken, B-7AC bitümünün 135°C ve 165°C viskozite değerleri sırasıyla 615 ve 292 cP, B-12AC bitümünün 135°C ve 165°C viskozite değerleri sırasıyla 880 ve 325 cP, B-17AC atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu bitümünün 135°C ve 165°C viskozite değerleri sırası ile 1220 ve 362,5 cP bulunmuştur. Bu neticelerden yola çıkarsak saf 50/70 bitüme atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilavesi yapıldığında sertliğinin arttığını göstermiştir.

Çizelge 5.3 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların dönel viskozite deney sonuçları

Bağlayıcı	Viskozite (cP)		ηmodifiye/ηsaf		Sıkıştırma Sıcaklığı(°C)	Karıştırma Sıcaklığı(°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B	554	192,5	1	1	140-143	148-152,5
B-7AC	615	292	1,11	1,51	143,5-147,5	151-154,5
B-10AC	865	304	1,56	1,58	144,5-149	153-157
B-12AC	880	325	1,59	1,68	146-150,5	154,5-159
B-15AC	980	339	1,76	1,77	147,5-151,5	155-161
B-17AC	1020	362,5	1,84	1,88	148-152,5	156-162,5

Sonuç olarak atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozunun ilave miktarı arttıkça akmaya karşı olan direncin arttığı yani bitümün sertleştiği açık bir şekilde görülmüştür.

5.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Cihazı Kullanılarak Saf ve Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu ile Modifiye Edilmiş Bitümlerin Yüksek Sıcaklık Performans Sınıflarının Belirlenmesi

Yapılan deneyler kapsamında saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfları DSR aleti yardımıyla belirlenmiş olup veriler ışığında oluşturulan sonuçlar Çizelge 5.4'te gösterilmiştir. Söz konusu çizelgede bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık sınıfındaki performansları ile birlikte, şartname sınır değerleri ile bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerini ifade edecek olan kompleks kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerleri de verilmiştir. DSR deneyleri saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu bitüm türü içinde hem orijinal hem de yaşlandırılmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Superpave şartnamesine göre orijinal numuneler üzerinde yapılan DSR deneylerinde tekerlek izi parametresi değerinin ($G^*/\sin\delta$) orijinal numuneler için en az 1.0 kPa, yaşlandırılmış numunelerde ise 2.20 kPa olmalıdır (McGennis et al, 1994).

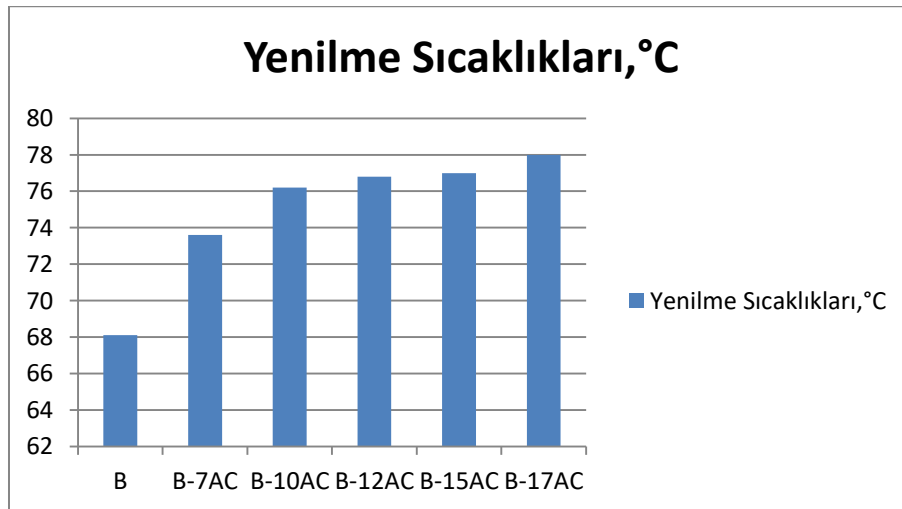
Atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitüm numuneleri için deney başlangıç sıcaklığı 52°C olarak belirlenmiştir. Deney, bitümlü bağlayıcı numunelerinin tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerleri yukarıda belirtilen limit değerler altına düştüğü sıcaklığa kadar 6°C 'lik artışlarla devam edilmiştir. Tekerlek izi parametresi değerleri sınır değerlerin altına düştüğü anda DSR aleti tarafından otomatik bir şekilde bitirilerek bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki performans sınıflarını hafızaya almaktadır.

Çizelge 5.4 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların DSR deney sonuçları

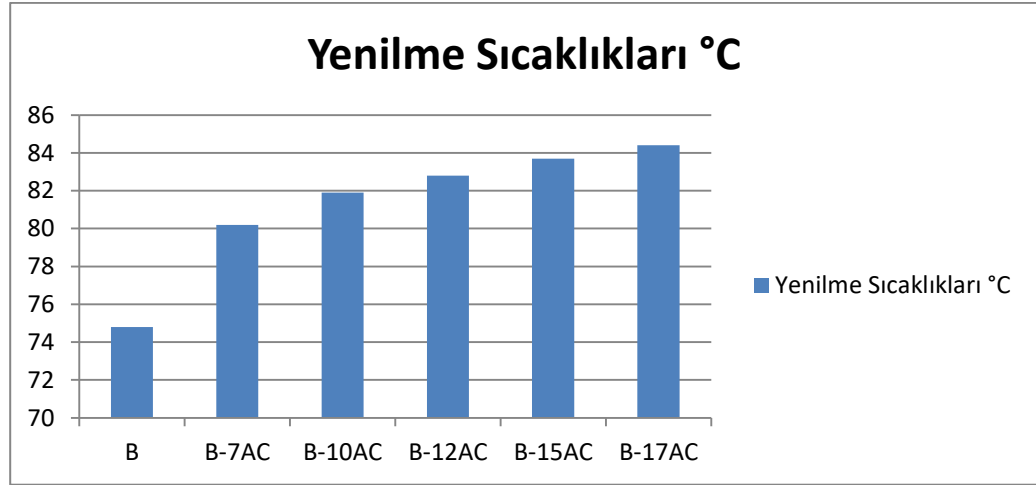
Bağlayıcı		Sıcaklık (°C)	G*(kPa)	δ(°)	G*/sinδ (kPa)	Yenilme Sıcaklığı (°C)	Limit Değerler (kPa)	Sınıf
B	Orijinal	52	7,77	75,59	8,02	68,1	≥1.00	PG 64-Y
		58	3,68	78,93	3,75			
		64	1,78	81,76	1,80			
		70	0,89	84,1	0,90			
	Yaşlandırılmış	52	31,82	77,14	32,64	74,,8	≥2.20	
		58	14,82	80,48	15,03			
		64	6,42	83,9	6,45			
		70	2,88	85,4	2,89			
76	1,34	87,92	1,30					
B-7AC	Orijinal	52	13,38	67,8	14,45	73,6	≥1.00	PG 70-Y
		58	6,99	69,24	7,48			
		64	3,45	71,48	3,64			
		70	1,51	73,15	1,58			
		76	0,96	74,08	0,99			
	Yaşlandırılmış	52	63,02	58,45	73,96	80,2	≥2.20	
		58	31,25	61,21	35,66			
		64	15,62	64,44	17,31			
		70	7,40	67,85	7,99			
		76	3,86	70,32	4,10			
82	1,98	73,24	2,07					
B-10AC	Orijinal	52	15,44	68,15	16,64	76,2	≥1.00	PG 76-Y
		58	8,25	70,27	8,76			
		64	4,62	72,89	4,84			
		70	2,85	74,94	2,95			
		76	1,16	76,02	1,18			
		82	0,74	77,82	0,75			
	Yaşlandırılmış	52	71,58	59,45	83,12	81,9	≥2.20	
		58	45,82	61,42	52,18			
		64	18,44	64,88	20,37			
		70	9,07	68,57	9,74			
		76	4,09	71,49	4,31			
		82	2,01	74,02	2,10			
88	1,11	77,31	1,38					
B-12AC	Orijinal	52	17,87	68,22	19,24	76,8	≥1.00	PG 76-Y
		58	10,75	71,16	11,36			
		64	5,34	74,44	5,55			
		70	2,40	76,82	2,46			
		76	1,07	78,45	1,10			
		82	0,40	79,18	0,41			
	Yaşlandırılmış	52	82,47	60,2	95,04	82,8	≥2.20	
		58	41,52	62,9	46,64			
		64	20,89	65,2	23,02			
		70	10,02	69,08	10,72			
		76	4,98	72,6	5,22			
		82	2,27	75,3	2,35			
88	1,15	78,6	1,18					

B-15AC	Orijinal	52	19,45	70,47	20,64	77	≥1.00	PG 76-Y
		58	10,40	72,48	10,90			
		64	4,86	75,14	5,02			
		70	2,38	77,24	2,44			
		76	1,14	79,82	1,16			
		82	0,55	82,16	0,56			
	Yaşlandırılmış	52	86,10	61,40	98,06	83,7	≥2.20	
		58	43,28	63,57	48,33			
		64	21,16	66,00	23,16			
		70	10,52	69,98	11,20			
		76	5,07	73,52	5,29			
		82	2,51	76,75	2,58			
		88	1,24	80,48	1,26			
B-17AC	Orijinal	52	22,57	72,31	23,69	78	≥1.00	PG 76-Y
		58	10,14	75,64	10,47			
		64	4,77	78,71	4,86			
		70	2,35	81,28	2,38			
		76	1,21	83,3	1,22			
		82	0,65	84,81	0,65			
	Yaşlandırılmış	52	90,15	62,86	101,31	84,4	≥2.20	
		58	45,16	65,44	49,66			
		64	22,48	68,68	24,13			
		70	11,15	72,25	11,70			
		76	5,56	75,8	5,73			
		82	2,80	79,02	2,86			
		88	1,45	81,78	1,46			

Sonuçlar incelendiğinde saf bitümlü bağlayıcının yüksek performans sınıfı PG 64-Y olarak belirlenmiştir. Bağlayıcıdaki katkı oranı arttıkça bitümün sertleştiği ve B-10AC bağlayıcının performans sınıfını 2 sınıf artırarak PG 76-Y olduğu tespit edilmiştir.

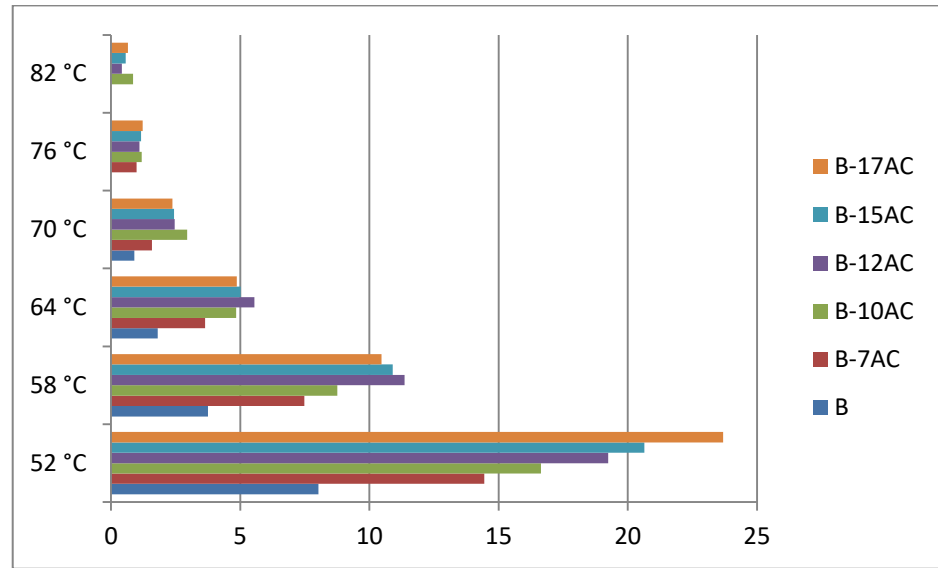


Şekil 5.3 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların orijinal numunelerine ait yenilme sıcaklık değerleri

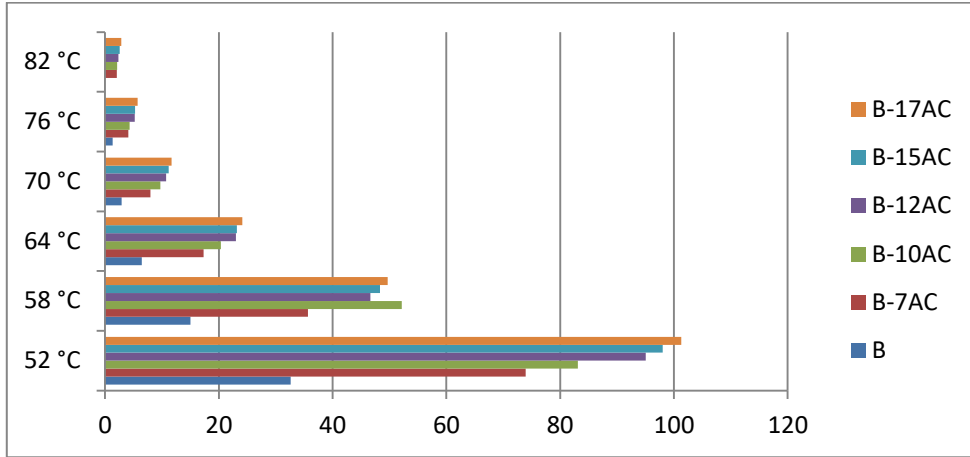


Şekil 5.4 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılmış numunelerine ait yenilme sıcaklık değerleri

Atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilavesinin bitüm üzerinde sağlamış olduğu sertleşme etkisinden başka faz açısı(δ) değerleri incelendiğinde saf bitümlere göre atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlerin daha elastik olduğu görülmektedir. Bu durum yani faz açısının düşmesi bitümün elastik özelliğini artırmakta ve böylece tekerlek izi oluşumunu azaltmaktadır.



Şekil 5.5 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı orijinal bitümlü bağlayıcıların sıcaklık (°C) – tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) ilişkisi

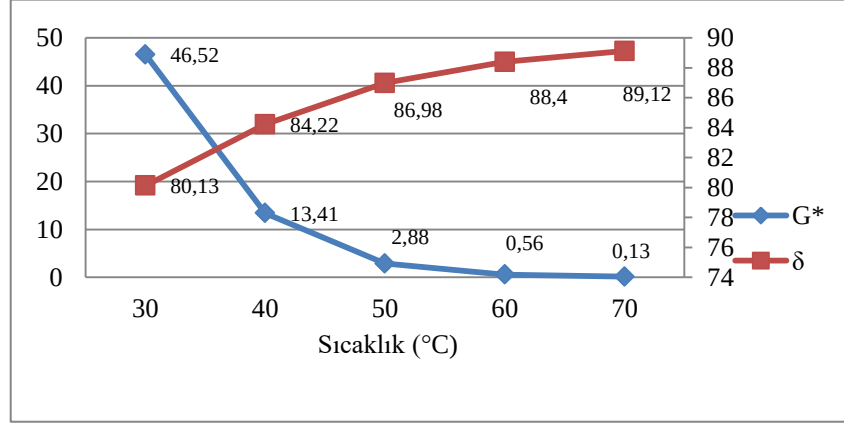


Şekil 5.6 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı RTFO ile yaşlandırılmış bağlayıcıların sıcaklık (°C) – tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) ilişkisi

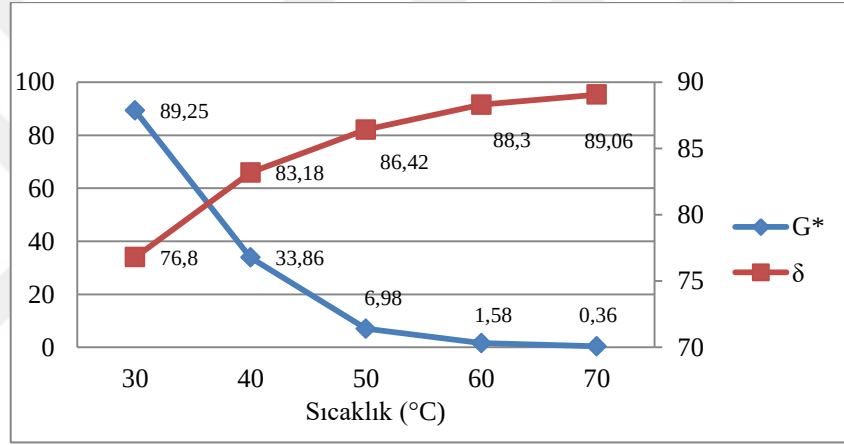
Elde edilen veriler göz önüne alındığında modifiye edilen bitümlü bağlayıcının G^* sonuçlarının eklenen katkı maddesi miktarının artması ile arttığı tespit edilmiştir. Çünkü G^* değeri bağlayıcının uygulanan kayma gerilmelerine karşı direncini gösterir. Bu değer artması bitümün daha az deformasyona uğrayacağı anlamına gelmektedir. Çizelge 5.4’de verilen atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlere ait deney sonuçlarına bakıldığında her 5 katkı oranında da bitüm içerisine dahil edilen katkı miktarının artması ile bitümlerin kompleks kayma modülünde (G^*) yüksek bir artış meydana geldiğini ve bu artışların tekerlek izi parametrelerine ($G^*/\sin\delta$) de tesir ederek bitümlerin yüksek sıcaklık sınıflarının sürekli olarak arttırdığı görülmektedir.

5.5. Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcıların DSR Cihazı İle Farklı Frekans Deney Sonuçlarının İncelenmesi

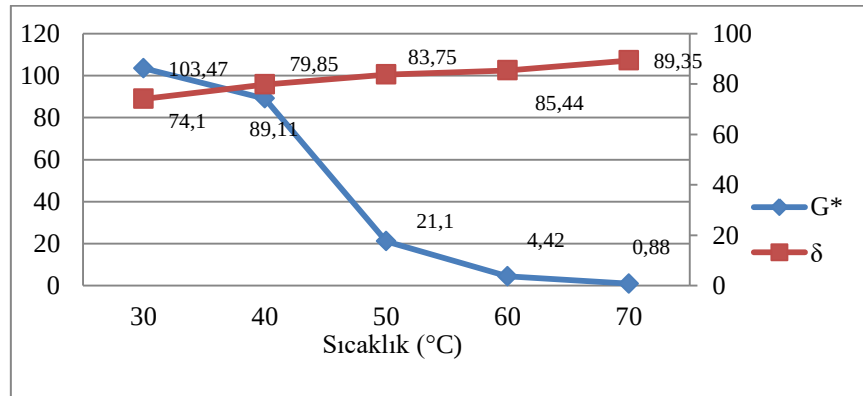
Yapılan çalışmalar bitümün reolojik özelliklerini tespit etmek hedefiyle uygulanmakta olan ileri test yöntemlerinden farklı frekans deneyleri içeriğinde, saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıları için 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, ve 70°C sıcaklıklarda, farklı frekans deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler 10km/sa hıza eşdeğer 1,25 rad/sn, 40 km/sa hıza eşdeğer 5 rad/sn ve 100km/sa hıza eşdeğer 12,5 rad/sn frekanslarında yapılmıştır.



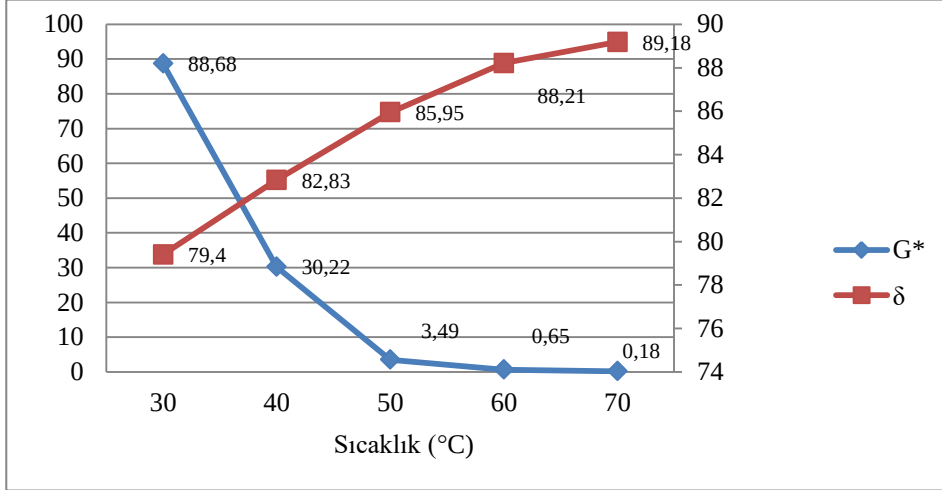
Şekil 5.7 B bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G* ve δ değerleri



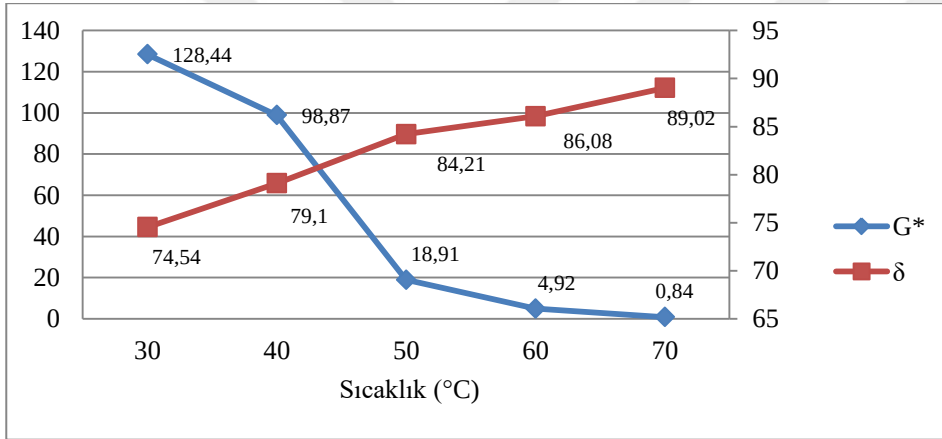
Şekil 5.8 B bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G* ve δ değerleri



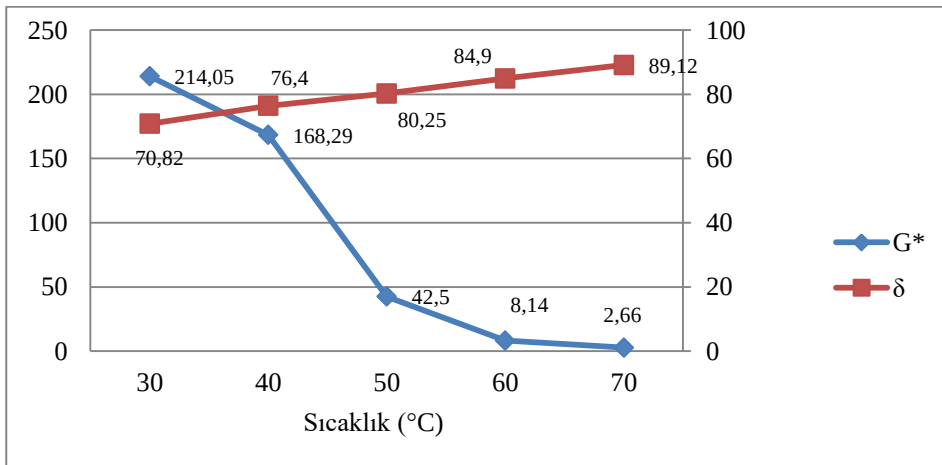
Şekil 5.9 B bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G* ve δ değerleri



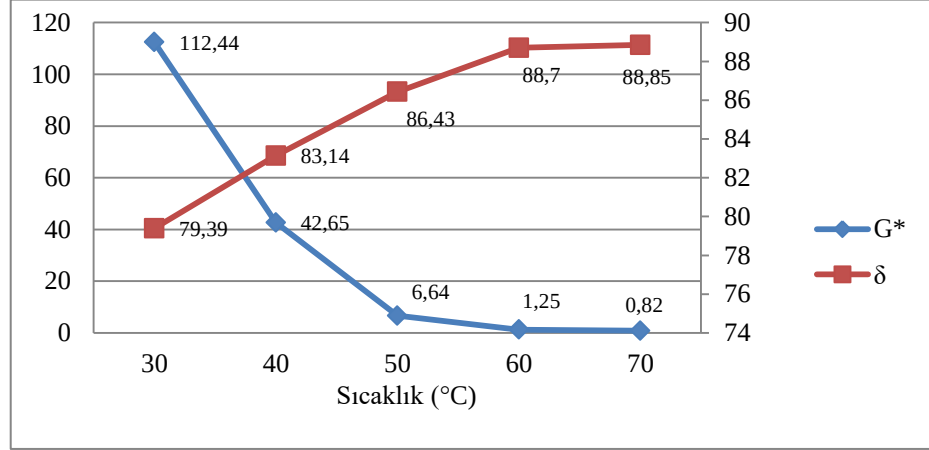
Şekil 5.10 B-7AC bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



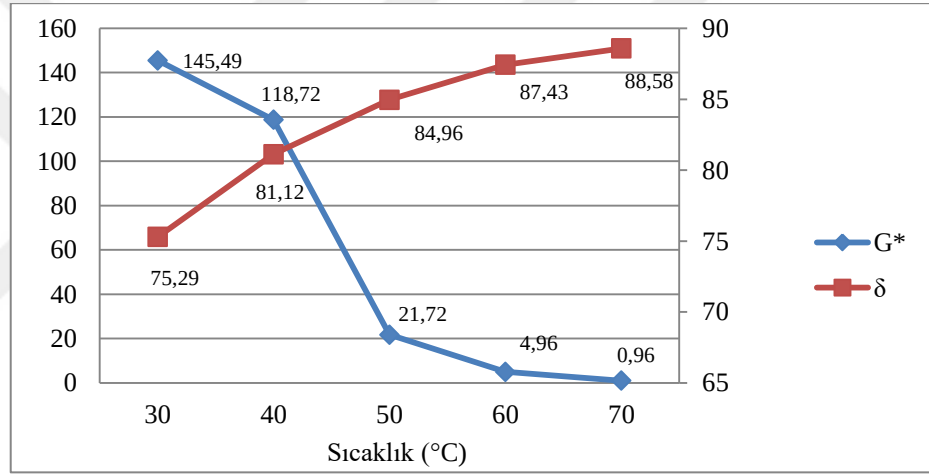
Şekil 5.11 B-7AC bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



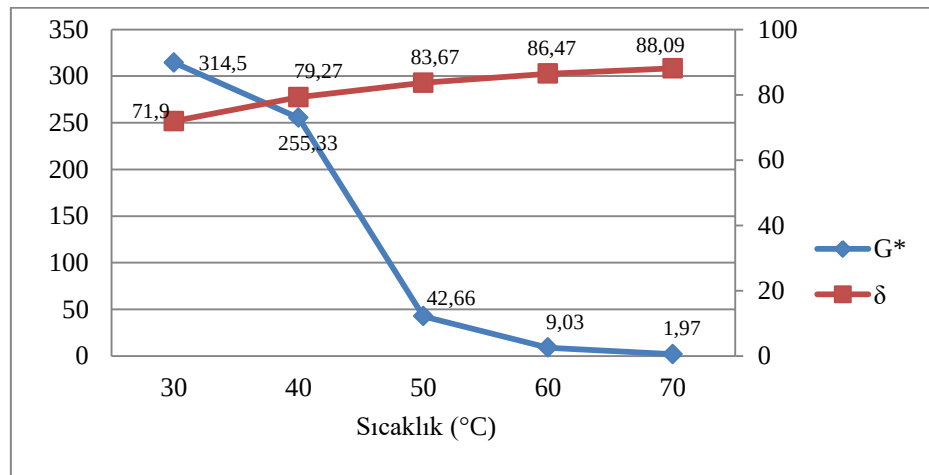
Şekil 5.12 B-7AC bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



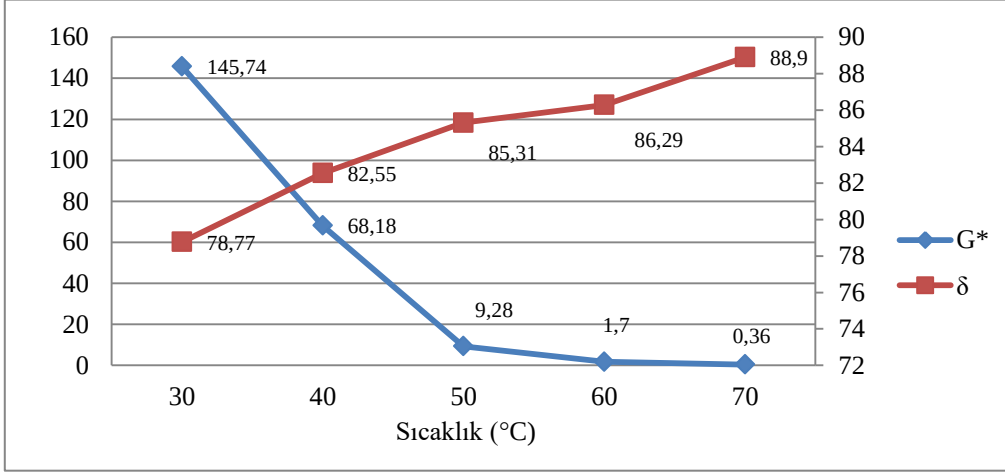
Şekil 5.13 B-10AC bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



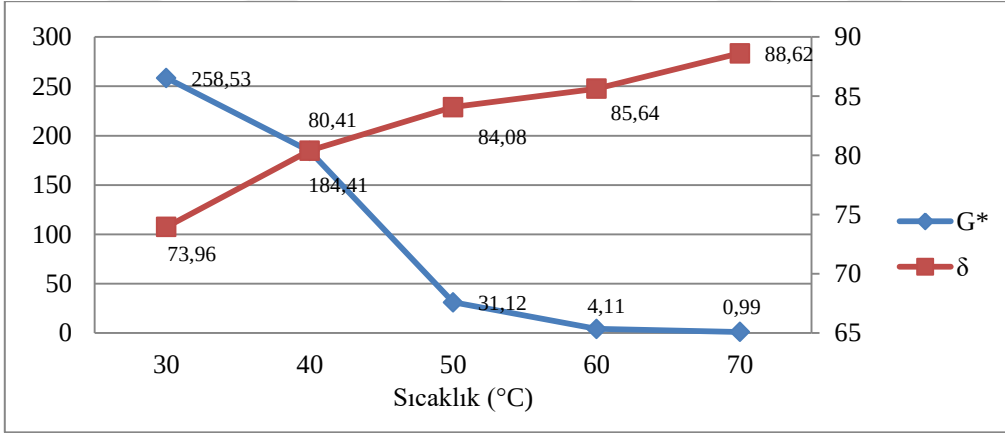
Şekil 5.14 B-10AC bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



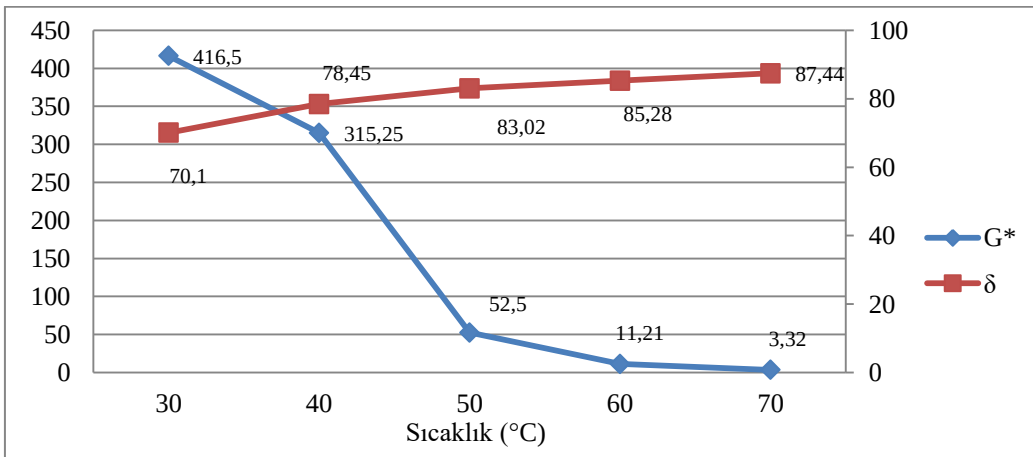
Şekil 5.15 B-10AC bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



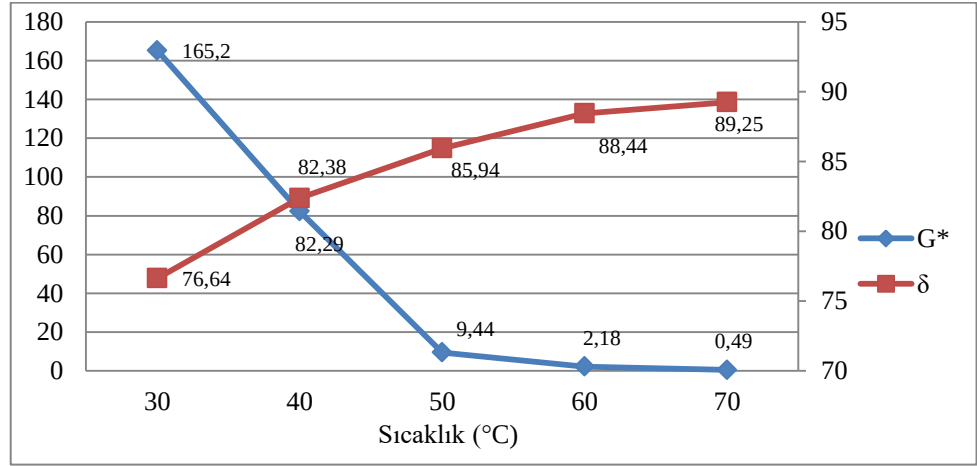
Şekil 5.16 B-12AC bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



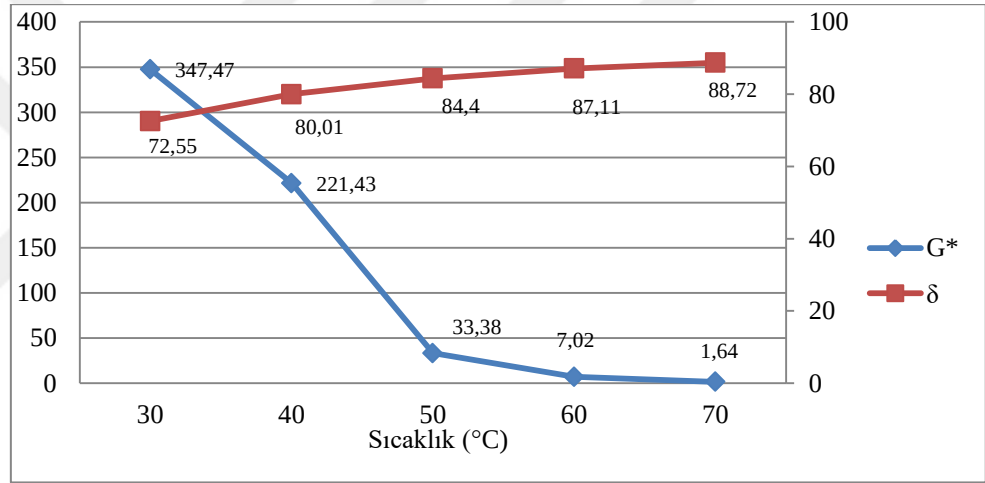
Şekil 5.17 B-12AC bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



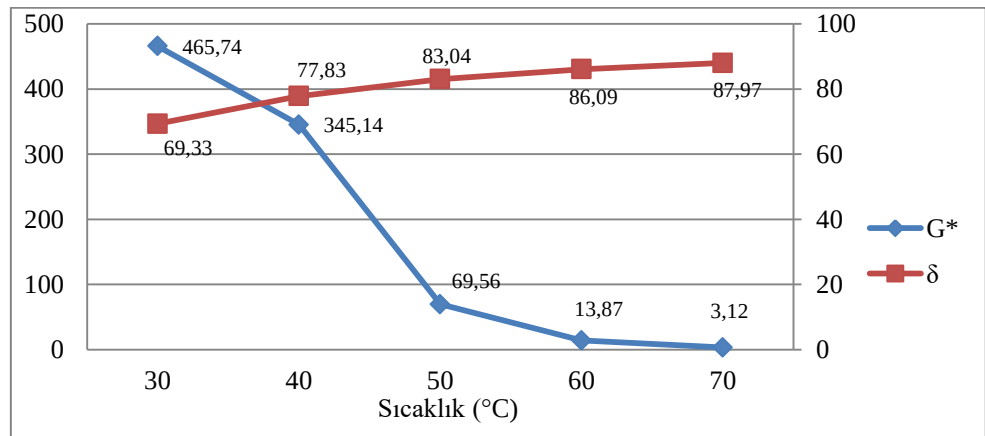
Şekil 5.18 B-12AC bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



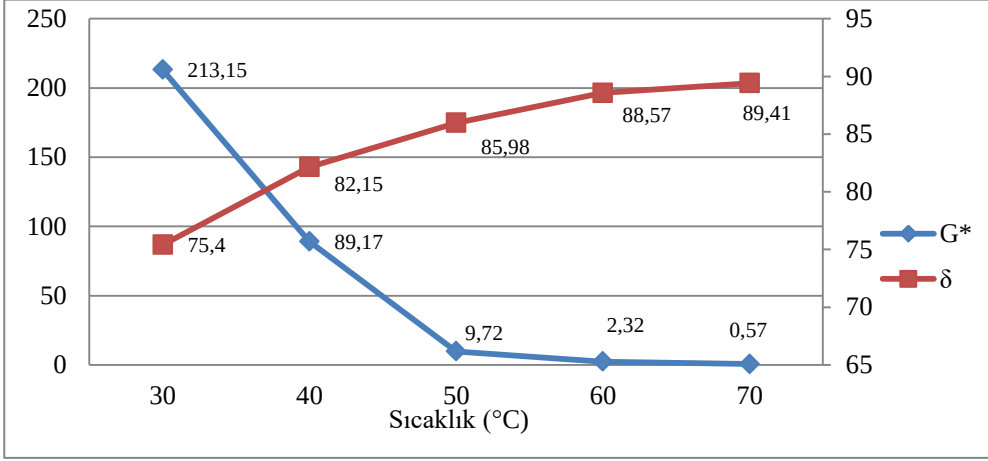
Şekil 5.19 B-15AC bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



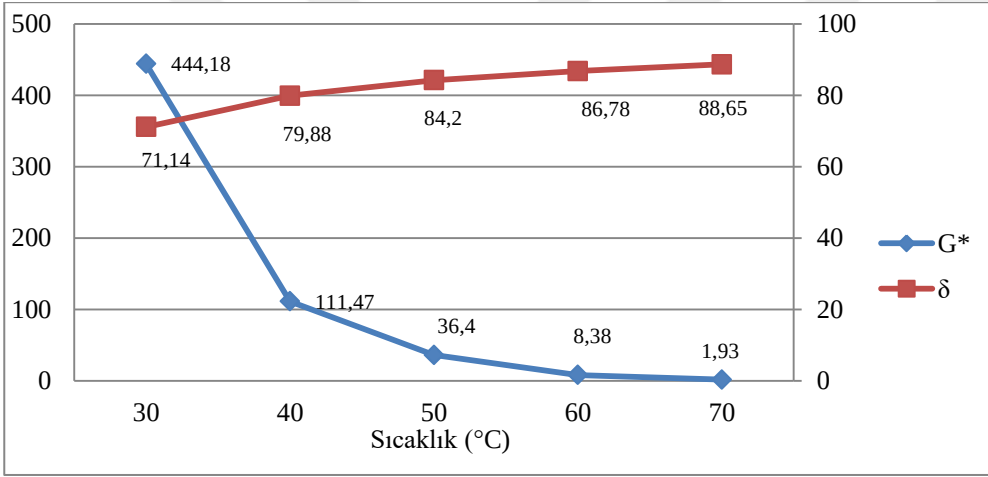
Şekil 5.20 B-15AC bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



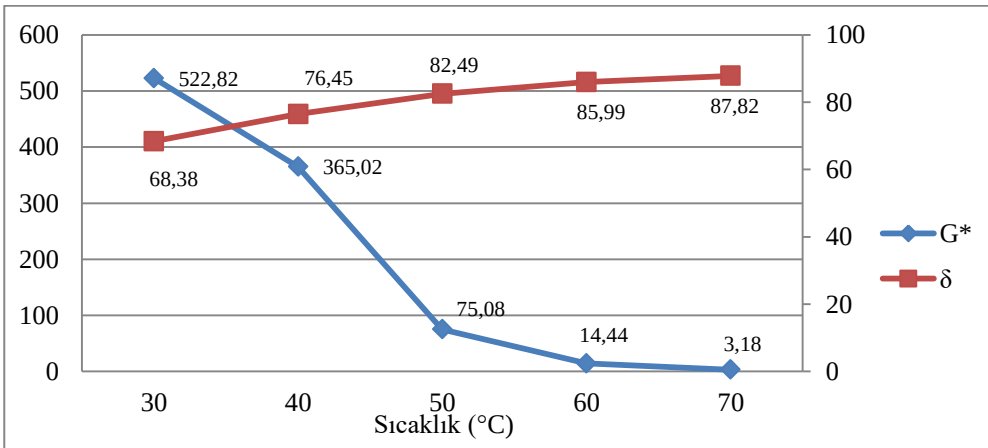
Şekil 5.21 B-15AC bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



Şekil 5.22 B-17AC bağlayıcısının 1,25 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



Şekil 5.23 B-17AC bağlayıcısının 5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri



Şekil 5.24 B-17AC bağlayıcısının 12,5 rad/sn frekansta G^* ve δ değerleri

Yukarıda verilen şekiller incelendiğinde, aynı bitümlü bağlayıcı çeşidi için sabit sıcaklıkta frekans verisi yükseldikçe, yükleme süresi azalır ve bu duruma istinaden kompleks kayma modülü (G^*) sonuçlarının artması ile beraber faz açısı (δ) sonuçlarının da arttığı tespit edilmiştir. Bu değerlerden yola çıkılarak hesaplanan tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerinin arttığı görülmüştür. Bu durum tahmin edildiği gibi uygulanan frekans değeri arttıkça bitüm üzerinde uygulanan yük zamanı azalmakta ve böylece tekerlek izi parametresi değeri ise artmaktadır. Aynı sıcaklık değerleri baz alındığında tüm frekans verilerinde atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bağlayıcıların saf bitümlü bağlayıcıya göre çok daha yüksek G^* verileri elde edildiğini görmekteyiz. Faz açısı(δ) sonuçlarına bakıldığında aynı sıcaklık değerleri için bitümlü bağlayıcı bünyesindeki atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu miktarı arttıkça δ ifadesinin orijinal bitüme göre gitgide düştüğü tespit edilmiştir. Burada, δ değerlerindeki azalma, atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkısının bitümlü bağlayıcıların toplam deformasyonun düşmesi ile oluştuğu tespit edilmiştir. $G^*/\sin\delta$ değerindeki değişim göz önüne alındığında aynı sıcaklıktaki bitüm bünyesindeki atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilavesi arttığında $G^*/\sin\delta$ değerinin de arttığı görülmüştür. 30°C ve 60°C sıcaklık değerlerinde yavaş trafik hızlarına eşdeğer 1.25 rad/sn frekansta yapılan deneyler neticesinde bitümlü bağlayıcı içerisindeki atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu modifiyerinin miktarının yükselmesiyle tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) sonucunun da yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu modifiyerinin bitümün sertlik derecesini artırarak tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımı artırdığının işaretidir.

5.6.Saf ve Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu ile Modifiye Bitümlerin PAV (Basınçlı Yaşlandırma Kabı) Deneyi İle Uzun Vadeli Yaşlandırma Etkilerinin Araştırılması

PAV deneyi, bitümün uzun süreli yaşlanma etkilerini araştırmak için uygulanır. Bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki yorulma performansı için PAV kalıntısı bağlayıcıları üzerinde 16°C, 19°C, 22°C ve 25°C sıcaklıkta yapılan DSR deney sonuçları ile tespit edilir. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre PAV deneyleri ile yaşlandırılan numunelere uygulanan DSR deneyinde bulunan $G^*\sin$

δ değerinin maksimum 5000 kPa olması şartı aranmaktadır. DSR deneylerinden elde edilen yorulma çatlağı ($G^*\sin\delta$) parametreleri ile ilgili değerler Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 PAV kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları

Bağlayıcı		Sıcaklık	G^*	δ	$G^*\sin\delta$	Limit Değerler	Sınıf
		$^{\circ}\text{C}$	(kPa)	($^{\circ}$)	(kPa)	(kPa)	
B	Yaşlandırılmış	25	585,287	45,2	415,302	≤ 5000	PG64-Y
		22	787,541	43,4	541,109		
		19	1021,235	41,8	680,686		
		16	1486,774	40,1	957,666		
B-7AC	Yaşlandırılmış	25	927,216	46,2	669,227	≤ 5000	PG70-Y
		22	1237,872	44,8	872,246		
		19	1678,467	43,2	1148,99		
		16	2084,212	42,4	1405,39		
B-10AC	Yaşlandırılmış	25	1824,109	46,5	1308,65	≤ 5000	PG76-Y
		22	2491,205	44,5	1746,10		
		19	3628,270	43,0	2474,48		
		16	4964,642	40,2	3204,47		
B-12AC	Yaşlandırılmış	25	1884,728	45,7	1348,89	≤ 5000	PG76-Y
		22	2540,008	43,8	1758,05		
		19	3882,965	42,9	2643,22		
		16	5145,602	39,5	3273,01		
B-15AC	Yaşlandırılmış	25	1898,1	44,1	1325,67	≤ 5000	PG76-Y
		22	2610,020	43,2	1786,69		
		19	4424,505	42,2	2972,03		
		16	5247,285	38,8	3287,94		
B-17AC	Yaşlandırılmış	25	1944,582	43,6	1341,02	≤ 5000	PG76-Y
		22	2785,046	42,6	1885,13		
		19	4879,987	41,5	3233,58		
		16	5540,409	38,2	3426,23		

PAV kalıntısı numuneler üzerinde yapılan DSR deneyi sonucunda, G^* kayma modülü değerinin sıcaklık arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Kayma modülü parametresinin azalması bağlayıcının kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği direncin azalması demektir. PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR sonucunda faz açısı değerinin sıcaklıkla arttığı görülmüştür. Faz açısı parametresinin sıcaklıkla artması, bağlayıcının viskoz davranış gösterdiğinin kanıtıdır. Katkı miktarı ve sıcaklık derecesinin yükselmesiyle bitümlü bağlayıcının viskoz bir hareket sergilemesi durumu söz konusudur.

PAV kalıntısı bağlayıcıların Superpave şartnamesine göre $G^*.sin\delta$ değerinin 5000'i geçmemesi istenmektedir. 16, 19, 22 ve 25 °C sıcaklıklarda B-7AC, B-10AC, B-12AC, B-15AC ve B-17AC bağlayıcılarda katkı oranının artmasıyla tekerlek izi parametresi olan $G^*.sin\delta$ değerinin 5000'i geçmediği görülmüştür. Bu verilere dayanarak bağlayıcıların orta sıcaklıklarda yorulma performanslarını olumlu etkilediğini göstermektedir.

5.7 Saf ve Atık Kuru Yeşil Ceviz Kabuğu Tozu ile Modifiye Bitümlerin Çoklu Gerilmeli Sünme Geri Dönme (MSCR) Deneyiyle Elastik Özelliklerinin Tespit Edilmesi

Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılara uygulanan çoklu gerilmeli geri dönüşümlü sünme deneyine (MSCR) ait parametre sonuçları Çizelge 5.6'da gösterildiği gibidir. Bu deneyde kullanılan bitümlü bağlayıcı RTFO deneyi ile kısa süreli yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı örnekleridir. MSCR deneyinde kullanılan bitümlü bağlayıcı numunelerinin reolojik parametrelerinden geri dönmeyen sünme uygunluğu (J_{nr}), elastik geri dönme (R), iki yükleme arasındaki geri dönmeyen sünme uygunluğu farkı ($J_{nr\text{diff}}$) ve iki yükleme arasındaki elastik geri dönme farkı (R_{diff}) ifadelerini test etmek için yapılan bir çalışmadır. Adı geçen bu parametrelerde bulunan değerler aracılığı ile, bilinen Superpave bağlayıcı şartnamesinde mevcut olan yüksek sıcaklık PG sınıflarının tespit edilmesine ek bir alternatif sınıflandırma oluşturulabilmesinin yanı sıra, bitümlü bağlayıcı üzerinde uygulanan modifikasyon işleminin ne derece yararlı olup olmayacağını tespit etmemize yardımcı olur.

Yapılan çalışmalar kapsamında saf bitümün DSR deneyi yardımıyla bulunan yüksek sıcaklık sınıfı 64°C olduğu ve 52°C, 58°C, 70°C ve 76°C deney sıcaklıklardaki MSCR deney sonucu bulunan verilen aşağıda Çizelge 5.6'de görüldüğü gibi J_{nr} , değerlerinin aynı sıcaklıklardaki atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların J_{nr} , değerlerine göre daha yüksek olduğu yapılan deneyler sonucu görülmüştür. Örnek vermek gerekirse, 70°C sıcaklıkta B bitümünün 3,2 kPa yükleme durumundaki J_{nr} değeri: 7,83 kPa, B-7AC katkılı bitümün 3,2 kPa yükleme durumundaki J_{nr} değeri: 4,46 kPa, B-17AC katkılı

bitümün 3,2 kPa yükleme durumundaki J_{nr} değeri ise 0,42 kPa olduğu yapılan deneyler sonucu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.6 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi J_{nr} (kPa-1) değerleri

Bağlayıcı	MSCR deneyi J_{nr} (kPa-1) değerleri											
	Test Sıcaklıkları											
	52		58		64		70		76		82	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B	0,42	0,49	1,16	1,29	3,02	3,24	7,28	7,83	-	-	-	-
B-7AC	0,28	0,30	0,44	0,49	1,62	1,96	3,81	4,46	-	-	-	-
B-10AC	0,19	0,20	0,32	0,36	1,04	1,14	2,08	2,61	6,47	7,08	-	-
B-12AC	0,11	0,12	0,23	0,25	0,71	0,84	1,21	1,67	3,26	3,57	-	-
B-15AC	0,05	0,06	0,13	0,15	0,56	0,69	0,62	0,89	1,56	1,95	-	-
B-17AC	0,02	0,02	0,04	0,04	0,12	0,15	0,32	0,42	0,79	1,09	1,81	2,55

Elastik geri dönmeyi ifade eden R değerleri için Çizelge 5.7 incelendiğinde, saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bağlayıcıların MSCR deneyi sonucu elde edilen veriler arasında gözle görülebilir bir fark bulunmadığından dolayı atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozunun bitümün elastik özelliklerini iyileştirmekten ziyade bitümlü bağlayıcıyı sertleştirdiği görülmüştür.

Çizelge 5.7 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi R(%) değerleri

Bağlayıcı	MSCR deneyi R (%) değerleri											
	Test Sıcaklıkları											
	52		58		64		70		76		82	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B	7,24	4,05	3,96	1,48	1,25	-0,12	-1,27	-2,84	-	-	-	-
B-7AC	16,3	10,14	8,22	3,25	4,12	5,45	2,8	1,45	-	-	-	-
B-10AC	24,42	19,45	11,27	7,38	8,3	9,08	3,44	3,58	5,29	5,15	-	-
B-12AC	36,38	31,8	19,56	16,89	15,05	13,27	5,19	6,12	6,76	4,18	-	-
B-15AC	49,5	44,32	33,02	30,51	24,77	18,11	16,85	8,17	8,33	3,11	-	-
B-17AC	58,25	53,93	49,94	42,97	37,02	25,97	25,41	11,31	16,03	3,26	8,9	0,14

MSCR deney çerçevesinde 0,1 kPa ve 3,2 kPa olmak üzere iki farklı kayma gerilmesi ifadesi uygulanmaktadır. Kaplamanın servis ömrü boyunca çeşitli trafik yükleri ile yüzleşecek olan bitümlü bağlayıcıların göstereceği tepkilerin çeşitli yükler altında nasıl davranacağı durumu birbirinden farklı iki kayma gerilmesinin kullanılmasının temel sebebidir. Adı geçen sebepten dolayı iki çeşit gerilmeyle karşı karşıya kalan bitümlü bağlayıcı numunelerin J_{nr} değerleri ve R değerlerinin birbirinden çok da uzak olmaması gerekmektedir. Bu sebeptendir ki, MSCR parametrik değerleri birbirinden çeşitli iki kayma gerilmesinde, birbirine yakın olan bitümlü bağlayıcının asfalt kaplamanın uygulama performanslarının sonuçlarını daha net bulmamıza yardımcı olur. Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilaveli bağlayıcıların $J_{nr,diff}$ ve R_{diff} değerleri göz önüne alındığında, bitümlü bağlayıcı numunelerinin MSCR parametrik değerleri arasındaki farkın sınır değerleri arasında kaldığı tespit edilmiştir.

MSCR deneyinde sıcaklığın artmasıyla beraber $J_{nr,diff}$ ve R_{diff} değerlerinin de arttığı Çizelge 5.8’de görülmektedir. Sonuçlar göz önüne alındığında, sıcaklık değerinin artması ile bitümlü bağlayıcıların mukavemet değerlerinin hemen azalması ile bitümlü bağlayıcı üzerine uygulanan trafik yüklerine karşı duyarlılığın arttığını göstermektedir. MSCR deneyi ile ilgili olan PG şartnamesine göz önüne alındığında $J_{nr,diff}$ ifadesinin %75 oranını geçmemesi söz konusudur. Bu

sonuçlardan yola çıkıldığı takdirde, sadece saf bağlayıcı değil aynı zamanda atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılar için de bütün sıcaklık değerlerinde bu şartı yerine getirmiştir.

Çizelge 5.8 Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi $J_{nr,diff}$ (%) ve R_{diff} (%) değerleri

Bağlayıcı	MSCR deneyi $J_{nr,diff}$ (%) ve R_{diff} (%) değerleri											
	Test Sıcaklıkları											
	52		58		64		70		76		82	
	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}
B	6,42	55,3	6,84	121	7,15	-782,5	7,5	-27,4	-	-	-	-
B-7AC	18,15	54,42	8,83	96,5	31,23	214,2	13,27	347,6	-	-	-	-
B-10AC	14,32	28,4	7,1	69,9	29,15	107,1	10,11	314,1	9,37	-98,6	-	-
B-12AC	12,05	13,01	9,14	50,33	17,72	97,6	10,07	222,4	11,82	578	-	-
B-15AC	11,56	11,24	11,63	60,7	25,72	78,5	9,25	142,2	14,47	402	-	-
B-17AC	10,44	7,41	13,55	13,96	22,29	29,86	32,44	55,47	38,21	79,79	40,83	98,45

6. BULGULAR

Yapılan tez çalışması kapsamında saf 50/70 penetrasyonlu bitüme %7, %10, %12, %15 ve %17 oranında atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilaveleri ile 5 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışım numunelere geleneksel test yöntemleri uygulandıktan sonra Superpave bağlayıcı kapsamındaki testler de uygulanmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen verilerden yola çıkarak bulmuş olduğum neticeler aşağıdaki gibidir.

Karışım numuneleri hazırlandıktan sonra saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümler üzerinde geleneksel test yöntemleri olan penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozunun bitümü sertleştirdiği tespit edilmiştir. Bitüm içerisine ilave edilen atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu miktarı arttıkça bitümün sertliğinin daha da arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin B bitümün penetrasyonu 62 dmm iken B-7AC katkılı bitümün penetrasyonu 49 dmm B-17AC katkılı bitümün penetrasyonu 45 dmm olarak ölçülmüştür. Bu durum atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilavesinin bitümü sertleştirdiğini ortaya koymaktadır. Adı geçen bağlayıcı çeşitlerine ait ısı duyarlılığını ifade eden PI sonuçları göz önüne alındığında saf bitümün PI sonucu -2,67 iken B-17AC bitümünün PI değeri -2,60 olarak ölçülmüş olup %17 katkı oranındaki numunenin ısıya karşı duyarlı olmadığı ve ısı hassasiyeti açısından bu iki bağlayıcı türünün benzer olduğu görülmüştür. Ancak bu durum B-7AC için -1,55, B-10AC için -2,17, B-12AC için -1,82 ve B-15AC için -1,87 olduğu tespit edilmiş olup bu katkıların ısıya karşı hassasiyetinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkı oranı arttıkça bitümün yumuşama noktasının arttığı ve bitümde bu suretle sertleşme meydana geldiği görülmektedir.

Saf ve modifiye edilmiş bitümler üzerinde gerçekleştirilen RTFO deneyi uygulamasından sonra tespit edilen kütle kayıplarının şartname sınırları (max %1) içerisinde kaldığı görülmüştür. Ancak yapılan ölçümler sonucunda bitüm içerisine katılan atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu miktarı arttıkça bitümlü bağlayıcı numunelerinde kütle kayıpları devamlı artmıştır. Örneğin B bitümünün kütle kaybı değeri 0,18 iken B-7AC bitüm numunesinin kütle kaybı 0,28, B-17AC bitüm numunesinin kütle kaybı değeri 0,38 olarak ölçülmüştür. Bu durum atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katıldıkça bitüm bünyesindeki hafif olan moleküllerin buharlaşma oranını biraz artırdığını ifade etmektedir.

Saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilaveli bitümler üzerinde gerçekleştirilen Dönel Viskozite (RV) deneyi sonuçları incelendiğinde atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilavesinin 135°C ve 165°C'deki viskozite değerlerini artırdığı görülmüştür. Bu durum bitümlerin atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilavesinin bitümü daha kıvamlı bir hale dönüştüğünün göstergesidir. Dönel viskozite deneyi sonucunda elde edilen bu bilgiler penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi sonuçlarında elde edilen bilgileri doğrulamaktadır.

Saf bağlayıcı numuneye sahip bitümler ile atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilaveli bitümler üzerinde yapılan DSR deneyleri sonucunda atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilavesinin, $G^*/\sin\delta$ (tekerlek izi parametresi), G^* (kompleks kayma modülü) değerini ve δ (faz açısı) değerini artırdığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilavesi ile saf bitümlerin yüksek sıcaklık (PG) sınıflarında artışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Buna göre orijinal bitümün yüksek sıcaklık sınıfı (PG 64-Y) iken B-7AC atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilavesi bitümün yüksek sıcaklık sınıfı (PG 70-Y) değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde B-10AC ile B-12AC bitümün yüksek sıcaklık sınıfı (PG 76-Y) değerine yükselmiştir. Benzer durum B-15AC ve B-17AC bitümler içinde geçerlidir.

Orijinal (yaşlandırılmamış) bitümlü bağlayıcılar üzerinde düşük trafik hızlarına eşdeğer 1,25 rad/sn, orta trafik hızlarına eşdeğer 5 rad/sn ve yüksek trafik hızlarına eşdeğer 12,5 rad/sn frekans değerlerinde saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıları için 30°C, 40°C, 50°C, 60°C ve

70°C sıcaklıklarda DSR farklı frekans deneyleri gerçekleştirilmiştir. DSR farklı frekans deneylerinde atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkısı ile modifiye edilmiş bağlayıcıların düşük, orta ve yüksek trafik hızlarında saf bitüme göre daha iyi performans gösterdiği saptanmıştır. Buna göre atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıları saf bitüme göre kompleks kayma modülü (G^*) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerlerinin daha yüksek, faz açısı (δ) değerinin ise düştüğü tespit edilmiştir.

RTFO deneyi ile kısa süreli yaşlanmaya maruz bırakılan bitümlü bağlayıcılar gerekli deneylerinin tamamlanmasından sonra servis ömürleri boyunca maruz kalacakları trafik yükleri ve iklim koşullarına karşı gösterecekleri dayanımı belirlemek amacıyla PAV ile yaşlandırılma işlemine tabi tutulmuştur. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre PAV ile yaşlandırma sonrası DSR deneyinde yorulma çatlağı parametresi ($G^*\sin\delta$) değerinin 5000 kPa'ı geçmemesi istenir. PAV ile yaşlandırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilen DSR deneyleri sonucunda sıcaklığın artması ile beraber yorulma çatlağı parametresi ($G^*\sin\delta$) ve kompleks kayma modülü (G^*) değerlerinin azaldığı, ancak faz açısı (δ) değerinin arttığı tespit edilmiştir. Kayma modülü parametresinin azalması, bağlayıcının kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği direncin azalması demektir. Faz açısı parametresinin sıcaklıkla artması, bağlayıcının viskoz davranış gösterdiğinin kanıtıdır. Katılan modifiyer oranı ve sıcaklık arttıkça bitümlü bağlayıcıların daha çok viskoz davranış sergilediği ve kalıcı deformasyonlara karşı direncinin azalması söz konusudur.

Bitüm içerisindeki atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu miktarı arttıktan sonra yorulma çatlağı parametresi ($G^*\sin\delta$) değerinin arttığı görülmüştür. Bu durum atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilavesinin bitümün yorulma çatlağı üzerinde olumsuz etkisi olduğunu kanıtlar bir nitelik taşımaktadır.

Ancak 16, 19, 22 ve 25°C sıcaklıklarda B-7AC, B-10AC, B-12AC, B-15AC ve B-17AC bağlayıcılarda katkı oranının artmasıyla yorulma çatlağı parametresi olan $G^*\sin\delta$ değerinin 5000'i geçmediği görülmüştür. Bu verilere dayanarak bağlayıcıların orta sıcaklıklarda yorulma performanslarını olumlu etkilediğini

göstermektedir.

Yapılmış olan deneysel çalışmalarda modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin test edilmesi işlemi için MSCR deneyi uygulanmıştır. Bu deney sayesinde saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların J_{nr} yüksek sıcaklık altında bitümde meydana gelecek olan kalıcı deformasyon miktarını gösteren ifade olarak J_{nr} ifadesi, bitümlü bağlayıcıların elastik özelliğini ifade eden R ifadesi, $J_{nr,diff}$ (%) ve R_{diff} (%) değerleri belirlenmiştir. J_{nr} (kPa-1) ifadelerine bakıldığında, saf bitümün J_{nr} (kPa-1) değerlerinin atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlerin J_{nr} (kPa-1) değerinden büyük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç böyle tespit edildiği için atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bağlayıcılar ile inşa edilen yol esnek üstyapılarda tekrarlı yükler altında saf bitüme göre daha az kalıcı deformasyon oluşması beklenmektedir. R ifadesi göz önüne alındığında saf ve atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcılar için bu ifadelerin birbirlerine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bunların yanı sıra yapılan deneysel çalışmalarda hiçbir bitümlü bağlayıcı numunesinde $J_{nr,diff}$ ifadesi MSCR deneyindeki PG şartnamesinde bulunan %75 oranını geçmediği görülmüştür.

7. SONUÇLAR

Yapılan tez çalışmasının bu aşamasında saf ve atık kuru yeşil kabuğu tozu katkılı bitümler ile ilgili gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar bu bölümde ifade edilmektedir.

Atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu ilavesinin saf bitüm içerisindeki oranının artmasıyla birlikte bitümün sertliğinin de benzer bir oranda arttığı uygulanan deneyler sonucu tespit edilmiştir.

Çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen Dönel Viskozite (RV) deneyleri neticesinde geleneksel test yöntemleri ile ulaşılan sonuçları destekleyen verilere ulaşılmıştır. Bitümün içerisine ilave edilen atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu miktarı arttıkça bitümlü bağlayıcıların viskozitesinin de arttığı görülmüştür.

Bitüm numuneleri üzerine uygulanan DSR deneyleri sonucunda saf bitüme göre atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcı numunelerinin yüksek sıcaklık sınıflarının yani PG sınıflarının arttığı gözlemlenmiştir.

RTFO sonrası kütle kaybının belirlenmiş olan maksimum sınırı aşmadığı görülmüştür.

PAV sonrası yapılan DSR ve farklı trafik iklim ve trafik koşulları altındaki performanslarını saptamak için yapılan DSR sonuçları göz önüne alındığında özellikle orta sıcaklıklarda yorulma çatlağını azaltmasının yanı sıra olumlu performanslar gösterdiği tespit edilmiştir.

MSCR deney sonuçlarına göre atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcıların saf bitüme göre daha sert olduğu ve kalıcı deformasyon oranının azalacağı yönünde bulgular yapılmış olan deneylerle tespit edilmiştir.

Atık kuru yeşil ceviz kabuğu tozunun bitümlü bağlayıcıya %10 ile %17 aralığındaki bir oranla ilave edildiği takdirde 2 PG-Y sınıfı kadar artırmış olduğu verisi, uygulanan deneysel çalışmalar sonucunda ulaşılmıştır.

Atık kuru yeşil ceviz kabuğunun atık bir madde olması, ülkemizde geniş bir üretim ağına sahip olması, sadece işleme ve taşıma masrafı olmasından kaynaklı bitümlü sıcak karışımlarda tercih edilebilecek bir modifiyer olarak tercih edilmesi durumu söz konusu olabilmektedir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- AASHTO T 315**, 2012, Standard Method Of Test For Determining The Rheological Properties Of Asphalt Binder Using A Dynamic Shear Rheometer (DSR), USA, 33p.
- AASHTO TP 70**, 2013, Standard Method Of Test For Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test Of Asphalt Binder Using A Dynamic Shear Rheometer (DSR), USA, 7p.
- AASHTO MP 19-10**, 2010, Standard Specification for Performance-Grade Asphalt Binder using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. AASHTO Designation: Washington D.C.
- Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T.**, 2007. Siyah Karbonun Asfalt Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi,25:2, 179-189.
- Airey, G. D.**,2002, Rheological evaluation of Ethylene Vinyl Acetate polymermodified bitumens, Construction and Building Materials, 16(8): 473-487 pp.
- Al, A., Yi-qiu, T., Hameed, A.T.**, 2011. Starch as a modifier for asphalt paving materials, Construction and Building Materials, 25,14-20.
- Al-Mansob, R.A., Ismail, A., Alduri, A.N., Azhari, C.H.,Karim, M.R., Yusoff, N.I.Md.**, 2014. Physical And Rheological Properties Of Epoxidized Natural Rubber Modified Bitumens, Construction and Building Materials, 63, 242-248.
- Altaş, Ö.Y.**, 2002, Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 150s.
- Alqudah, O.**, 2016, Antioksidan Katkıların Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri ve Yaşlanma Davranışları Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Anonim**, 2002, Asfalt El Kitabı, İstanbul.
- Asfalt ve Uygulamaları**, 2001. İSFALT Bilimsel Yayınları, No:1, İstanbul, 280 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ASTM D2872**, 2012, Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), ASTM International, West Conshohocken, PA, 6p.
- ASTM D4402**, 2015, Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 4p.
- Avcı, E.**, 2009, Sıcak İklimli Bölgelerde Kullanılan Asfalt Betonu Karışım Değişkenlerinin Kaplama Tabakası Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Balta, İ.**, 2004, Bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 51-52.
- Berkers, R.F.A.**, 2005, Influence of Chemical Composition on the Performance of Bitumen, Master's Degree in Technology Engineering, Department of Civil Engineering, Tswane University of Technology, 172p.
- Caro, S., Vega, N., Husserl, J., Alvarez, A.E.**, 2016 . Studying the impact of biomodifiers produced from agroindustrial wastes on asphalt binders, Construction and Building Materials, 126, 369-380.
- Chebil, S., Chaala, A., Roy, C.**, 2000, Use of softwood bark charcoal as a modifier for road bitumen, Fuel, 79, 671-683.
- Choquet, F.**, 1994, Polymers and modified binders. Brussel: Belgian Road Research Center Publishing.
- Cominsky, R.J. et al.**, 1994, The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays, SHRP-A-407, National Research Council, Washington, D.C., 184p.
- Çubuk, M.**, 2007, Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dinç, E.**, 1999, Performans Sınıfı Asfaltlar, Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyleri, T.C.K.16. Bölge Müdürlüğü, Sivas.
- Erkens, S., Porot, L., Glaser, R., and Glover, C. J.**, 2016, Aging of Bitumen and Asphalt Concrete: Comparing State of the Practice and Ongoing Developments in the United States and Europe. In TRB 95th Annual Meeting Compendium of Papers, Washington, pp. 1-12.
- Federal Highway Administration (FHWA)**, 2011, The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure, FHWA-HIF-11-038, USA, 9p.
- Filya, İ., Hanoğlu, H., Canbolat, Ö., Sucu E.**, 2006, Kurutulmuş Prinanın Yem Değeri ve Kuzu Besisinde Kullanılma Üzerinde Araştırmalar. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 20:1, 13-23.
- Fitzgerald, R.L.**, 2000, Novel Applications of Carbon Fiber for Hot Mix Asphalt Reinforcement and Carbon-Carbon Preforms, The Degree of Master of Science in Chemical Engineering, Michigan Technological University, 70p.
- Geçkil, T.**, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2008.
- Günay, T.**, 2016, Nano Malzemelerin Bitümlü Bağlayıcılarda Katkı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Güngör, A. ve Sağlık, A.**, 2008, “Türkiye bitümlerinin performans sınıflarının belirlenmesi”, 1. Karayolu kongresi, Ankara, 185-194 s.
- Güngör, A., G., Sağlık, A., Orhan, F. ve Öztürk, E., A.**, 2009, Polimer Modifiye Bitümlerin Superpave Performans Sınıflarının Belirlenmesi, 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara.
- Isacsson, U. and Huayeng, Z.**, 1997, Relationships Between Bitumen Chemistry And Low Temperature Behaviour Of Asphalt, Construction And Building Materials, Vol. 11, No.2, 83-91 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karayolları Genel Müdürlüğü**, 2013, Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara.
- Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Quintus, H.V. and Moulthrop, J.S.**, 1994, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC, 170p.
- Kırbaş, H.**, 1999, Asfalt kaplamalarda bozulma sebepleri ve oluşan yüzeysel soyulmalar ile çatlakların modern malzemelerle onarım yöntemleri, Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, Kütahya, 3-5.
- Król, J., Radziszewski, P. and Kowalski, K. J.**, 2015, Influence of microstructural behavior on multiple stress creep recovery (MSCR) in modified bitumen, *Procedia Engineering*, 111: 478-484 pp.
- Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M.**, 2004, Sathi kaplamalarda kasma olayına etki eden faktörler, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 141-148.
- Kuloğlu, N., ve ark.**, 2008, Farklı Penetrasyon Derecelerine Sahip Asfalt Çimentolarının Kalıcı Deformasyona Karşı Dayanımlarının ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi.
- Likitlersuang, S. And Chompoorat, T.**, 2016. Laboratory Investigation Of The Performances of Cement And Fly Ash Modified Asphalt Concrete Mixtures, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9, 337-344.
- McGennis, R.B., Shuler, S. and Bahia, H.U.**, 1994, Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, *Asphalt Institute*, Lexington, KY, 104p.
- Mezger, T. G.**, 2011, The Rheology Handbook: For Users of Rotational and Oscillatory Rheometers, Vincentz Network, Germany, 432 pp.
- Mistry, R. ve Roy, T.K.**, 2016. Effect of Using Fly Ash As Alternative Filler in Hot Mix Asphalt, *Perspectives in Science*, 8, 307-309.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)**, 2010, Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt, Report 648, Washington, 157 p
- Orhan, F.**,2005, Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara, 10-24 s.
- Önal, M. A. ve Kahramangil M.**,1993, Bitümlü Karışımlar Laboratuar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 200s.
- Öner, J.**, 2016, Farklı Vaks Türleri ile Üretilen Bitümlerin Reolojik Özelliklerinin Asfalt Betonu Performansı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Petersen, J.C. et.al.**, 1994, Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, SHRP-A-370, *Strategic Highway Research Program National Research Council*, Washington, D.C., 197p.
- Portugal, A.C., Lucena, L.C., Lucena, A.E., Costa, D.B., Lima, K.A.**, 2017. Rheological properties of asphalt binders prepared with maize oil, *Construction and Building Materials*, 152, 1015-1026.
- Read, J. and Whiteoak, D.**, 2003, *The Shell Bitumen Handbook*, Thomas Telford, London, 460 p.
- Sağlık,A.**,2009,Türkiye’de üretilen rafineri bitümlerinin karayolu üst yapılarında kullanımı için performans sınıflarının belirlenmesi, yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sağlık, A. ve Güngör, G.A.**, 2006, Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi, KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Sargın, Ş., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., Terzi, S.**, 2013. Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete, *Construction and Building Materials*, 48, 390-397.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Shahabadi, A., Shokuhfar, A. and Ebrahimi-Nejad, S.,** 2010, Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles, *Construction and Building Materials*, 24(7): 1239-1244 pp.
- Sharma, V., Chandra, S., & Choudhary, R.,** 2010, Characterization of fly ash bituminous concrete mixes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22:12, 1209-1216.
- Shell Bitüm El Kitabı,** 2004, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, İstanbul, 334s
- Taşcı, A.,**2010, Piroлиз edilmiş atık lastiklerden elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının reolojik özellikleri, Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Torun, S.,**2015, Bitümlü Sıcak Karışımlarda Katkı Maddesi Olarak Pr Plast S Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi.
- TS EN 1426,** 2015, Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar – İğne batma derinliğitayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 16 s.
- TS EN 1427,**2015, Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini– Halka ve bilye yöntemi,Türk Standartları Enstitüsü,Ankara,20s.
- Tunç, A.,** 2004, Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı, *Asil Yayın Dağıtım*, Ankara, 352s.
- Tunç, A.,**2001, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.
- Tunç, A.,**2007, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayın Dağıtım,Ankara.
- Umar, F. ve Ağar, E.,**1982, Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 236s.
- Uncu, D.,**2017, Polimer Modifiye Bitüm Özelliklerinin Nanomalzemeler Kullanılarak İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Seloğlu, M.,** 2015, Reaktif Terpolimerin Bitümlü Sıcak Karışım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Üstümkol, F.N ve Turabi, A.,** 2009. Endüstriyel Atıkların Karayolu Üstyapısında Değerlendirilmesi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,11:1,15-27.
- Yelken, F.,** 2009 Belen-Topboğazı (Hatay) Arası Yol Yapım Çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi.
- Yılmaz M.,** 2011, Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi.
- Zaniewski, J.P. and Pumphrey, M.E.,** 2004, Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, West Virginia University, Morgan Town, 109p.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımın her aşamasında çok fazla emeği bulunan tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Taylan GÜNEY'a ve tezimin tamamlanmasında maddi ve manevi desteği benden hiçbir zaman esirgemeyen her zaman yanımda olan ailem ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.



ÖZGEÇMİŞ

Tekin ERTAŞ lisans eğitimini 2016 yılında Şırnak Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. 2020 yılından itibaren Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Yüksek Lisans çalışmalarını Ulaştırma Ana Bilim Dalında, bitümlü malzemeler, bitüm modifikasyonu ve yol esnek üstyapıları üzerine yapmaktadır.

