

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BİTKİSEL ATIK YAĞ KATKISININ SBS MODİFİYELİ BİTÜMÜN FİZİKSEL VE REOLOJİK  
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Erman ÇAVDAR**

**HAZİRAN 2019  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BİTKİSEL ATIK YAĞ KATKISININ SBS MODİFİYELİ BİTÜMÜN FİZİKSEL VE  
REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Erman ÇAVDAR**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 / 05 / 2019**

**Tezin Savunma Tarihi : 17 / 06 / 2019**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şeref ORUÇ**

**Trabzon 2019**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Erman ÇAVDAR Tarafından Hazırlanan**

**BİTKİSEL ATIK YAĞ KATKISININ SBS MODİFİYELİ BİTÜMÜN FİZİKSEL VE  
REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

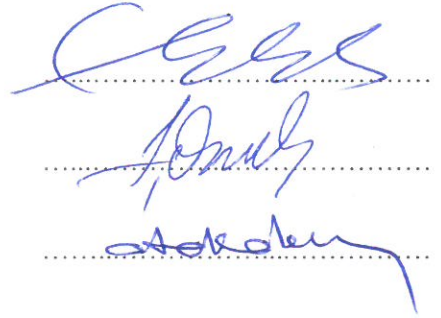
başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 21 / 05 / 2019 gün ve 1805 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK**

**Üye : Prof. Dr. Şeref ORUÇ**

**Üye : Prof. Dr. Atakan AKSOY**



**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU  
Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve tez aşamasında, tez konumu öneren, çalışmalarında beni destekleyen ve yardımını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Şeref ORUÇ'a teşekkürlerimi borç bilir, saygılarımı sunarım.

Tez sürecimde bilgi ve tecrübesiyle her zaman yardımcı olan özellikle laboratuvar aşamasında yardım ve desteklerinden ötürü Arş. Gör. Merve Gülfer ÖZCAN ve Dr. Öğr. Üyesi Bahadır YILMAZ'a teşekkür ederim.

Malzeme temini konusunda, İSFALT A.Ş. Şantiye Şefi Hakan Beye, bu süreçte malzemelerin ulaştırılması hususunda tüm desteğini ve yardımını benden esirgemeyen yakın arkadaşım ve dostum İnş. Müh. Umut Can HOCAOĞLU'na ayrıca teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimine birlikte başladığım, lisans hayatım boyunca birlikte çalıştığım yakın arkadaşım Arş. Gör. Zafer KURT'a tez sürecimde yanımda olduğu için, desteklerinden ve yardımlarından ötürü Mimar Ayşegül ÇELENK'e ve tüm bu süreçte desteklerini, yardımlarını esirgemeyen değerli meslektaşlarım Arş. Gör. Mehmet Tevfik SEFEROĞLU'na, Arş. Gör. Aytuğ KUMANDAŞ'a, Arş. Gör. Memduh NAS'a, Arş. Gör. Safa NAYIR'a teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca benimle olan, bugünlere gelmemi sağlayan, maddi ve manevi tüm desteğiyle arkamda olan değerli ailem, babam Nurettin ÇAVDAR, annem Aycan ÇAVDAR, kardeşlerim Ertan ve Aydan ÇAVDAR'a minnet ve şükranlarımı sunar ve sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Erman ÇAVDAR

Trabzon 2019

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bitkisel Atık Yağ Katkısının SBS Modifiyeli Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şeref ORUÇ’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarında yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 17/06/2019

Erman ÇAVDAR

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Konunun Özgeçmişi .....	2
1.3. Karayolu ve Karayolu Üstyapıları .....	9
1.3.1. Rijit Üstyapı.....	9
1.3.2. Esnek Üstyapı .....	10
1.4. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK).....	11
1.4.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Türkiye’deki Uygulamaları .....	13
1.4.2. Bitümlü Sıcak Karışım Kusurları .....	14
1.4.2.1. Deformasyonlar .....	14
1.4.2.1.1. Tekerlek İzi.....	15
1.4.2.1.2. Bölgesel Çökme (Oturmalar).....	16
1.4.2.1.3. Ondülasyonlar.....	17
1.4.2.2. Çatlamlar.....	18
1.4.2.3. Ayrışmalar .....	21
1.5. Bitüm .....	21
1.5.1. Bitümün Kimyasal Bileşenleri.....	22
1.5.2. Bitümün Reolojik Yapısı .....	22
1.6. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler.....	23
1.6.1. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler.....	23
1.6.1.1. Penetrasyon Deneyi .....	23
1.6.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi .....	24

1.6.1.3.	Özgül Ağırlık Deneyi .....	25
1.6.1.4.	Düktilite Deneyi.....	25
1.6.1.5.	Frass Kırılma Noktası Deneyi .....	26
1.6.1.6.	Parlama Noktası Deneyi .....	26
1.6.1.7.	Çözünürlük Deneyi.....	27
1.6.1.8.	İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (TFOT).....	27
1.6.2.	Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Superpave Deneyleri.....	27
1.6.2.1.	Dönel Viskozimetre Deneyi (Rotational Viscosimeter, RV) .....	27
1.6.2.2.	Dinamik Kayma Reometresi Deneyi (Dynamic Shear Rheometer, DSR) .....	28
1.6.2.3.	Kiriş Eğme Reometresi Deneyi (Bending Beam Rheometer, BBR) .....	30
1.6.2.4.	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Rolling Thin Film Oven Test).....	30
1.6.2.5.	Basınçlı Yaşlandırma Kabı Deneyi (Pressure Aging Vessel, PAV).....	31
1.7.	Bitüm Modifikasyonu .....	32
1.7.1.	Bitüm Modifiyesinde Kullanılan Katkı Maddeleri.....	33
1.7.1.1.	Stiren-Butadien-Stiren (SBS) .....	34
1.7.1.2.	Bitkisel Atık Yağ .....	35
2.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	37
2.1.	Modifiye Bitümün Hazırlanması .....	37
2.2.	Modifiye Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	38
2.2.1.	Penetrasyon Deneyinin Yapılışı .....	38
2.2.2.	Yumuşama Noktası Deneyinin Yapılışı .....	39
2.2.3.	Düktilite Deneyinin Yapılışı.....	40
2.2.4.	Nicholson Soyulma Deneyi Yapılışı .....	41
2.2.5.	Trikloretilende Çözünürlük Deneyinin Yapılışı .....	42
2.2.6.	Özgül Ağırlık Deneyi Yapılışı.....	43
2.2.7.	Parlama Noktası Deneyi Yapılışı .....	43
2.2.8.	RV Deneyinin Yapılışı .....	44
2.2.9.	DSR Deneyinin Yapılışı .....	45
2.2.10.	RTFOT ve PAV Deneylerinin Yapılışı .....	46
3.	BULGULAR VE İRDELEME .....	48
3.1.	Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları .....	48
3.2.	Düktilite Deneyi Sonuçları .....	50

3.3.	Trikloretilende Çözünürlük Deneyi Sonuçları.....	50
3.4.	Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları .....	51
3.5.	Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları.....	51
3.6.	Parlama Noktası Deneyi Sonuçları.....	52
3.7.	Dinamik Kesme Reometresi Deneyi Sonuçları (DSR).....	53
3.8.	Dönel Viskozimetre Deneyi Sonuçları (RV).....	55
3.9.	Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi Sonuçları .....	56
3.10.	Basınçlı Yaşlandırma Kabini (PAV) Deneyi Sonuçları .....	60
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	62
5.	KAYNAKLAR .....	64
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

## ÖZET

### BİTKİSEL ATIK YAĞ KATKISININ SBS MODİFİYELİ BİTÜMÜN FİZİKSEL VE REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Erman ÇAVDAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Şeref ORUÇ  
2019, 68 sayfa

Bu tez çalışmasında, Bitkisel Atık Yağ, Stiren-Butadien-Stiren (SBS) modifiyeli bitüme katkı maddesi olarak farklı oranlarda katılarak bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisi laboratuvar ortamında geleneksel ve Superpave kapsamındaki deneylerle araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, %5 oranında SBS modifiyeli bitüme bitüm ağırlığının %1, %3, %5, %7, %9 oranlarında Bitkisel Atık Yağ katkısı eklenerek numuneler üretilmiştir. Modifiyeli bitüm numuneleri üzerinde Penetrasyon, Yumuşama Noktası, Düktilite, Nicholson Soyulma, Trikloretilende Çözünürlük, Özgül Ağırlık, Dönel Viskozimetre (RV), Dinamik Kesme Reometresi (DSR), Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) ve Basıncılı Yaşlandırma Kabini (PAV) deneyleri yapılmıştır. Bitkisel Atık Yağ katkısının, bitümün işlenebilirliğini, yaşlanma direncini ve soyulma direncini artırdığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, Bitkisel Atık Yağ katkısının, asfalt karışımların üretiminde kolaylık sağlayacağı, karıştırma ve sıkıştırmada enerji tasarrufuna olanak sağlayabileceği sonuçlarına ulaşılmıştır. Diğer yandan, Bitkisel Atık Yağ katkısının, araştırılan katkı oranlarında, katkı oranının artmasıyla birlikte bitümün tekerlek izi performansının düşmesine ve sıcaklık hassasiyetinin artmasına neden olduğu da ulaşılan diğer sonuçlardır.

**Anahtar Kelimeler:** Modifiye bitüm, Bitkisel atık yağ, SBS, Bitüm, Asfalt

Master Thesis

**SUMMARY**

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF VEGETABLE WASTE OIL ADDITIVES ON  
PHYSICAL AND REOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SBS MODIFIED  
BITUMEN

Erman ÇAVDAR

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Şeref ORUÇ  
2019, 68 Pages

In this thesis, new bitumen was produced by adding different amounts of vegetable waste oil as additive to Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) modified bitumen. The effect of the vegetable waste oil on the physical and rheological properties of SBS modified bitumens were investigated in the laboratory by using traditional and superpave methods. In the experimental study, vegetable waste oil was added to 5% SBS modified bitumen at 1%, 3%, 5%, 7%, 9% by weight. Penetration, Softening Point, Ductility, Nicholson stripping, Trichlorethylene Solubility, Specific Gravity, Rotational Viscometer (RV), Dynamic Shear Rheometer (DSR), Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) and Pressure Aging Vessel (PAV) experiments were performed on modified bitumen samples. It has been observed that the vegetable waste oil additive improved the workability of bitumen, aging resistance and stripping resistance. In this context, it has been concluded that the vegetable waste oil additive will be able to provide convenience in the production of asphalt mixtures and may provide energy saving in mixing and compacting. On the other hand, it is also concluded that the contribution of the vegetable waste oil has led to decrease in rutting performance and increases temperature sensibility of bitumen as ratio of vegetable waste oil increased.

**Key Words:** Modified bitumen, Vegetable waste oil, SBS, Bitumen, Asphalt

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1. Rijit Üstyapı Enkesiti .....	9
Şekil 2. Esnek Üstyapı Enkesiti .....	10
Şekil 3. BSK serilip sıkıştırılması çalışması .....	11
Şekil 4. Esnek üstyapı gerilme dağılımı.....	13
Şekil 5. Tekerlek izi oluşu .....	15
Şekil 6. Yapısal tekerlek izi .....	15
Şekil 7. Akma tekerlek izi .....	16
Şekil 8. Aşınma ve oturma tekerlek izi .....	16
Şekil 9. Kaplama bölgesel çökme .....	17
Şekil 10. Kaplamada oturma .....	17
Şekil 11. Kaplamada ondülasyon oluşumu .....	18
Şekil 12. Timsah sırtı çatlaklar.....	19
Şekil 13. Kenar çatlağı .....	19
Şekil 14. Enine çatlak.....	20
Şekil 15. Blok (Büzülme) çatlakları.....	20
Şekil 16. Ham petrolden bitüm elde edilmesi .....	22
Şekil 17. Penetrasyon deney düzeneği .....	24
Şekil 18. Yumuşama noktası deney düzeneği .....	24
Şekil 19. Düktilite deney düzeneği .....	25
Şekil 20. Frass kırılma noktası deney düzeneği .....	26
Şekil 21. Parlama noktası deneyi .....	26
Şekil 22. Dönel viskozimetre deney aleti.....	28
Şekil 23. DSR deney düzeneği ve hareket adımları .....	29
Şekil 24. Bitümün viskoelastik özelliği .....	29
Şekil 25. Kiriş Eğme Reometresi deney aleti.....	30
Şekil 26. RTFOT deney aleti .....	31
Şekil 27. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deney aleti .....	32
Şekil 28. SBS polimeri .....	35

Şekil 29. SBS polimerinin yapısı .....	35
Şekil 30. Yağın Molekül Yapısı.....	36
Şekil 31. Modifiye Bitüm Üretimi .....	38
Şekil 32. Bitümün su banyosunda 25°C sıcaklıkta bekletilmesi.....	39
Şekil 33. Penetrasyon deneyinin yapılması.....	39
Şekil 34. Yumuşama Noktası Deney Düzeneği .....	40
Şekil 35. Su Banyosunda Bekletilen Düktilite Numuneleri .....	41
Şekil 36. Düktilite Değerlerinin Ölçülmesi.....	41
Şekil 37. Yıkanmış ve kurutulmuş agrega .....	42
Şekil 38. Nicholson Soyulma Deneyi numunesi .....	42
Şekil 39. Modifiye bitümün trikloretilende çözünmesi.....	43
Şekil 40. Piktometre yöntemi ile tartım .....	43
Şekil 41. Parlama Noktası Deneyi düzeneği .....	44
Şekil 42. Dönel Viskozimetre deney düzeneği .....	45
Şekil 43. Bohlin DSR II deney aleti .....	45
Şekil 44. RTFOT Deney cihazı .....	46
Şekil 45. PAV Deney cihazı.....	47
Şekil 46. Penetrasyon deneyi sonuçları.....	48
Şekil 47. Yumuşama noktası deneyi sonuçları.....	49
Şekil 48. Penetrasyon indeksi sonuçları .....	49
Şekil 49. Düktilite deneyi sonuçları .....	50
Şekil 50. Trikloretilende modifiyeli bitümün çözünmesi .....	51
Şekil 51. Modifiye bitümün özgül ağırlık sonuçları .....	51
Şekil 53. Nicholson soyulma deneyi sonuçları .....	52
Şekil 54. DSR deneyi $\delta$ değerleri .....	53
Şekil 55. DSR deneyi $G^*$ değerleri .....	54
Şekil 56. DSR deneyi $G^*/\sin\delta$ değerleri .....	54
Şekil 57. Modifiye bitümlerin viskozite değerleri .....	55
Şekil 58. Modifiye bitümlerin sıcaklık ve viskozite grafiği.....	56
Şekil 59. RTFOT deneyi sonrasında penetrasyon değerleri.....	57
Şekil 60. RTFOT deneyi sonrasında yumuşama noktası değerleri .....	58
Şekil 61. Yumuşama noktası deneyi sıcaklık farkları .....	58
Şekil 62. RTFOT deneyi sonrasındaki $G^*/\sin\delta$ değerleri .....	59

Şekil 63. PAV deneyi sonrası 22°C sıcaklıktaki DSR değerleri.....	60
Şekil 64. PAV deneyi sonrası 25°C sıcaklıktaki DSR değerleri.....	61



## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Türkiye’de satıh tipine göre karayolu uzunluğu .....	13
Tablo 2. Türkiye’ de yapılan 5 yıllık asfalt uygulaması ve bitüm tüketimi .....	14
Tablo 3. Bitüm sınıfına göre PAV uygulama sıcaklıkları .....	31
Tablo 4. Bitüm modifiyesinde kullanılan katkı maddelerinin gruplandırılması .....	33
Tablo 5. Kullanımı yaygın olan bitüm üzerindeki etkileri .....	34
Tablo 6. DSR deneyi sonuçları .....	53
Tablo 7. Dönel viskozimetre deneyi (RV) sonuçları.....	55
Tablo 8. Modifiye bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları .....	56
Tablo 9. RTFOT deneyi sonrasında bitümün fiziksel özellikleri.....	57
Tablo 10. RTFOT deneyi sonrası DSR sonuçları .....	59
Tablo 11. PAV deneyi sonrasında yapılan DSR deneyi sonuçları .....	60

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
AC	: Asfalt Çimentosu
AESO	: Akrikatlı Epoksitlenmiş Soya Yağı
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BBR	: Eğilme Kirişi Reometresi
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
DSR	: Dinamik Kayma Reometrisi
EA	: Etilen-Akrilat
EBA	: Etilen-Butil-Akrilat
ECB	: Etilen-Kopolimer-Bitüm
EVA	: Etilen-Vinil-Asetat
HHR	: Yüksek Oranda Rejenere Kauçuk
HDPE	: Yüksek Yoğunluklu Polimer
LDPE	: Düşük Yoğunluklu Polimer
MPE	: Maleik AnhidritAşılı Polimer
OB	: Orijinal Bioyağ
PE	: Polietilen
PU	: Poliüretan
PP	: Polipropilen
PAV	: Başınçlı Yaşlandırma Kabini
PMB	: Polimer Modifiyeli Bitüm
PPA	: Politosforik Asit
RTFOT	: Dönel İnce Film Halinde Yaşlandırma Deneyi
RV	: Dönel Viskozimetre
SMA	: Stone Mastic Asphalt
SBR	: Stiren-Butadien Kauçuğu
SBS	: Sitren-Butadien-Sitren
SEBS	: Sitren-Etilen-Butilen-Sitren
TFOT	: İnce Film Halinde Yaşlandırma Deneyi
UV	: Ultraviyole

VMA	: Agregalar Arası Boşluk
WCO	: Atık Pişirme Yağı
YN	: Asfaltın Yumuşama Noktası Sıcaklık Değeri
°C	: Santigrat derece
dk	: Dakika
G*	: Kompleks Kayma Modülü
G'	: Kayıp Modülü
G''	: Depolama Modülü
kg	: Kilogram
m	: Metre
mm	: Milimetre
kPa	: Kilopascal
MPa	: Mega Pascal
N <sub>f</sub>	: Yorulma Ömrü
Pa	: Pascal
Pa.s	: Pascal-Saniye
PI	: Penetrasyon İndeksi
rpm	: Dakikadaki Devir Sayısı
sn	: Saniye
T	: Sıcaklık
δ	: Faz açısı
τ	: Kayma mukavemeti



## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Geçmişten günümüze dünyada artan nüfus ile birlikte karayolu ulaştırması yük ve yolcu taşımacılığında büyük bir öneme sahiptir. Yaşam standardının yükselmesi ve ekonomik kalkınmayla yollardaki trafik hacimleri, trafik yükleri sürekli artması iklim ve çevre etkileriyle birlikte asfalt kaplamalarında deformasyonlara ve çatlamalara kısaca bozulmalara neden olmaktadır. Bu sebeple kaplamaların ömürleri kısaltmakta, yol konforu azalmakta, bakım-onarım çalışmaları da artmaktadır. Bu durumda ciddi anlamda ekonomik dezavantaj yaratmakta olup asfalt kaplamaların malzeme özelliklerinin ve performansının artırılması çok önemli bir durumdur.

Kaplamalar içerisinde agrega, bitüm ve hava bulunan bir yapıdır. Bitümün kaplama içindeki yeri yaklaşık olarak %4-7 oranlarında olmasına rağmen kaplamanın davranışında ve performansında etkisi büyük bir önem arz eder. Bitüm, visko-elastik davranışından dolayı iklim ve çevre etkileriyle farklı davranmaktadır. Trafik yüklerinin artışıyla kaplamalarda tekerlek izlerinin oluşması, düşük sıcaklık çatlakları ve yorulma görülmektedir. Kaplamalarda oluşan bu deformasyonların azaltılması amacıyla asfalt çimentosuna yani bitüme veya asfalt betonuna farklı tiplerde birçok katkı maddesi eklenerek modifikasyonlar yapılmaktadır. Bu modifikasyonlar için çeşitli polimerler, karbon kökenli maddeler ve atık malzemeler kullanılmaktadır (Yılmaz, 2016).

Bitkisel Atık Yağ, günümüzde evsel atık yağların toplanması ve belirli tesislerde arıtılmasıyla elde edilen ve biyodizel yakıt üretiminde kullanılabilen bir yağdır. Atık yağlar, hem ülkemizde hem de dünyada sürekli yağ tüketimi nedeniyle fazla miktarlarda ortaya çıkmakta ve çevreye olan zararı düşünülerek toplatılarak belirli tesislerde geri dönüştürme yolu ile tekrar kullanıma kazandırılmaya çalışılmaktadır.

Son yıllarda, Stiren-Butadien-Stiren ve Bitkisel atık yağ ile ilgili bitümlü bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özellikleri üzerine etkileri ayrı ayrı olarak incelenmiş olup bu iki katkı türünün birlikte kullanılarak modifikasyon yapılması ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, özellikle yüksek sıcaklık performansı iyi derecede olan SBS modifiyeli bitümlerin yaşlanma direncinin, işlenebilirliğinin, soyulma direnci vb. fiziksel ve reolojik özelliklerinin üzerinde Bitkisel atık yağ katkısının

etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu yüzden Stiren-Butadien-Stiren ve Bitkisel atık yağın birlikte kullanılması ile yeni bir modifiye bitüm geliştirmek ve bu modifikasyonun bitümün fiziksel ve reolojik özelliği üzerindeki etkilerini incelemek için bu çalışmaya girişilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, farklı oranlarda Bitkisel atık yağ ilavesiyle SBS modifiyeli bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerinin incelenmesi için penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, trikloretilende çözünürlük, özgül ağırlık, Nicholson soyulma, Dinamik kesme reometresi (DSR), Dönel viskozimetre (RV), Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT), Basınçlı yaşlandırma kabini (PAV) deneyleri yapılmış ve deneysel program titizlikle yürütülmüştür.

## 1.2. Konunun Özgeçmişi

Geçmişten günümüze birçok araştırmacı asfalt kaplamaların deformasyonlarının azaltılması, bozulmalarının önlenmesi, kaplamanın ömrünün uzatılması ve kaplamanın performans özelliklerini geliştirmek için asfalta birçok tipte katkıları belirli oranlarda ilave ederek sıcak asfalt karışımlar üzerinde performans değişim ve sonuçlarını belirlemeye çalışmıştır.

Bundan yola çıkarak, Sıcak Karışım Asfalt (BSK), SBS ve Yağ ilave edilerek modifiye edilen asfaltlar için yapılan çalışmaların bazıları;

- SBS ve diğer polimerlerin kullanılarak modifiye bitümlü çalışmalar;

Sengöz ve Işıkyakar (2007), çalışmalarında SBS ve EVA polimerlerinin bitüme farklı ederek oranlarda ilave asfalt çimentosu üzerindeki etkisini laboratuvar ortamında incelemiştir. SBS polimeri olarak kullanılan Kraton D-1101 %2, %3, %4, %5, %6 oranlarında, EVA polimeri olarak kullanılan Evatane 2805 %3, %4, %5, %6, %7 oranlarında kullanılarak bitüme ayrı ayrı ilave edilmiş 185°C sıcaklıkta 2 saat karıştırılmıştır. Numunelere Marshall metodu uygulanmıştır. SBS ve EVA katkılarının kaplamanın sertliğini, sıcaklığa duyarlılığını ve kalıcı deformasyonlara karşı direncini arttırdığı tespit edilmiştir.

Chen ve Huang (2007), çalışmalarında SBS ve sülfür kullanarak asfaltın mekanik özelliklerindeki üzerindeki gelişmeleri araştırmıştır. İki farklı tipte asfalt kullanıp (AC-10, AC-20), %1, %3, %5, %7, %9 oranlarında iki farklı tip olan SBS-l ve SBS-r ilave ederek farklı içerikte numuneler elde edilmiştir. Karışımlar, 60 dakika boyunca 170°C sıcaklıkta

karıştırıldıktan sonra SBS miktarının %1, %3 ve %5 oranlarında sülfür ilavesi yapılmış ve tekrar 60 dakika karıştırma işlemi yapılmıştır. Numunelere, yapılan deneyler (penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kayma reometresi, elastik geri dönme) sonucunda bu modifiyeli asfalt karışımların depolama stabilitesinin arttığı ve elastik davranışının geliştiği belirlenmiştir.

Şengöz ve arkadaşları (2009), asfalta (Penetrasyon:50/70), %2, %3, %4, %5, %6 oranında SBS (Kraton D1101); %3, %4, %5, %6 oranında EVA (Evatane 2805) ve %2, %3, %4, %5, %6 oranında EBA (Elvaloy 3427 AC) ayrı ayrı ilave edilmiş ve bu karışımları 180-185°C sıcaklıkta 1000-1200 rpm hızında karıştırarak numuneler elde edilmiştir. Elde edilen modifiyeli asfalt numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, ince film halinde ısıtma deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda polimer içeriğinin artmasıyla yumuşama noktasında artış, penetrasyon derecesinde azalma ve bunun sonucunda da modifiyeli bitümün sertleşmesi sonucu tekerlek izine karşı direncinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Xiang ve arkadaşları (2010), çalışmalarında yol asfaltlarının ve SBS modifiyeli asfaltların dış ortam yaşlanmasını incelemiştir. Yol asfaltının ve SBS modifiyeli asfaltın dış ortam yaşlanmasının ilk 3 ayda hızla ilerlediği sonraki 9 ayda ise yavaşlayarak ilerlediği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak dış ortam yaşlanmasının, laboratuvarda UV radyasyonla yaşlandırmaya göre daha hızlı olduğu ve SBS modifiyeli asfaltın düşük sıcaklık performansının dış ortam yaşlandırması boyunca hızlıca düştüğü sonucuna ulaşılmıştır.

Kök, Yılmaz ve Güler (2011), yaptıkları çalışmada doğal asfalt olan gilsoniti daha ekonomik bir bitüm elde etmek için SBS içeriğinin azaltılarak kullanılması üzerine bir takım reolojik deneylere tabi tutulmasıyla incelemiştir. Sadece SBS modifiyeli bitüm ile hem SBS hemde gilsonitli bitümün kıyaslaması yapılması için Dinamik Kesme Reometresi (DSR) ve Dönme Viskozimetre (RV) deneyi uygulanmıştır. Gilsonit ve SBS modifiyeli bitümlerin SBS modifiyeli bitümlere göre vizkozitesinin azaldığını ve bu azalmanın işlenebilirliği arttırdığı gözlemlenmiştir. SBS katkısının azaltıldığı miktardan daha fazla gilsonit eklenmesi gerekmesine rağmen bitüm maliyetinin de düştüğünün sonucuna varılmıştır.

Aksoy, İskender, Oruç ve Özen (2012), yaptıkları çalışmada SBS ve yağ asidi türevli amin modifiyeli bitümlerin performanslarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada geleneksel bitüm, SBS modifiyeli bitüm ve AS (soyulma önleyici) modifiyeli bitümler

deneylere tabi tutularak kıyaslanmıştır. Deneyler sonucunda modifiyeli iki bitümde de su hasarı direnci ve bununla birlikte çatlama mukavemeti geleneksel bitüme göre artmıştır. Ayrıca SBS modifiyeli bitümlerin esneklik modülü yaklaşımı ile amin modifiyeli bitümden daha fazla performans gösterdiği belirlenmiştir.

Abuawad ve arkadaşları (2015), çalışmalarında asfalt betonunda nem hasarının azaltılması için SBS, PPA (Politosforik Asit), HL (Hidratlanmış Kireç), LAS (soyulma önleyici) katkıları kullanmışlardır. Bu modifiye asfalt betonu, Modifiye Lottman, Tekerlek İzi ve Kırılma deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda PPA'nın nem hasarını azaltmada etkili olmadığı, LAS ve HL'nin nem hasarını azalttığı ayrıca SBS katkısının asfaltın tekerlek izi direncini arttırmasıyla beraber nem hasarını kontrol etmesindeki etkinliğinin büyük olması çalışmalar sonucunda belirlenmiştir.

Behnood ve Olek (2017), yaptıkları çalışmada bitüme belirli oranlarda SBS, GTR (kauçuk lastik) ve PPA (politosforik asit) katkılarını ilave ederek bitümün reolojik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada DSR, PAV, BBR, RTFOT deneylerini uygulamıştır. İlave edilen katkıların hepsinin yüksek sıcaklık dayanımını arttırdığı, kauçuk lastiğin sertliği azalttığı ve bu azalmanın düşük sıcaklıklarda daha fazla olduğu bulunmuştur.

Rasool ve arkadaşları (2017), araştırmalarında SBS modifiyeli bitüme HRR (yüksek oranda rejenere kauçuk) ekleyerek yaşlanma direncindeki gelişmeyi penetrasyon, duktilite, yumuşama noktası vb. deneylerle incelemiştir. SBS modifiyeli bitüme HRR eklenmesinin SBS modifiyeli bitüme göre hem yaşlanma öncesi hem yaşlanma sonrası penetrasyon değerini arttırdığı, kauçuk ilaveli SBS bitümlerin düşük viskoziteleri daha iyi işlenebilirlik sağladığı ve kauçuk katkılı bitümlerin depolama stabilitesini arttırdığı belirlenmiştir.

Sun ve arkadaşları (2018), çalışmalarında PU (poliüretan) modifiye asfaltı geleneksel asfalt ve SBS modifiyeli asfalta göre performansını kıyaslamışlardır. Yumuşama noktası, viskozite, DSR, BBR, TFOT deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda PU modifiyeli asfaltın viskozite değerinin SBS modifiyeli asfalta ve geleneksel asfalta göre daha fazla olduğu, PU modifiyeli asfaltın düşük sıcaklık performansının SBS modifiyeli asfalta göre daha az olduğunu ve PU modifiyeli asfaltın deformasyon ve suya karşı direncinin SBS modifiyeli asfalta göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.

- Yağ katkılı modifiye bitümle ilgili çalışmalar;

Zargar ve arkadaşları (2012), araştırmalarında atık yemeklik yağın (WCO) yaşlanmış bitümü genęleřtirme üzerinde kullanımının m¼mk¼n olup olmadığını incelemişlerdir. Yaşlandırılmış ve penetrasyon değereri 40/50 olan bit¼me %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında atık yağ ekleyerek 160° C sıcaklıkta 30 dk boyunca karıştırmışlardır. Bu karışımlarda yağ oranı arttıka penetrasyon derecesinin arttığı, yumuşama noktasının da azaldığı gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda atık yağın antioksidan gibi davrandığı ve bit¼m¼ genęleřtirdiđi ve bu genęleřen bit¼m¼n kısa d¼nem yaşlanmasına eğiliminin daha az olduğu bununla birlikte atık yağların kullanımının uygulanmasının uygun olduğu belirtilmiştir.

Yang ve dostları (2014), ęalıřmalarında atık ağağlardan elde edilen yağlarla modifiye edilen bit¼mlerin mekanik performanslarını incelemişlerdir. Bu ęalıřmada 3 ęeřit OB (saf yağ), DWB (suyu alınmış yağ), PMB (polimer modifiyeli bit¼m) bit¼me %5 ve %10 oranlarında yağ ayrı ayrı katılmıştır. Bu ęalıřma sonucunda yağların asfaltın yorulma performansını önemli bir derecede arttırdığı, polimer modifiyeli yağın diğerlerine göre asfalt karışım performansında daha iyi olduğu buradaki olumlu etkininde polimerden kaynaklı olduğu, saf yağın tekerlek izi performansına önemli bir derecede olmasada negatif etki gösterdiği belirlenmiştir.

Lei, Bahia ve Yi-qui (2015), araştırmalarında d¼ř¼k sıcaklık performansını arıtılmış yağ, petrol k¼kenli ve ağağlardan elde edilen yağlarla modifiye edilen bit¼mler üzerinde incelemişlerdir. BBR deneyi sonucunda yağların d¼ř¼k sıcaklık performansını arttırdığı ve asfaltın ęatlama riskini azalttığını belirlenmiştir. Aynı zamanda sadece yağ katkısı kullanımının y¼ksek sıcaklık performansına negatif etki edebileceği belirtilmiştir.

Sun ve arkadaşları (2016), ęalıřmalarında atık yemek yağlarından elde edilen yağların asfalt modifiye bit¼m¼ özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Penetrasyon değereri 40/60 olan bit¼me %2, %4, %6, %8 oranlarında yağ katarak 135° C sıcaklıkta 5000 rpm hızında karıştırarak modifiye bit¼mler hazırlanmıştır. Bu numunelere DSR, RV, BBR deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin sonucunda yağların eklenmesiyle bit¼m¼n yumuşama noktasında ve viskozitesinde azalma, penetrasyon ve d¼ktilitesinde artma meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra bit¼m¼n deformasyon direncinde azalma, ısıl ęatlama direncinde ise artma meydana geldiği bulunmuştur.

Sun, Lu ve arkadaşları (2017), araştırmalarında y¼ksek oranda atık yağ içeren modifiye bit¼mlerin yaşlanma dayanımını penetrasyon değereri 70 olan bit¼m¼le ve SBS modifiyeli bit¼m¼le kıyaslayarak incelemişlerdir. RV deneyi sonucunda yağ içeren bit¼m¼n

yüksek sıcaklık performansının SBS modifiyeli bitümle benzer olduğu belirlenmiş, BBR deneyi sonucunda ise yağ içeren bitümün düşük sıcaklık çatlama direncinin diğer iki bitüme göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Bunlara ek olarak yağ katkılı bitümün yaşlanma dayanımının daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Elkashef ve Williams (2017), araştırmalarında dönüştürülmüş asfalt kaplamalarını soya yağı ile modifiye ederek yorulma ve düşük sıcaklık performansının gelişimini incelemişlerdir. Dönüştürülmüş asfalt bağlayıcısı hem PG58-28 hem de %6 ve %12 oranlarında yağ katılarak kıyaslanmışlardır. Yapılan araştırma sonucunda kritik yüksek ve düşük sıcaklık performansının soya yağı kullanımıyla önemli bir şekilde düştüğü, soya yağının yorulma dayanımına etkisinin kayda değer bir şekilde olduğunu kısaca hem yorulma dayanımını hemde düşük sıcaklık performansını arttırdığı başarılı bir şekilde görülmüştür.

Portugal, Lucena ve arkadaşları (2017), çalışmalarında hem SBS modifiyeli hem de 50/70 penetrasyon derecesine sahip bitüme ayrı ayrı %1, %2, %3 oranlarında yeni ve atık mısır yağı ekleyerek bitümün reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda %2 mısır yağı içeren bitüm ile %3 mısır yağı içeren SBS modifiyeli bitümün yaşlanmaya dayanımının diğer şartlara göre daha fazla olduğu, atık mısır yağının sıcaklık değişimlerinde daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışmada yağların bitümde kullanılmasında yeni veya atık yağ olmasının önemli bir farklılık oluşturmaması nedeniyle yeni yağ kullanmaktansa çevreye olan zararından dolayı atık yağların kullanılmasının daha doğru olduğu belirlenmiştir.

Chen, Podolsky, Williams ve Cochran (2018), araştırmalarında Akrikatlı Epoksitlenmiş Soya Yağı (AESO) kullanımının bitüm üzerindeki etkilerini laboratuvar ortamında araştırmışlardır. Hem laboratuvarda üretilen soya yağı hem de piyasada üretilip satılan soya yağı %3, %9, %15 oranlarında bitüme eklenerek modifiyeli bitümler elde edilmiş ve bu bitümlere DSR, BBR, LAS, RV deneyleri yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda bu iki yağında karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını düşürdüğü fakat viskozite değerini düşürmelerinden ötürü kritik yüksek sıcaklık performansına negatif etkileri olduğu belirlenmiştir. Soya yağının bitüme katıldığı oran arttıkça yorulma dayanımının da arttığı görülmüştür. Ayrıca aynı oranlarda kullanıldığında laboratuvarda üretilen soya yağı yorulma dayanımında ve düşük sıcaklık performansında satın alınan ticari soya yağına göre daha üstün olduğu belirlenmiştir.

Su, Xiao, Wang, Cong ve Amirkhaniyan (2018), araştırmalarında farklı kaynaklardan elde edilen yağların (atık yağlar, hintyağı, yağlama yağları, soya yağı, ağaçlardan elde edilen yağlar vb.) bitüme etkisini geniş bir bakış açısıyla inceleyerek kıyaslamışlardır. Bitüme uygulanan deneyler ile ağır yağların çoğunun yüksek sıcaklık performansını düşürdüğü, ağaç kökenli yağların yorulma dayanımını önemli bir şekilde arttırdığı ve bu yağlarla hazırlanan bitümlerin kısa dönemli performansının iyi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çam ağacı talaşlarından elde edilen yağların tekerlek izi direncini geliştirdiği gözlemlenmiştir.

- Hem polimer hem de yağ katkılı modifiye bitüme ilgili çalışmalar;

Yang ve You (2015), araştırmalarında atık ağaç kökenli 3 farklı tipte biyo-yağ (arıtılmış, arıtılmamış ve polimer modifiyeli yağ) %5 ve %10 oranlarında katılarak modifiye edilen bitümlerin yüksek sıcaklık performansını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Araştırma sonucunda biyo-yağların bitümlerin yüksek sıcaklık kararlılığını arttırdığını ve polimer modifiyeli bitümdeki polimer oranının %0.04 gibi çok az bir değerde olması performansının diğer iki tip bitüme oranlandığında bunlardan fazla olmadığı belirlenmiştir.

Elkashef ve arkadaşları (2017), çalışmalarında bitüme %0.75 oranında soya yağı ilave ederek hem modifiyeli (PG64-28) hem de saf bitümdeki (PG58-28) reolojik etkisini DSR, BBR, RV deneyleri ile incelemişlerdir. Soya yağı ile modifiye edilen bitümde yorulma ve düşük sıcaklık performansında gelişme olduğu, çatlama direncini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca piyasada kullanılan diğer gençleştiricilere oranla bitüme az oranda katılmasına rağmen tekerlek izi dayanımına katkısı önemli derecededir.

Lou, Zhang ve Cong (2017), araştırmalarında farklı oranlarda SBS, PE polimerlerini ve atık yağ ilave ederek hazırladıkları modifiye bitümleri reolojik özelliklerine bakarak incelemişlerdir. Bu inceleme sonucunda atık yağ ve polimer katkılı bitümlerin yumuşama noktasındaki artışın daha az olduğu, penetrasyon oranında ise fazla olduğu ve bu iki katkılı bitümlerin yaşlanmaya karşı daha dirençli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca atık yağ ve polimer ilaveli bitümlerin tekerlek izi dayanımının daha fazla olduğu, daha düşük deformasyon gösterdiği ve depolama kararlılığının da daha iyi olduğu bulunmuştur.

Zhang, Wang ve arkadaşları (2017), çalışmalarında SBS modifiyeli bitüme %5, %10, %15, %20 oranlarında ağır biyolojik yağ ilave ederek modifiye bitümler hazırlanmış ve RV, DSR vb. deneyler yapılarak incelemişlerdir. Çalışmanın sonunda, bitümlerdeki yağ oranının artmasıyla SBS modifiyeli bitümlerin viskozite değerlerinde düşüş olduğu, düşük

sıcaklıklarda yağ içeriğinin etkisinin önemli derecede olduğu ayrıca yağ ilavesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını azalttığı gözlemlenmiştir. SBS modifiyeli bitümün, saf bitüme oranla tekerlek izine karşı direncinin daha fazla olduğu buna ilave olarak katılan yağında bu direnci daha da arttırdığı belirlenmiştir.

Lei, Wang ve arkadaşları (2018), araştırmalarında atık lastik kırıntılarıyla modifiye edilen asfaltın yüksek sıcaklık performansını iyileştirmek için mısır atıklarından elde edilen yağı %5, %10, %15 oranlarında asfalta ekleyerek incelemiştir. Çalışmalar sonucunda viskozitenin değerinin önce artıp sonradan azaldığı, %10 oranında yağ içeren modifiye asfaltın en yüksek viskozite değerini gösterdiği belirlenmiştir. Lastik kırıntılarının parçacık boyutlarının yüksek sıcaklık performansı değiştirdiği ve yağında bu performansı arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca modifiye bitümün yorulma direnci özelliğinin de geliştiği görülmüştür.

Liu, Peng, Wu ve Zhou (2018), çalışmalarında atık motor yağlarını %4 ve %8 oranlarında penetrasyon derecesi 60/80 olan bitüme ve iki farklı tipte SBS modifiyeli bitüme ilave ederek kıyaslayarak incelemiştir. Atık motor yağları ile modifiye edilen asfaltın içindeki büyük moleküler boyutların yüzde miktarının azaldığını küçük moleküler boyutlarınsa yüzde olarak arttığını gözlemlemiştir. Atık motor yağ ile modifiye edilen bitüm aynı zamanda asfaltın yaşlanmasını yavaşlattığı da belirlenmiştir.

Fernandes, Silva ve Oliveira (2018), araştırmalarında bitüme HDPE (polietilen), CR (lastik kırıntısı), SBS ile atık ve geri dönüştürülmüş motor yağlarını ilave ederek bitümün karakteristik özelliklerini incelemiştir. Araştırmalarının sonucunda bu modifiye bitümlerin ısıl duyarlılıklarının daha düşük olduğu, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi direncinin daha fazla olduğunu düşük sıcaklıklarda ise daha esnek davrandıklarını gözlemlemiştir. Atık yağlar ile geri dönüştürülmüş yağlar kıyaslandığında ise geri dönüştürülmüş yağların yüksek viskozite değerlerinden dolayı ortaya çıkan bağlayıcı özellikleri ile daha yüksek miktarda bitümün yerini alabileceği sonucuna varılmıştır.

Li, Zhang ve dostları (2019), %4 oranında SBS modifiyeli bitüme soya yağı ilave ederek bitümün değişen özelliklerini kıyaslayarak incelemiştir. Soya yağı ilaveli SBS bitümün yüksek ve düşük sıcaklık performansının artan yumuşama noktası değeri ile SBS katkılı bitüme göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Soya yağı ilavesinin tekerlek izi performansını, yorulmaya bağlı oluşabilecek çatlamalara karşı direncini geliştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca soya yağı ilave etmenin SBS modifiyeli asfaltın maliyetini etkili bir şekilde düşürülebileceği vurgulanmıştır.



Dong, Yang ve arkadaşları (2019), araştırmalarında hintyağından elde edilen SBH biyo-asfaltı, kırıntı kauçuk ve SBS ile bitüme katarak oluşturdukları bu karışımın performansını incelemişlerdir. Yapılan bu araştırma sonucunda bitümin yaşlanma direncinin geliştiği, %15 oranında SBH katılan bitümin düşük ve yüksek sıcaklık performansının arttığı belirlenmiştir.

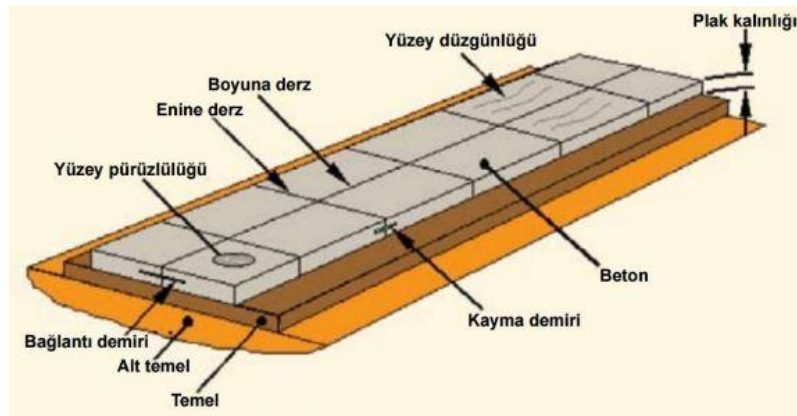
### 1.3. Karayolu ve Karayolu Üstyapıları

Karayolu, tüm kara araçlarının trafik akışına ve yayaların ulaşımına imkân sağlayan kamunun faydalanmasına açık olan arazi şeritleri, tüneller, köprüler ve her çeşit sanat yapılarıdır. Karayolu üstyapıları, yolda araçların oluşturduğu trafik yüklerini taşımak için tesviye yüzeyine inşa edilen tabakalı yol yapısıdır (KTSş, 2013; Umar ve Ağar, 1991).

Karayolu üstyapısı trafik durumuna, çevre ve iklim şartlarına, taban zeminin taşıma gücüne ve ekonomik şartlara bağlı olarak sečilir. Esnek ve Rijit olmak üzere üstyapılar iki temel kategoride değerlendirilir (Sağlık ve Güngör, 2008).

#### 1.3.1. Rijit Üstyapı

Taban zemini üzerine sırasıyla alttemel, temel ve Portlant Çimentosundan yapılan yüksek eğilme mukavemeti olan tek tabakalı plak ile yükleri zemine dağıtan üstyapı şeklidir. şekil 1' de rijit üstyapı detaylı bir şekilde görölmektedir (Umar ve Ağar, 1991).

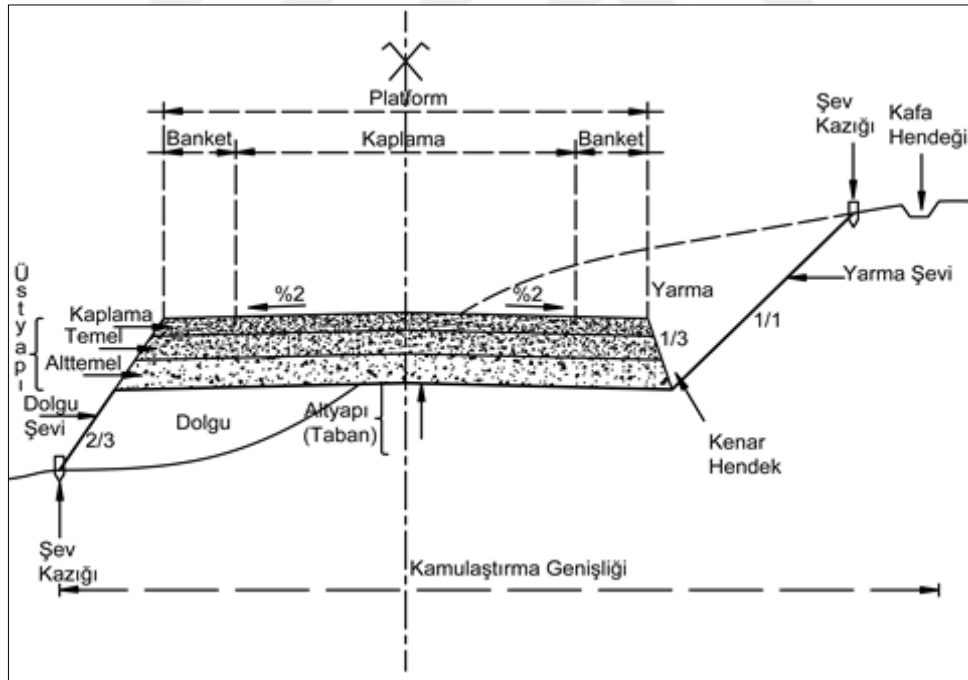


şekil 1. Rijit Üstyapı Enkesiti (URL-1, 2019)

Beton yolların davranışları, tesviye yüzeyindeki toprağın özelliğine, kaplama altına serilen temel ve alttemel malzemesinin özelliklerine ve tabiki dökülen beton kaplamanın kalınlığına, dayanımına ve diğer özelliklerine bağlıdır. Beton yolların ilk yapım maliyetleri esnek üstyapılara oranla fazla olmasına rağmen 20 yıldan daha uzun süreli periyodlar için bakım masrafları da dikkate alındığında esnek üstyaplardan daha ekonomiktirler (Umar ve Ağar, 1991).

### 1.3.2. Esnek Üstyapı

Taban zemini üzerine sırasıyla alttemel, temel ve bitümlü kaplama tabakaları inşa edilerek yükleri taban zeminine dağıtan bir üstyapı şeklidir. Esnek üstyapıların stabilitesi, agregaların kenetlenmesine, koheziona ve dane sürtünmesine bağlı olmaktadır. Şekil 2' de esnek üstyapı detaylı bir şekilde görülmektedir (Umar ve Ağar, 1991).



Şekil 2. Esnek Üstyapı Enkesiti

Esnek üstyapılar, yüzeyin geçirimsizliğini sağlayan, trafikteki araçların konforlu ve gürültüsüz bir şekilde geçişlerine imkân veren, yapımlarından kısa bir süre sonrasında kullanıma açılabilen, imalatı nispeten kolay olan, belirli rijitliğe ve stabiliteye sahip olan,

kuru havalarda iyi derecede sürtünme katsayısına sahip üstyapı çeşididir (Umar ve Ağar, 1991).

Esnek üstyapıların sahip olduğu en üst tabaka kaplama tabakasıdır. Bu tabaka iki tipte inşa edilir. Bunlardan ilki Karışım Tipi Kaplamalar diğer bir adıyla Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK) ikincisi ise Sathi Kaplamalardır (Orhan, 2012).

#### 1.4. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)

Orta ve ağır trafikli yollarda, üzerine gelen trafik yüklerini karşılamak ve üstyapının diğer tabakalarını iklim ve çevre etkisinden korumak amacıyla kullanılan kaplama malzemesidir. Bitümlü Sıcak Karışımlar, belirli bir granülometreye sahip sıcak agrega karışımının asfalt çimentosu ile uniform şekilde karıştırılıp, birleştirilmesiyle elde edilir. Şekil 3 'de BSK' mın serilip sıkıştırılması çalışması görülmektedir (Orhan, 2012).



Şekil 3. BSK serilip sıkıştırılması çalışması (URL-2, 2019)

Bitümlü Sıcak Karışımların uygulandığı üstyapılar da en üst tabaka olan kaplama tabakası aşınma ve binder tabakasından oluşur. Bu kaplamayı sırasıyla temel, alttemel, taban zemini tabakaları izler.

Alttemel, belirli granülometre sınırları içinde sürekli bir gradasyon sağlayacak şekilde tesviyesi yapılmış yüzeyin üzerine bir veya birden çok tabakalar halinde serip sıkıştırılan bir üst yapı tabakası olup, temel tabakasını taşımak amacıyla inşa edilir (KTŞ, 2013; Orhan, 2012).

Temel, alttemel üstüne belirli bir kalınlıkta serilen granülometrisi belirli gradasyon limitleri arasında olan malzemeler ile inşa edilen hem suyu drene edebilen hem de don

etkisini azaltabilen bir üstyapı tabakasıdır. Temel ve alttemelin asıl görevleri yüzeilerine gelen yükleri dağıtarak tabanda oluşabilecek oturma ve kesme deformasyonlarını engellemektir. Karayollarında üç farklı tip temel vardır. Bunlar; Granüler Temel (GT), Plent-miks Temel (PMT), Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT) dir (Orhan, 2012; KTŞ, 2013).

Granüler temel tabakası (GT); kırmataş, kırılmış cüruf, kırılmış çakıl ve çakıl ile ince malzemenin alınıp belirli bir gradasyon limitleri dâhilin de süreli bir gradasyon sağlayan şekilde hazırlanıp su ile karıştırılıp, şartnameye uygun hazırlanan belirli bir taşıma gücüne sahip taban zemini veya alttemel tabakası üzerine bir ya da birden çok tabaka halinde projeye uygun olarak serilip sıkıştırılmasıyla elde edilen tabakadır (KTŞ, 2013).

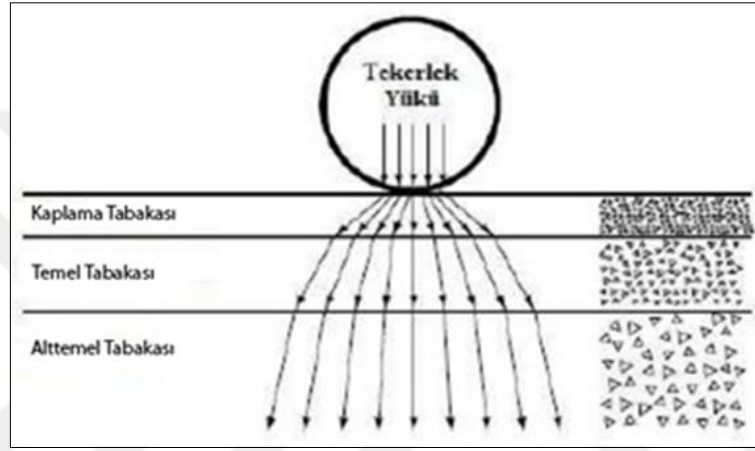
Plent-miks temel tabakası (PMT); kırma taş, kırılmış cüruf, kırılmış çakıl ile ince malzemeler kullanılarak belirli granülometri limitleri dâhilinde sürekli bir gradasyon sağlayabilecek en az üç ayrı tane boyutu grubunun su ile bir plentte karıştırılarak hazırlanan malzemenin belirli bir yüzey üzerine bir ya da birden çok tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla elde edilen tabakadır (KTŞ, 2013).

Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası (ÇBGT); kırmataş, kırılmış cüruf, çakıl, kırılmış çakıl ile ince malzeme kullanılarak belirli granülometri sınırları içerisinde sürekli gradasyona sahip bir şekilde hazırlanan malzemenin belirli bir oran da su ve çimento ile bir plentte karıştırılıp bir alttemel tabakası üzerine bir ya da daha çok tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla elde edilen tabakadır (KTŞ, 2013).

Bitümlü temel tabakası, elenmiş ve kırılmış kaba agregası, ince agregası ve mineral filler ile belirli bir granülometri sınırları içerisinde bu malzemeler ile bitümlü bağlayıcı bir plentte karıştırılıp temeller veya bitümlü kaplamalarla beton kaplamaların üzerine bir ya da birden çok tabakalar halinde sıcak halde serilip sıkıştırılmasıyla elde edilen tabakadır (KTŞ, 2013).

Kaplama tabakası, trafik yüklerini karşılamayıp diğer tabakalara dağıtan, yeterli pürüzlülüğe sahip, çevre ve iklim şartlarına karşı dirençli, belirli bir seyahat konforuna sahip olan ve üstyapı tabakasının en üst tabakasıdır. Genellikle, Asfalt betonu veya sathi kaplama olarak inşa edilirler. Sathi kaplama, bağlayıcı ve bitüm karıştırma olmadan yola ayrı ayrı serilip sıkıştırılır. Asfalt betonu ise agregası ve bağlayıcısının bir plentte karıştırılması yola serilip sıkıştırılmasıyla yapımı tamamlanır (Orhan, 2012; Umar ve Ağar, 1991).

Aşınma ve binder tabakaları çevresel etkilere, trafik yüklerine, deformasyonlara daha fazla maruz kaldığı için diğer tabakalara göre daha stabil ve daha durabil olmaları gerekmektedir. Özellikle aşınma tabakası esnek kaplamanın performansında yani sürüş konforu ve emniyet açısından doğrudan sorumludur. Şekil 4’de de görüldüğü gibi kaplamaya gelen tekerlek yükünden dolayı kaplamada oluşan gerilmeler aşınma tabakasında en fazla olduğu için daha aşınma tabakasının yüksek stabiliteye sahip olması gerekir (Tunç, 2004).



Şekil 4. Esnek üstyapı gerilme dağılımı

#### 1.4.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Türkiye’deki Uygulamaları

Türkiye’de 2017 yılına kadar yapılan karayolu uzunluğu yol tipine ve satıh türlerine göre Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye’de satıh tipine göre karayolu uzunluğu-01.01.2017 (URL-3, 2019)

Yol Tipi	Uzunluk, Km			Toplam
	Bitümlü Sıcak Karışım	Sathi Kaplama	Diğer	
Devlet Yolu	14.393	16.399	421	31.213
İl yolu	2.702	27.327	3.036	33.065
Otoyol	2.159	-	-	2.159
Toplam	19.254	43.726	3.457	66.437

Türkiye’de 2017 yılına kadar 5 yıllık asfalt uygulaması ve bitüm tüketimi Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Türkiye’ de yapılan 5 yıllık asfalt uygulaması ve bitüm tüketimi (URL-3, 2019)

Yıl	Bitümlü Sıcak Karışım (milyon ton)	Sathi Kaplama (Km <sup>2</sup> )	Soğuk Bitümlü Karışım (milyon ton)	Bitüm Tüketimi (milyon ton)
2012	38,3	294,9	1,819	2,809
2013	46,2	216,3	1,050	2,820
2014	30,9	203,8	0,938	2,389
2015	37,9	269,2	0,783	2,726
2016	40,4	306,4	0,544	2,931

#### 1.4.2. Bitümlü Sıcak Karışım Kusurları

Esnek kaplamaların trafiğe açılmasıyla tekerrür eden ağır trafik yükleri ve kaplamanın maruz kaldığı çevresel faktörlerin sonucunda kaplamada farklı tiplerde bozulmalar ve sorunlar oluşabilmektedir. Trafik, çevresel faktörler, yapım ve tasarım aşamasında yapılan hatalar ve kullanılan malzeme gibi nedenler oluşan kusurlar yolun performansını yani sürüş konforu ve emniyetini önemli derecede etkilemektedir. Esnek kaplama kusurları çoğunlukla yorulma çatlakları, tekerlek izi olukları ve düşük ısı çatlakları gibi gözükse de diğer tip kusurlarda kaplamanın performansını etkilemektedir. Bu kusurlar ele alındığında deformasyonlar, çatlaklar ve ayrışmalar olmak üzere üç farklı tipte incelenmektedir (Tunç, 2004).

##### 1.4.2.1. Deformasyonlar

Deformasyonlar, asfalt kaplama yapımından bir süre sonra oluşan yapısal bozukluklardır. Bu deformasyonlar kalıcı şekil değiştirme (kalıcı deformasyon) şeklinde olup yol ekseni boyunca ya da yolun belirli kesimlerinde bölgesel olarak oluşabilir. Deformasyonlara genellikle düşük stabiliteye sahip sıcak asfalt karışımların yapımından kaynaklansa da tabaka kalınlıklarının yetersizliği, alt tabakalarda ve zeminde gerçekleşen hacimsel değişiklikler, aşınma tabakasında bitüm ve filler malzemenin fazla kullanılması, drenajın yetersizliği ve kaplama tabakasının iyi sıkıştırılmaması gibi nedenlerden dolayı ortaya çıkmaktadır (Kutluhan, 2008; Tunç, 2004).

### 1.4.2.1.1. Tekerlek İzi

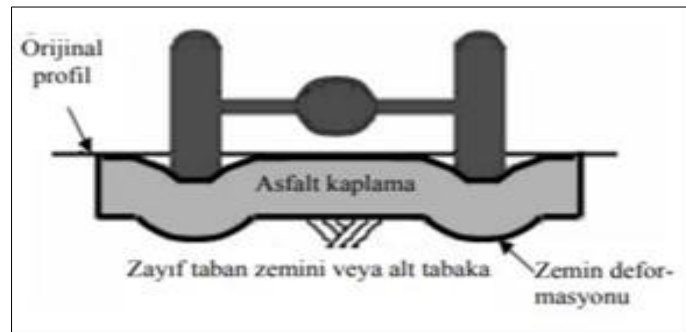
Trafikteki araçların tekerleklerinin yol ile temas ettiği kısımlarda yol eksenini boyunca oluşan düşey kalıcı deformasyonlara tekerlek izi oluşu (kanalı) denir (Şekil 5). Genellikle ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu bölgelerdeki yollarda çok fazla görülür. Tekerlek izleri, ağır trafik yükü ve tekerrür sayısının fazlalığı, tırmanma şeritlerinde ağır taşıtların yavaş hızları, yüksek hava sıcaklıkları, penetrasyon derecesi yüksek asfalt, kaplamaya yapılan sıkıştırmanın yetersizliği gibi nedenlere bağlı olarak oluşmaktadır (Tunç, 2004).



Şekil 5. Tekerlek izi oluşu (URL-4, 2019)

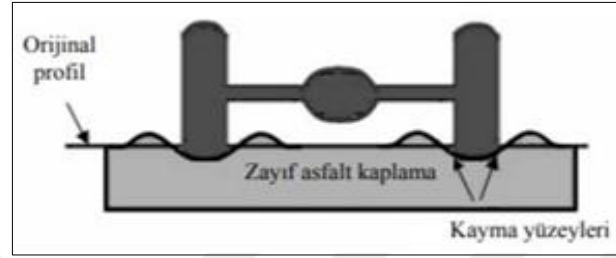
Tekerlek izleri farklı nedenlere bağlı olarak dört tip tekerlek izi oluşumu vardır. Bunlar; yapısal, akma, aşınma ve oturma tekerlek izidir.

Yapısal tekerlek izi, trafik yüklerinden dolayı ortaya çıkan gerilmelerin malzeme dayanımını aşması ile bitümlü tabakanın altındaki bir veya daha çok tabakanın kendi içindeki deformasyonlarının sonucunda oluşmaktadır. Şekil 6' da yapısal tekerlek izi görülmektedir (Kutluhan ve Ağar, 2009).



Şekil 6. Yapısal tekerlek izi (Kutluhan ve Ağar, 2009)

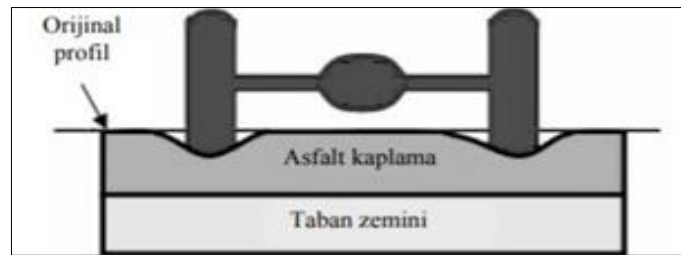
Akma tekerlek izi, trafik yüklerinden dolayı oluşan gerilmelerin bitümlü tabaka malzemesinin dayanımını aşmasıyla bitümlü tabaka ya da tabakalardaki deformasyonların sonucunda oluşur (Şekil 7). Bu tekerlek izi tipi en fazla çıkış eğimli yollarda, kavşak yaklaşımlarında, ağır taşıtların hızlarını düşürdüğü bölgelerde ve kurbalarda görülmektedir (Kutluhan ve Ağar, 2009).



Şekil 7. Akma tekerlek izi (Kutluhan ve Ağar, 2009)

Aşınma tekerlek izi, yüzeydeki agrega danelerinin aşınması ile oluşan tekerlek izidir (Şekil 8). Genellikle çivili tekerleklerin kullanıldığı kuzey Avrupa ülkelerinde görülür.

Oturma tekerlek izi, kaplama inşası sırasında sıkıştırmanın yetersiz olmasıyla trafik yüklerinden gelen gerilmeler ile oluşan oturmalar sonucunda bu iz oluşur (Şekil 8). Bu iz aşınma tekerlek izi ile aynı şekle sahip olmakla beraber bu iki tip tekerlek izi yüzeysel tekerlek izi sınıfına girmektedir (Kutluhan ve Ağar, 2009).



Şekil 8. Aşınma ve oturma tekerlek izi (Kutluhan ve Ağar, 2009)

#### 1.4.2.1.2. Bölgesel Çökme (Oturmalar)

Yolun belli kesimlerinde 0,5-2,0 m yarıçaplı dairesel ya da dairesel şekle yakın boyutlu çökme ve oturma şeklinde görülen deformasyonlardır. Yetersiz sıkıştırma, aşınma tabakasının parçalanması, kaplamanın su içeriğindeki fazla artış, aşırı segregasyon vb.



nedenlerle kaplamada bu çökme ve oturmalar oluşur (Şekil 9 ve 10). Bölgesel deformasyon olmalarından ötürü kaplama tamirinin yapımı kolay ve mümkündür (Tunç, 2004).



Şekil 9. Kaplama bölgesel çökme (URL-5, 2019)



Şekil 10. Kaplamada oturma (URL-6, 2019)

#### 1.4.2.1.3. Ondülasyonlar

Bitümlü sıcak karışımların stabilitesinin yetersiz olmasıyla kaynaklanan trafik akışının olduğu doğrultuda kaplamada dalgaya benzer şekilde oluşan deformasyonlardır (Şekil 11). Ayrıca aşırı bitüm, binder tabakasının yetersizliği, yüksek penetrasyon derecesine sahip asfalt ondülasyonların yani dalgalanmaların oluşumuna sebebiyet verebilir. Bölgesel olduklarından dolayı tamir edilmeleri mümkündür (Umar ve Ağar, 1991; Tunç, 2004).



Şekil 11. Kaplamada ondülasyon oluşumu (URL-6, 2019)

#### 1.4.2.2. Çatlamlar

Kaplama üzerinde trafik yükleri, çevre ve iklim etkisi ile farklı şekillerde, boyutlarda ve derinlikte oluşan kusurlardır. Çatlaklar genel olarak bakıldığında stabilite, yansıma ve yorulma çatlakları olarak sınıflandırılabilir. Stabilite çatlakları, trafik yüklerinin kaplamanın altında oluşturduğu çekme gerilmelerinin kaplamanın çekme mukavemetini aşması sonucunda kaplamanın altından başlayarak zaman geçtikçe yüzeye doğru çıkması ile oluşur. Bu çatlaklar yapısal çatlaklardır. Yorulma çatlakları, ağır trafik yükü tekrarı ile kaplamanın yorulma dayanımını aşması ile oluşur. Yansıma çatlakları, hasar görmüş bir esnek ya da rijit kaplamanın üzerine takviye tabakası yapıldığında veya yarı rijit bir temel tabakası üzerine yapılan esnek kaplamada veya kaya zemin üzerine yapılmış esnek kaplamalarda oluşmuş çatlamların trafik yükleri ve çevresel faktörlerin etkisi ile yaklaşık olarak 45°'lik açı ile en üstteki tabakaya kadar ilerlemesi yani alt kısımlardaki çatlakların yüzeye yansıması sonucu oluşmaktadır (Tunç, 2004).

Çatlak çeşitleri; Timsah sırtı çatlaklar, kenar çatlaklar, derz çatlakları, kayma çatlakları, büzülme çatlakları, enine çatlaklar, yansıma çatlakları, düşük sıcaklık çatlaklarıdır.

Timsah sırtı çatlak, timsah sırtı, kümes teli ya da bal peteği görünümüne benzer şekilde farklı boyutlarda bloklar halinde kaplamada oluşan çatlaklardır (Şekil 12). Timsah sırtı çatlaklar, oturmaldan veya yorulma dayanımının aşılmasından dolayı oluşmaktadır. Yorulma çatlakları önce kılcal çatlaklar olarak düzensiz bir şekilde oluşup, trafik yüklerinin etkisiyle çatlak büyür enine çatlaklar ile birleşir ve timsah sırtı görünümünü alırlar. Oturmaldan dolayı oluşan çatlaklar sivri köşeli ve büyük, yorulmadan dolayı oluşan çatlaklar genellikle üniform ve küçüktür (Tunç, 2004).



Şekil 12. Timsah sırtı çatlaklar (URL-7, 2019)

Kenar çatlakları, banket kenarından 30-50 cm içeride boyuna sürekli bir çatlak ile beraber banketlere doğru dallanma şeklinde olan veya olmayan yanıl kılcal çatlamlar ya da kaplama ve banket arasında belirginleşen derin, geniş çatlamlar şeklinde iki farklı tipte oluşabilirler. Kaplamanın banket tarafında, 30-50 cm içerisinde sürekli ve boyuna kenar çatlağı genelde banketin yanıl destek yetersizliğinden, banket drenajının yetersizliğinden dolayı ortaya çıkan don kabarması ve büzülme gibi hacim değışiklikleri vb. nedenlerle oluşurlar (Şekil 13). Kaplama ve banket arasında oluşan kenar çatlağı ise drenajın yetersiz olması, kaplamanın oturma yapması, kaplama ve banket arasındaki nem farklılığının oluşturacağı üniform olmayan stabilite vb. nedenlerle oluşur (Tunç, 2004).



Şekil 13. Kenar çatlağı (URL-5, 2019)

Enine çatlaklar, yol eksenine dik olarak oluşan köprü yaklaşımalarında, drenaj yapılarının civarında görülen çatlama şeklidir (Şekil 14). Sanat yapıları çevrelerinde yetersiz sıkıştırma, uygunsuz dolgu yapımı vb. nedenler bu çatlakların oluşmasına

sebebiyet vermektedir. Yolun tüm kesitinde görülen ince ve kılcak birbirine yakın ancak uniform olmayan çatlaklardır (Tunç, 2004).



Şekil 14. Enine çatlak (URL-8, 2019)

Derz çatlağı, kaplama inşaatı sırasında finişerlerin şeritler halinde serilmesiyle boyuna ve serimlerin gün sonunda tamamlanması ile diğer günlerde devam eden serimlerde enine oluşan ek yerleri yani derzlerin sıkıştırmaya uygun olmamasıyla oluşurlar (Tunç, 2004).

Büzülme çatlağı (Blok çatlaklar), bu çatlaklar birbiriyle alakalı olup dar açılı ve sivri köşeli büyük boyutlu blok şeklindedirler (Şekil 15). Zeminde veya temelde meydana gelen hacim değişikliklerinden oluşurlar. Ayrıca trafik hacminin düşük olması büzülme çatlaklarındaki artış daha fazla olmaktadır (Tunç, 2004).



Şekil 15. Blok (Büzülme) çatlakları (URL-5, 2019)

Düşük ısı çatlakları, soğuk havalarda kaplamanın büzülmesiyle oluşan büzülme çatlaklarından farklı bir şekilde kendini gösteren, kaplama yüzeyinde ve kaplama kalınlığı

boyunca oluşan çatlak olarak iki sınıfa ayrılırlar. Düşük ısı çatlaklarındaki en önemli nokta, asfaltın penetrasyon derecesi ve ısıya karşı duyarlılığıdır. Soğuk havanın hâkim olduğu yerlerde yumuşak ve ısıya az duyarlı asfalt kullanımı çatlakların azaltılmasına ya da geciktirilmesine fayda sağlar (Tunç, 2004).

### **1.4.2.3. Ayrışmalar**

Aşınma tabakasının trafik yükleri ve çevresel faktörlerin etkisi ile zaman içinde küçük parçaların ayrışması ve bunun akabinde kaplamada kopma ve parçalanma gerçekleşip, agregada danelerinin koparak ayrılmasıyla oluşurlar. Düşük kaliteli malzeme kullanımı, homojen olmayan karışım, asfaltın belirli bir adezyona sahip olmaması ve asfaltın penetrasyon derecesinin fazla olması gibi nedenlerle ortaya çıkarlar (Tunç, 2004). Ayrışmalar, sökülmeler ve soyulmalar olarak iki tipte ele alınabilir.

Sökülmeler, agregaların kenarlardan içeri doğru ya da yüzeyden alt taraflara doğru zamanla yüzeyden kopma yoluyla ayrılmasıdır. Yetersiz sıkıştırma, kirli ve çürük agregada kullanımı, asfalt betonunun plente aşırı ısıtılması, nemli ve soğuk havada inşaatı gibi nedenlere bağlı olarak oluşurlar (Umar ve Ağar, 1991).

Soyulmalar, agregada tanelerini tamamen saran ince film şeklindeki asfaltın su, trafiğin mekanik etkisi ve çeşitli nedenlerle agregadan ayrılması ve agregada danelerinin çıplak ve serbest kalması sonucu oluşurlar (Umar ve Ağar, 2004).

## **1.5. Bitüm**

Bitüm, doğal kökenli ya da pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da her ikisinin bir birleşimi olup katı, yarı katı ve sıvı halde bulunabilen metal-dışı türevleri ile bir arada bulunan, yapıştırıcı özelliğe sahip karbon disülfürde tamamen çözünebilen maddeye denir. Bitümlü bağlayıcılar temel olarak iki çeşittir. Bunlar; asfaltlar ve katranlardır. Asfaltlar kendi aralarında doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılır. Doğal asfaltlar, kendi içinde mineral maddelerle karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltlarıdır. Yapay asfaltlar, ham petrolün damıtılmasıyla elde edilir. Katran, kömürün ya da odunun kapalı bir sistem içinde kuru bir şekilde damıtılmasıyla elde edilip arıtılmasıyla kullanıma hazırlanır (Orhan, 2012).

Ham petrolden bitüm elde edilmesi görsel olarak Şekil 16’ da belirtilmiştir.





uygulanma süresi ve bu süredeki sıcaklığa bağlıdır. Ayrıca viskozite reoloji biliminin temel konularından biridir. Viskozite, iki molekül tabakanın birbiri üzerindeki hareketlerine karşı gösterdikleri dirence denir. Bitümlü karışımlar viskoelastik özellik gösteren malzemelerdir (Kizirgil, 2013; Sybilski, 1994).

## **1.6. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler**

Bitümlü bağlayıcıların özelliklerinin belirlenmesi için Karayolu teknik şartnamesinde yer alan geleneksel bitüm deneyleri ile asfalt kaplama performansını ölçmek için yüksek performanslı asfalt kaplama yani superpave deneyleri uygulanmaktadır.

### **Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Deneyler**

- Penetrasyon deneyi
- Yumuşama noktası deneyi
- Özgül ağırlık deneyi
- Düktilite deneyi
- Frass kırılma noktası deneyi
- Parlama noktası deneyi
- Çözünürlük deneyi
- İnce film halinde ısıtma deneyi (TFOT)

### **Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Superpave Deneyler**

- Dönel viskozimetre deneyi (RV)
- Dinamik kayma reometresi deneyi (DSR)
- Kiriş eğme reometresi deneyi (BBR)
- Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT)
- Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi (PAV)

## **1.6.1. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler**

### **1.6.1.1. Penetrasyon Deneyi**

Bitümün sertliğini veya kıvamının belirlendiği deneydir. 100 gr ağırlığında standart iğnenin 25° C sıcaklıkta belirli bir sürede (5 sn) asfalt çimentosu yüzeyine dikey olarak

battığı mesafenin 0,1 mm cinsinden değeridir. Penetrasyon değerinin artmasıyla bitüm yumuşar, kıvamlılığın artmasıyla bitüm sertleşir (Orhan, 2012).



Şekil 17. Penetrasyon deney düzeneği (URL-10, 2019)

#### 1.6.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi

Bitümün sıcaklık değişimine karşı duyarlılığını ve akmaya başladığı sıcaklığı ölçüldüğü deneydir. Belirli bir kalınlık ve çapa sahip halka içine ısıtılıp akıcı halde yerleştirilen bitüm üzerine belirli standartta çap ve ağırlığa sahip bilyelerin bırakılarak numuneler su içerisinde ısıtılmaktadır. Deneyin başlangıcında 5° C sıcaklığa sahip numunelere deney süresince dakikada 5° C sıcaklık artırımları yapılır. Bitüm içerisindeki bilyelerin tabana değdiği andaki sıcaklık değeri yumuşama noktası değeri olarak belirlenir (Karakaş, 2014; Orhan, 2012).



Şekil 18. Yumuşama noktası deney düzeneği (URL-11, 2019)



### 1.6.1.3. Özgül Ağırlık Deneyi

Bitüm özgül ağırlığı, 25° C sıcaklıkta bitümün belli hacimdeki ağırlığı ile aynı hacimdeki su ağırlığına oranıdır. Bu deneyde piktometre metodu uygulanarak, boş piktometre kabı tartılıp sonrasında su ile doldurulmuş piktometre kabı tartılır. Bu adımlardan sonra boş piktometre kabına yaklaşık yarısı kadar bitüm koyulur ve tartılır. En son adım olarak yarıya kadar bitümle dolu olan kap su ile tamamen doldurulur ve tartılır. Bu tartımlar sonucunda bitüm özgül ağırlığı belirlenir. Özgül ağırlık hesabı Formül 1.6.1' de belirtilmiştir (Yılmaz, 2016; Orhan, 2012).

$$\text{Özgül ağırlık} = D_p = \frac{C - A}{B - A - (D - C)}$$

A: Boş piktometre kap ağırlığı, gr

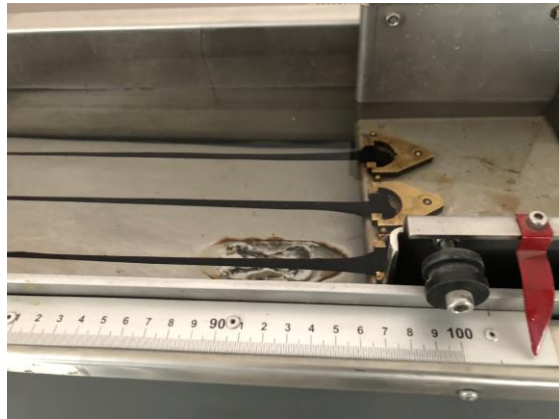
B: Su ile dolu piktometre kap ağırlığı, gr

C: Yarıya kadar bitümle dolu piktometre kap ağırlığı, gr

D: Su, Bitüm ve piktometre kap ağırlığı, gr

### 1.6.1.4. Düktilite Deneyi

Bitümün çekilebilmesi ve uzaması özelliğine düktilite denilir. Bitümden oluşan briketlerin 25° C sıcaklıkta su ile dolu bir cihaz içinde belirli bir hızda (5 cm/dk) kopmadan uzayabildiği değerin cm olarak değerine düktilite değeri denilir (Şekil 19). Bu değer bitümün bağlanma performansını gösterir. Düktilite değeri yüksek olan bitümlerin bağlayıcılık özellikleri de yüksek olmaktadır (Yılmaz, 2016).



Şekil 19. Düktilite deney düzeneği

### 1.6.1.5. Frass Kırılma Noktası Deneyi

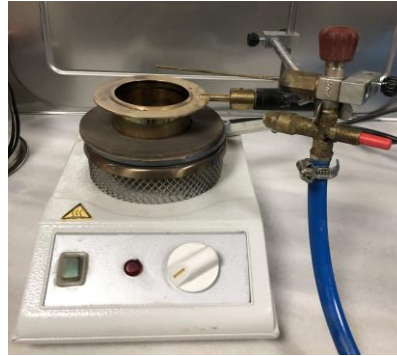
Bitümlerin düşük sıcaklık performansının belirlenmesi için yapılan deney, belirli bir kalınlığa sahip bitümün film şeklinde metal bir plakanın üstüne serilip plakanın sabit hızda soğutulmasıyla bitümde ilk çatlakın oluştuğu sıcaklık değeri alınır (Şekil 20). Bu sıcaklık değeri (°C) frass kırılma noktasını ifade eder. Genellikle soğuk bölgelerde kullanılacak bitümler için uygulanan bir deneydir (Yılmaz, 2016; Orhan, 2012).



Şekil 20. Frass kırılma noktası deney düzeneği (URL-12, 2019)

### 1.6.1.6. Parlama Noktası Deneyi

Parlama noktası, maddenin buharına alev temas ettiği anda parladığı fakat yanmanın gerçekleşmediği en düşük sıcaklıktır. Bitümlere açık kap deneyi yapılarak parlama noktası tayin edilir (Şekil 21). Bu deney düzeneğinde ısıtılan numunenin yüzeyine yakın bir kıvılcım atılması ile parlamanın gerçekleştiği andaki sıcaklık değeri parlama noktası değeri olarak alınır (Yılmaz, 2016; Orhan, 2012).



Şekil 21. Parlama noktası deneyi

### **1.6.1.7. Çözünürlük Deneyi**

İçeriğinde mineral madde bulundurmeyen veya çok az da olsa bulunduran bitümlerin organik çözücüler (trikloretilen, karbon sülfür, benzen vb.) içinde çözünürlüğünün belirlenmesinde uygulanan deneydir. Triklöretilen de çözünen bitümlerin en az %99 oranında çözünmesi gerekir (Orhan, 2012).

### **1.6.1.8. İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (TFOT)**

Bitümlerin agrega ile karıştırıldığında gerçekleşen yaşlanmaya karşı direncini belirleyen bu deneyde tepsi şeklindeki kap içine dökülen ve 3.2 mm kalınlığındaki bitüm numuneleri deney düzeneğinde dakikada yaklaşık 5-6 devir hızla döndürülerek 163° C sıcaklıkta 5 saat tutulur. Deney sonunda numunelerdeki ağırlık kayıpları tartılarak ölçülür (Yılmaz, 2016).

## **1.6.2. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Superpave Deneyleri**

Kaplamalarda trafik yükleri ve çevresel etkilerle birlikte meydana gelen kalıcı yer değiştirmeler, yorulma ve düşük sıcaklık çatlaklarının tayin edilmesi, azaltılması ve bununla birlikte performanslarının artırılması için superpave deneyleri tasarlanmıştır. Deneyler bitümün sahadaki performans ve davranışlarını ölçmek için kullanılmaktadır.

### **1.6.2.1. Dönel Viskozimetre Deneyi (Rotational Viscosimeter, RV)**

Bitümün yüksek sıcaklıktaki işlenebilirlik ve pompalanabilirlik performansını belirlemek için dönel viskozimetre deneyi yapılmaktadır. Brookfield viskozimetresi kullanılarak AASHTO TP48 standardına uygun bir şekilde deneyler yapılır. Yüksek sıcaklıktaki viskozimetre değeri, bitümlü sıcak karışım hazırlanırken bitümün akışkanlık derecesinin uygunluğunun belirlenmesi içindir. Deney saf bitüme ve modifiye edilmiş bitümlere uygulanabilmektedir. Bitümden alınan numune 150° C sıcaklıktan daha az sıcaklıkta ısıtılarak akışkan hale geldiğinde 11 gr bitüm tüp içine boşaltılır. Sabit sıcaklıkta yaklaşık 15 dk bekletildikten sonra deneye başlanır. Viskozimetre değeri, 135° C sıcaklıkta bitüm içerisinde 20 rpm hızında dönen milin dönmeye karşı gösterdiği direnç ile elde edilir

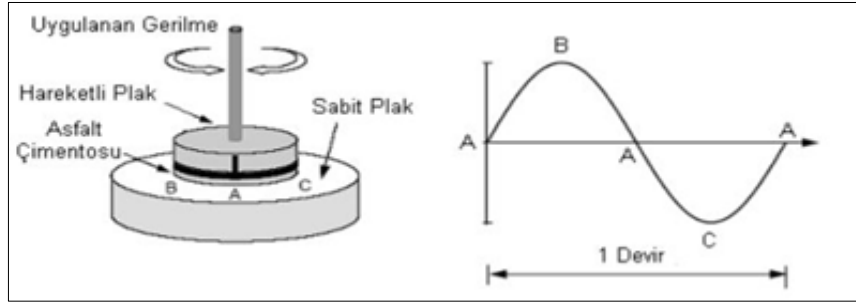
(Şekil 22). Ölçülen değerin superpave şartnamesi sınırları dahilinde 3 Pa.s' yi aşmaması gerekir. Deney sonucunda yaklaşık olarak eşit viskozite okumaları alındığında okunan 3 değerin ortalaması alınarak viskozite değeri belirlenir ve bu değer karışımların sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıklarının tespit edilmesinde kullanılır (Yılmaz, 2016).



Şekil 22. Dönel viskozimetre deney aleti

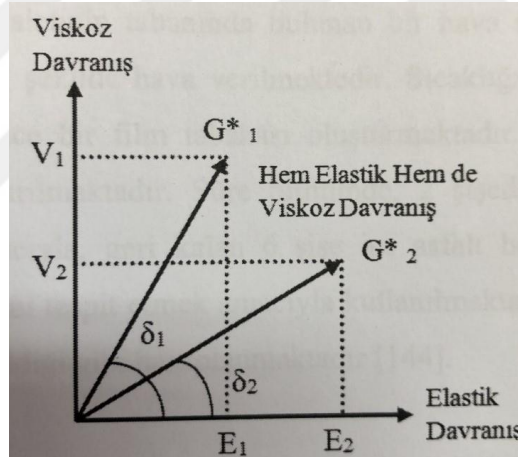
#### 1.6.2.2. Dinamik Kayma Reometresi Deneyi (Dynamic Shear Rheometer, DSR)

Bitümün tekerlek izi ve yorulma çatlaklarına karşı gösterdiği direnci ve aynı zamanda orta ve yüksek sıcaklık özelliklerini belirlemek için yapılan deneydir. Yaşlandırılmamış ve RTFOT yöntemi ile yaşlandırılan bitümler tekerlek izi dayanımlarını incelemek için kullanılırken PAV yöntemiyle yaşlandırılan bitümler ise yorulma dayanımının belirlenmesinde kullanılır. Dinamik kayma reometresi deneyinde sabit alt plaka ve hareketli üst plaka arasına bitüm yerleştirilir. Hareketli olan üst plaka Şekil 23' de belirtildiği gibi A noktasından başlayarak sırasıyla B, A, C, A noktasına hareket eder bu hareketler toplamına devir denilir. Deneyin dönme frekansı yaklaşık olarak 1.59 devir/sn olup ön şartlandırma yapıldıktan sonra 10 devir sonunda standart deney uygulanmış olur.



Şekil 23. DSR deney düzeneği ve hareket adımları (URL-13, 2019)

DSR deneyinde, belirlenen faz açısı ( $\delta$ ) ve kompleks kayma modülü ( $G^*$ ), elastik ve viskoz davranışını belirlemektedir (Şekil 24). Faz açısı ve kompleks kayma modülü değerleri bitümün yükleme hızı ve sahip olduğu ısı ile büyük derecede değişmektedir. Faz açısı arttıkça asfalt bağlayıcı viskoz davranışa yönelmektedir.



Şekil 24. Bitümün viskoelastik özelliği (URL-14, 2019)

Tekerlek izi dayanımı, DSR deneyinden elde edilen faz açısı ve kompleks kayma modülü kullanılarak  $G^*/\sin\delta$  değeri ile belirlenir. Bu değer orijinal bitümlerde en az 1 kPa, RTFOT yöntemi ile yaşlandırılmış bitümlerde ise en az 2.2 kPa olmalıdır. Ayrıca  $G^*/\sin\delta$  değerini sağlayan yüksek sıcaklık değeride bitümün yüksek sıcaklık performansını temsil etmektedir (Yılmaz, 2016).

### 1.6.2.3. Kiriş Eğme Reometresi Deneyi (Bending Beam Rheometer, BBR)

Kiriş eğme reometresi deneyi, özellikle iklimin soğuk olduğu yerlerde düşük ısı çatlaklarının belirlenmesi için tasarlanmıştır. Bu deney ile bitümün belirli sıcaklık ve sabit yük etkisi altında sünme ya da defleksiyon özelliklerini belirlemektedir. BBR deneyi 12.5x25x6.25 mm boyutlarındaki kiriş tipindeki bitüm çubuğunun sabit ve tekil  $980 \pm 5$  mN kuvvet ile 4 dakika boyunca kirişin ortasındaki defleksiyon ölçülür ve sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m) bulunur (Şekil 25). Bitümün sünme gerilmelerine gösterdiği direnç sünme sertliğidir. Sünme sertliğinin yükleme boyunca değişimi ise sünme oranıdır. Superpave şartname sınırları dahilinde 60 sn yükleme süresince sünme sertliği en fazla 300 MPa olabilir. Farklı zamanlardaki sünme sertlikleri ölçüldüğünde ortaya çıkan eğride 60. Saniyeye tekabül eden teğetin eğimi m değerini verir. Isıl gerilmeler devam ettiği sürece sertliğin değişeceğinden ötürü yüksek m değeri seçilmelidir. Bu değerlerde kaplamada çekme gerilmelerini azaltıp, termal çatlak oluşumunu engelleyecektir (Yılmaz, 2016).



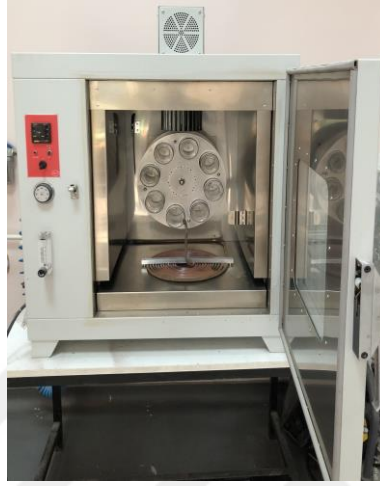
Şekil 25. Kiriş Eğme Reometresi deney aleti (URL-15, 2019)

### 1.6.2.4. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Rolling Thin Film Oven Test)

Bitümdeki uçucu maddelerin hava ve sıcaklığın etkisiyle kaybının tespit edilmesi, karışım ve yapım süresince kısa süreli yaşlanmasının belirlenmesi için Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) yapılır. RTFOT deneyi AASHTO T240 ya da ASTM D2872 şartnameleri standartlarına göre yapılmaktadır. Deney,  $163^{\circ}$  C sıcaklıkta 35 gr bitüm içeren 8 adet şişenin düşey ekseninde 15 devir/dk hızda 75 dakika boyunca döndürülmesiyle tamamlanır (Şekil 26). Dönme sırasında yaşlanma oluşması için şişelere alttan hava üfleyiciyle sıcak hava verilir. Deney sonunda numunelerden 2 tanesi kütle

kaybının ölçülmesi geri kalan 6 tanesi ise bitümün yaşlanma sonrası fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır (Yılmaz, 2016).Kütle kaybı Formül 2' de verilmiştir.

$$\text{Kütle kaybı, \%} = \frac{(\text{İlk Kütle} - \text{Son Kütle})}{\text{İlk Kütle}} * 100 \quad (2)$$



Şekil 26. RTFOT deney aleti

#### 1.6.2.5. Basınçlı Yaşlandırma Kabı Deneyi (Pressure Aging Vessel, PAV)

Kaplamada zamanla meydana gelen uzun süreli yaşlanmanın laboratuvar ortamında incelenebilmesi için geliştirilen ve RTFOT deneyi sonucunda elde edilen bitümlere uygulanan deneydir. Deneyde RTFOT deneyinden elde edilen bitümler 50 gr ağırlığında alınarak numuneler oluşturulur. Bu numunelere bitüm sınıflarına göre 90° C, 100° C, 110° C sıcaklıkta 20 saat süresince 2070 kPa değerinde basınç uygulanır. Tablo 3'de bitüm sınıflarına göre deney sıcaklıkları, deney düzeneği ise Şekil 27'de verilmiştir.

Tablo 3. Bitüm sınıfına göre PAV uygulama sıcaklıkları

Bitüm Sınıfı	PAV Deney Sıcaklığı (° C)
PG 46-Y	90
PG 52-Y	90
PG 58-Y	100
PG 64-Y	100
PG 70-Y	100-110
PG 76-Y	100-110
PG 82-Y	100-110



Şekil 27. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deney aleti

### 1.7. Bitüm Modifikasyonu

Bitüm modifikasyonu, esnek yol üstyapılarında bitümlü sıcak karışımların içinde bulunan bitümün özelliklerini iyileştirmek ve performansını arttırmak için çeşitli katkıların bitüme farklı oranlarda katılıp karıştırılmasıdır (Malkoç, 2002).

Esnek yol üst yapıları teknik şartlara uygun bir tasarım ve yapım şartları gözetilerek inşa edilse de zaman içerisinde trafik yükleri, iklim koşulları ve çevresel etkilerle üstyapılarda bozulma gerçekleşmektedir. En sık karşılaşılan bozulmalar tekerlek izi ve çatlaklar olup bu deformasyonlar üzerinde bitümün davranışı çok önemli rol oynar. Bozulmaların önlenmesi, kaplama ömrünün uzatılması ve kaplama performansının artırılması için farklı çeşitlerde katkı maddeleri bitüme katılarak modifiye edilmeleri üzerine çalışmalar zamanla artmıştır. Bitüm modifiyesinin genel amacı, yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyona karşı kaplamanın daha dirençli, düşük sıcaklıklarda ise çatlama ve kırılmaya karşı kaplamanın dirençli olmasını sağlamaktır (Yılmaz, 2016).

Bitümün modifiye edilmesinin sebepleri genel olarak sıralanacak olursa;

- Kalitesi düşük bitümlerin özelliklerini iyileştirerek verimini arttırmak,
- Kaplama performansını arttırmak,
- Kaplamanın işlenebilirlik ve sıkışabilirliğini geliştirmek,
- Karışım stabilitesi ve mukavemetini arttırmak,
- Kaplama kuma ya da terlemesini azaltmak,
- Bitümün yaşlanmaya karşı direncini arttırmak,
- Karışımın yorulma direncini arttırmak,
- Bitüm ve agrega arasındaki adezyonu arttırmak,



- Zayıf agregaların verimini arttırmak,
- Çatlak oluşumlarını geciktirmek.

### 1.7.1. Bitüm Modifiyesinde Kullanılan Katkı Maddeleri

Bitüm modifikasyonunda pek çok farklı katkı maddeleri kullanılmış olup Tablo 4'te gruplandırılarak belirtilmiştir.

Tablo 4. Bitüm modifiyesinde kullanılan katkı maddelerinin gruplandırılması (İlçali vd., 2001)

Katkı Tipleri	Katkı Maddeleri		Bitüm Kıvamına Etkileri
Filler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineral Filler (Taş tozu, Kireç, Portland Çimentosu, Uçucu Kül)</li> <li>• Karbon Siyahı</li> <li>• Sülfür</li> </ul>		Sertleştirme
Genleştirici (Extender)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sülfür</li> <li>• Odun Özü (Lignin)</li> </ul>		Sertleştirme
Elastomerler (Polimer Grubu)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Doğal Kauçuk</li> <li>• Yapay kauçuk</li> <li>• Stiren-butadien (SBR)</li> <li>• Stiren-butadien-stiren (SBS)</li> <li>• Dönüştürülmüş Kauçuk</li> <li>• SEBS</li> <li>• EPDM</li> </ul>		Elastiklik, Sertleştirme
Termoplastikler (Polimer Grubu)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polietilen</li> <li>• Polipropilen</li> <li>• Etilen Vinil Asetat (EVA)</li> <li>• Polivinil Klorür (PVC)</li> <li>• Asetaller</li> <li>• Akrilikler</li> <li>• Floroplastikler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polisülfid</li> <li>• Polikarbonat</li> <li>• Polifenilen eter</li> <li>• Polistiren</li> <li>• Poliamidler</li> <li>• Polisülfon</li> <li>• Poliüretan</li> </ul>	Sertleştirme
Termoset	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alkitler</li> <li>• Epokisler</li> <li>• Kazein</li> <li>• Alil</li> <li>• Poliester</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aminoplastlar</li> <li>• Fenolikler</li> <li>• Dialilftat</li> <li>• Melamin</li> </ul>	Sertleştirme
Fiber	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Doğal Fiber (Asbest, Taşyünü)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yapay Fiber (Polipropilen, Fiberglas, Polyester)</li> </ul>	Sertleştirme
Oksidan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marganez Tuzu</li> </ul>		Sertleştirme
Antioksidan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kurşun karışımlar</li> <li>• Kalsiyum Tuzu</li> <li>• Karbon</li> </ul>		Yumuşatma
Hidrokarbon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yeniden kullanma yağlar</li> <li>• Gençleştirme yağları</li> <li>• Doğal asfaltlar</li> </ul>		Sertleştirme, Yumuşatma
Soyulma Önleyici	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kireç</li> <li>• Aminler</li> </ul>		Yumuşatma

Literatür incelendiğinde bazı katkı maddelerine bitüm modifiyesinde sıkça karşılaşılmış olup bu katkıların bitüm üzerindeki etkileri Tablo 5’te belirtilmiştir.

Tablo 5. Kullanımı yaygın olan bitüm üzerindeki etkileri (Ilıcalı vd., 2001)

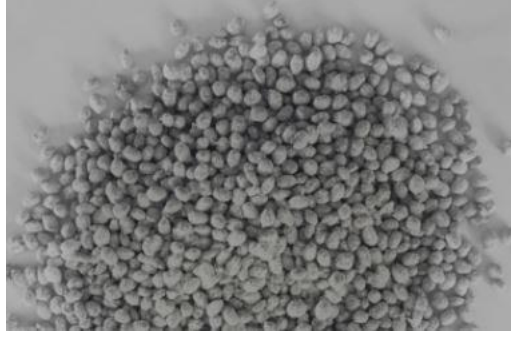
Katkı Maddeleri	Bitüm Üzerindeki Etkileri
Stiren-Butadien-Stiren (SBS)	Elastik geri dönüş, penetrasyon, yumuşama noktası, düşük sıcaklık
Yağ	Bağlayıcılık, penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, bitüm yapısı
Fiberler	Çatlama direnci, viskozite
Ataktik-Polipropilen (APP) Etilen-Vinil-Asetat (EVA)	Penetrasyon, yumuşama noktası, Frass kırılma noktası, sertlik
Filler tozu	Sertlik, mekanik sağlamlık, maliyet, yoğunluk, viskozite, yumuşama noktası

Bitüm modifiyesinde kullanılacak olan katkı maddelerinde belirli özellikler aranmaktadır (Ilıcalı vd., 2001);

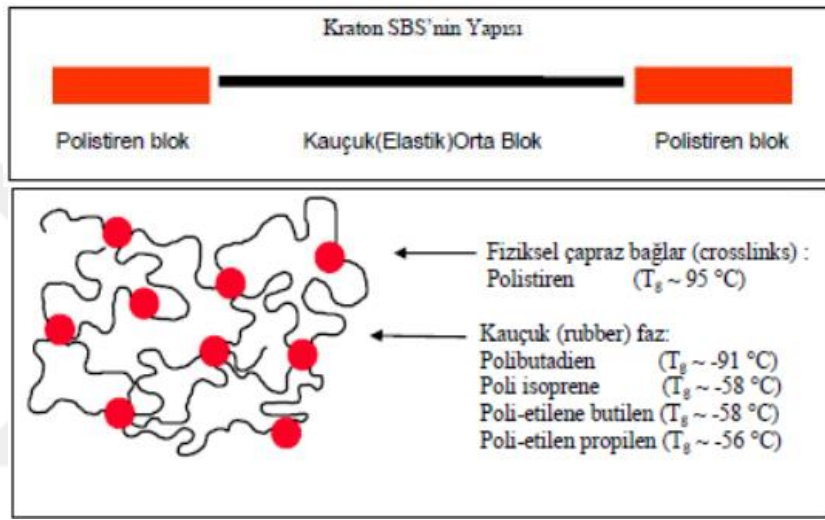
- Karışım maliyetinin artmaması için maliyeti uygun olmalı,
- Bitüm karıştırma sıcaklığında bozulmamalı,
- Bitüm ile homojen bir şekilde karışabilmeli,
- Temin edilebilirliği kolay olmalı

#### 1.7.1.1. Stiren-Butadien-Stiren (SBS)

Petrokimya türevi olan sentetik kauçuk madde ailesi Stiren-Butadien-Stiren kısaltması SBS, 1960’lı yıllarda Shell firması tarafından geliştirilmiş geçmişten günümüze su yalıtım membranı, polimer, bitüm modifiyesi ve yapıştırıcı maddeler gibi birçok farklı alanda kullanılan üründür (Şekil 28). SBS, yaklaşık 30 yıldır esnek kaplamalarda kullanılmakta olup her geçen gün kullanımı artmaktadır. Ticari adı Kraton D 1101 olan SBS polimerinin yapısı lineer olup Şekil 29’ de görülmektedir (Karakaş, 2014).



Şekil 28. SBS polimeri (URL-16, 2019)



Şekil 29. SBS polimerinin yapısı (Karakaş, 2014)

Bitümün SBS ile modifiye edilmesi, SBS'in bitüm içinde çözünmesi olayı olmakla birlikte bu çözünme süresince kimyasal bir reaksiyon gerçekleşmez (Şekil 35). SBS ilavesi ile üç boyutlu oluşan ağ yapısı viskoelastik bir yapı oluşmasını sağlamakla birlikte yüksek sıcaklıktaki karışım kıvamı artar, düşük sıcaklıklarda ise kırılabilirlik azalır (Girdap, 2017).

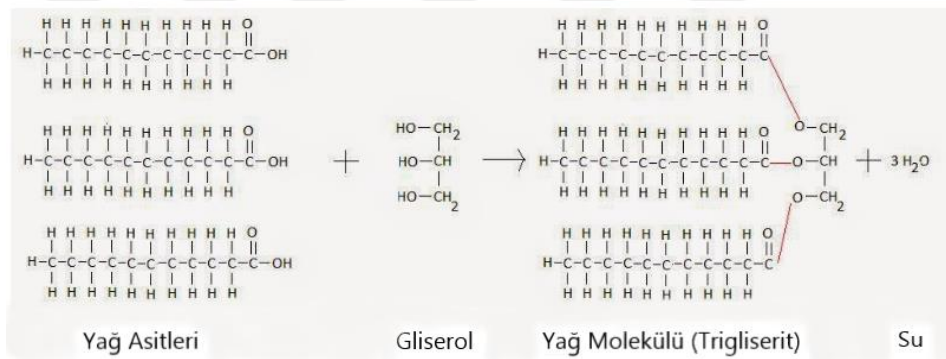
### 1.7.1.2. Bitkisel Atık Yağ

Ülkemizde her yıl 1,7 milyon ton bitkisel yağ tüketimi olmakla birlikte yağ rafinasyon süreci ve elde edilen yağın tüketimi sonucunda yaklaşık 350 bin ton bitkisel atık yağ oluştuğu tahmin edilmektedir. Bu atık yağların nütürleştirme yöntemi ile her türlü kirletici, oksidan ürünler ve partiküllerin giderilerek uluslararası ve ulusal şartnamelere

uygun kullanım amacına bağlı olarak yağlar elde edilir. Bu yağlar ise biodizel üretiminde, sabun, biogaz gibi maddelerin üretiminde kullanılabilir (ÇYGM, 2010).

Bitkisel atık yağların çevreye olan zararından ötürü yeniden kullanıma kazandırılmaya çalışılmaktadır. Bu sayede sürdürülebilirlik konusunda önemli bir yere sahip olan bitkisel atık yağlar farklı alanlarda tekrardan kullanılması ile doğaya atık olarak bırakılmaktansa yeni kullanım alanları oluşturulmaktadır. Bitkisel atık yağlar ilgili kuruluşlarca toplatılmakta ve belirli bölgelerde depo edilmektedir. Bu sayede ulaşılması çok kolay olan bu yağlar, maliyet yönünden de bakıldığında hesaplı olmaktadır.

Yağlar, yağ asitlerinin gliserin ile esterleşerek oluşturduğu trigliseritlerdir (Şekil 30). Yağın yaklaşık %95-96'sını trigliseridler, %1-5'ini monogliseridler ve digliseritler, serbest yağ asitleri, yağda çözünen vitaminler, steroller ve diğer maddeler oluşturmaktadır.



Şekil 30. Yağın Molekül Yapısı (URL-17, 2019)

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

SBS modifiyeli bitüme %1, %3, %5, %7, %9 oranlarında bitkisel atık yağ ilave edilerek bitümün modifiye edilmesi ve asfalt kaplamannın mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve incelenmesi kapsamında bu araştırmada kullanılan malzemeler ve uygulanan deneylerle birlikte izlenen metot aşağıdaki gibidir.

Kullanılan Malzemeler:

- %5 SBS modifiyeli bitüm
- Bitkisel Atık Yağ (Arıtılmış Evsel Atık Yağ)

İzlenen Yöntem:

a) Fiziksel ve Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi İçin Uygulanan Deneyler:

- Penetrasyon
- Yumuşama Noktası
- Düktilite
- Parlama Noktası
- Özgöl Ağırlık
- Trikloretilende Çözünürlük
- Nicholson Soyulma
- DSR
- RTFOT
- RV
- PAV

### 2.1. Modifiye Bitümün Hazırlanması

%5 oranında Stiren-Butadien-Stiren (SBS) ilave edilerek hazırlanan modifiyeli bitüm, PMB 76/16 sınıfında olup İSFALT A.Ş. Habipler Şantiyesinden temin edilmiştir. Katkı maddesi olarak kullanılan Bitkisel atık yağ ise DEGAM YAĞ ve KİMYA SAN. LTD. ŞTİ. firmasından temin edilmiştir. SBS modifiyeli bitüm etüvde 180° C sıcaklıkta akışkan hale gelinceye kadar ısıtılmıştır. 600 ml' lik 6 adet behere 400 gr olacak şekilde ısıtılan bitümler beherlere dökülmüştür. Bu beherlerin her birine bitüm ağırlığının %1, %3,

%5, %7, %9 oranlarında sırasıyla 4 gr, 12 gr, 20 gr, 28 gr, 36 gr bitkisel atık yağ eklenerek, 150°C sıcaklıkta 1000 rpm hızında 30 dakika boyunca dört kollu mekanik karıştırıcı ile karıştırılarak modifiye bitüm üretimleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 31).



Şekil 31. Modifiye Bitüm Üretimi

## 2.2. Modifiye Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bitkisel atık yağ katkılı SBS modifiyeli bitümün fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, trikloretilende çözünürlük, duktilite, özgül ağırlık ve Nicholson soyulma deneyi yapılmış, reolojik özelliklerin belirlenmesi için ise DSR, RV, RTFOT ve PAV deneyleri yapılmıştır.

### 2.2.1. Penetrasyon Deneyinin Yapılışı

TS EN 1426 ve ASTM D5 standardına göre yapılan bu deney, modifiye bitümün kıvamını belirlemek için, 100 gr ağırlığındaki standart iğnenin 25°C sıcaklıkta bitüm numunesinin yüzeyinde 5 sn süresince battığı mesafe 0,1 mm cinsinden bulunmuştur (Şekil 32 ve 33).



Şekil 32. Bitümün su banyosunda 25°C sıcaklıkta bekletilmesi

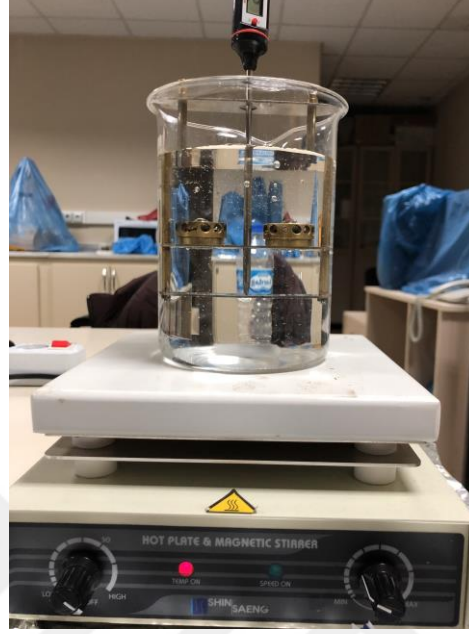


Şekil 33. Penetrasyon deneyinin yapılması

### 2.2.2. Yumuşama Noktası Deneyinin Yapılışı

TS EN 1427 ve ASTM D36 standardına göre yapılan bu deney, yüzük-bilye yöntemiyle modifiye bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetini ölçmek ve bitümün akmaya başladığı sıcaklığı belirlemek için yapılmıştır. Etüvde 150°C sıcaklıkta ısıtılıp akışkan hale gelen bitüm iki adet standart yüzüğün içerisine dökülüp fazlalıkları alındıktan sonra yüzüklerin üzerine standart bilyelerin koyulmasıyla su banyosu içerisine yerleştirilmiştir. Su banyosunda suyun sıcaklığı dakikada 5°C artırılarak ısıtmaya tabi tutulmuştur. Sıcaklıkla yumuşayan bitümün halkaları tutan aparatın alt kısmına değdiği andaki sıcaklık

değeri belirlenmiş ve belirlenen iki sıcaklık değerinin ortalaması alınarak yumuşama noktası sıcaklığı tespit edilmiştir (şekil 34).



şekil 34. Yumuşama Noktası Deney Düzeneği

### 2.2.3. Düktilite Deneyinin Yapılışı

Modifiye bitümün çekme ve uzama özelliğinin belirlenmesi için yapılan bu deneyde, akışkan hale gelecek kadar ısıtılan bitüm düktilite kalıplarına dökülüp 30 dakika boyunca oda sıcaklığında beklemeye alınmış bu süre sonunda ise yine 30 dakika boyunca 25° C sıcaklıkta su banyosunda bekletilmiştir. Su banyosundan alınan numuneler üzerlerindeki fazlalık bitümün kazılarak temizlenmesiyle tekrardan 25°C sıcaklıktaki su banyosunda 90 dakika bekletilmiştir (şekil 35). Bekletilme işleminin tamamlanmasıyla su banyosu iğerisinden alınan numuneler düktilite cihazında yerlerine yerleştirilip, dakikada 5 cm uzama ile çekilmeye başlanmış ve numunelerin incelik koptuğu zamana kadar bu çekme işlemi devam ettirilmiştir. Numunelerin uzama miktarların cm cinsinden değeri düktilite cihazının üzerindeki cetvel yardımıyla okunup bu okunan değerlerin ortalaması alınarak numunenin düktilite değeri belirlenmiştir (şekil 36).





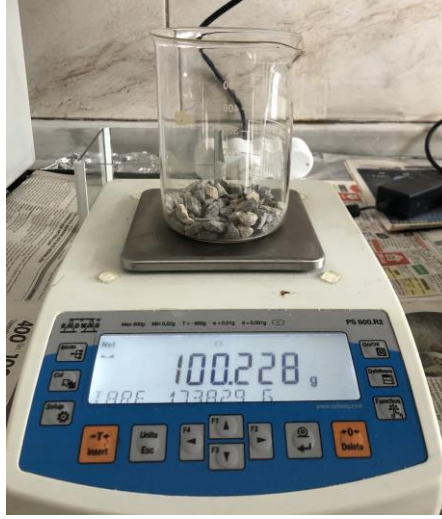
Şekil 35. Su Banyosunda Bekletilen Düktilite Numuneleri



Şekil 36. Düktilite Değerlerinin Ölçülmesi

#### 2.2.4. Nicholson Soyulma Deneyi Yapılışı

Nicholson soyulma deneyi, sıkıştırılma işlemi yapılmamış bitüm ve agreganın su etkisine karşı soyulma dayanımının belirlenmesi için yapılmıştır. 9.5-6.3 mm eleklerin arasındaki yıkanmış ve kurutulmuş halde olan agregadan 100 gr alınmıştır (Şekil 37). Alınan agreganın etüvde 60 dakika 150°C sıcaklıkta ısıtılmıştır. Isıtılan agreganın 5 gr ağırlığındaki bitüm ile bir beher içerisinde 2 dakika karıştırılıp karışım bir petri kabına yerleştirilmiştir. Petri kabı bir tepsiye koyulup üzerinde 3 cm su filmi oluşacak şekilde saf su doldurulmuştur. Bu işlem sonrasında içerisinde petri kapları bulunan tepsi etüvde 60°C sıcaklıkta 24 saat bekletilerek etüvden alınmıştır (Şekil 38).



Şekil 37. Yıkanmış ve kurutulmuş agrega



Şekil 38. Nicholson Soyulma Deneyi numunesi

### 2.2.5. Trikloretilende Çözünürlük Deneyinin Yapılışı

Modifiye bitümün organik çözücüler içerisindeki çözünürlüğünün belirlenmesi amacıyla yapılan bu deney, trikloretilen ile modifiye bitüm karıştırılmış ve bu karışım filtre kâğıdından geçirelerek çözünürlüğü incelenmiş ve çözünme miktarı belirlenmiştir (Şekil 39).



Şekil 39. Modifiye bitümün trikloretilende çözünmesi

### 2.2.6. Özgül Ağırlık Deneyi Yapılışı

Modifiye bitümün özgül ağırlığının belirlenmesi için piktometre yöntemi ile yapılan bu deneyde, öncelikle boş piktometre kabının ağırlığı ölçülmüş sonrasında piktometre tamamen su ile doldurulup tartılmıştır. Sonrasında boş piktometre yarısına kadar bitümle doldurulup oda sıcaklığına kadar soğutulup tartılmış, üzeri saf su ile doldurulup havası alındıktan sonra yaklaşık 25°C sıcaklıktaki su banyosunda 30 dakika bekletilip üzeri kurulandıktan sonra tekrar tartılmıştır. Alınan değerler ile özgül ağırlık belirlenmiştir.

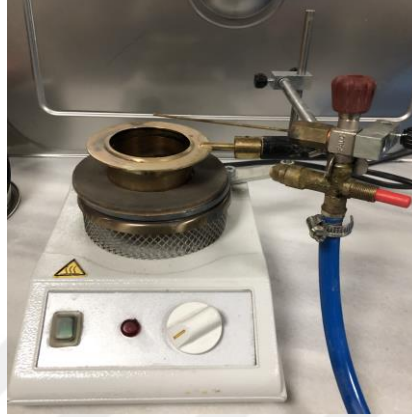


Şekil 40. Piktometre yöntemi ile tartım

### 2.2.7. Parlama Noktası Deneyi Yapılışı

TS EN ISO 2592 standardına göre yapılan bu deneyde, modifiye bitüm buharının alev kıvılcımı temasında geçici parladığı fakat yanmaya başlamadığı en düşük sıcaklığın belirlenmesi için yapılmıştır. Modifiye bitüm 150°C sıcaklıkta akışkan hale gelinceye kadar ısıtılmış sonrasında kap yüzeyine kadar doldurulmuştur. Sıcaklık hızı parlama

noktasına ulaşıncaya kadar dakikada 15°C sıcaklık olarak arttırılmış, parlama noktasına 28°C sıcaklık yaklaşıldığında ise bu hız dakikada 5°C sıcaklığa dūřürülmüřtür. Her 3°C sıcaklık artışında alev kıvılcımı (0.4 cm) numunenin üzerinden geerilerek denenmiştir. Numunede parlama görüldüğü anda termometre üzerinde okunan değer parlama noktası olarak kaydedilmiştir (şekil 41).



şekil 41. Parlama Noktası Deneyi düzeneği

### 2.2.8. RV Deneyinin Yapılışı

Bitümin yüksek sıcaklıkta akışkanlık özelliğinin belirlenmesi için yapılan bu deney, Brookfield DV2T marka dönel viskozimetre deney cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (şekil 42). Akışkan kıvama gelinceye kadar karıştırılan bitüm silindirik numune kalıplarına dökülüp cihazın içerisine yerleştirildikten sonra sırasıyla 90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklarda viskozite değerleri tespit edilmiştir. Bitüm numunelerinden 135°C ve 165°C sıcaklığındaki viskozite değerleri viskozite ve sıcaklık grafiğinde belirlenerek 170±20 cP ve 280±30 cP değerlerine karşılık gelen bitümlü sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının aralıkları tespit edilmiştir.



Şekil 42. Dönel Viskozi metre deney düzeneği

### 2.2.9. DSR Deneyinin Yapılışı

Modifiye bitümün yüksek sıcaklıkta tekerlek izine karşı gösterdiği direnci tespit etmek için yapılan bu deney, Bohlin DSR II cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 43). Akışkan hale gelinceye kadar ısıtılan bitüm 2.5 cm çapındaki plaka üzerine dökülüp DSR cihazına yerleştirilmiş ve iki plaka arasında 1 mm yükseklik olacak şekilde test cihazı ayarlanmıştır. DSR numuneleri, 120 Pa kontrollü gerilme altında 1,59 devir/sn dönme frekansı uygulanarak 64°C, 70°C ve 76°C sıcaklıklarındaki kompleks kayma modülü ( $G^*$ , Pa), faz açısı ( $\delta$ ) ve tekerlek izi dayanım parametresi ( $G^*/\sin\delta$ , Pa) tespit edilmiştir.



Şekil 43. Bohlin DSR II deney aleti



### 2.2.10. RTFOT ve PAV Deneylerinin Yapılışı

Modifiye bitümün kısa süreli yaşlandırma sonrasında fiziksel özelliklerinin ve kütle kaybının belirlenmesi için RTFOT deneyi yapılmıştır (Şekil 44). Bitüm akışkan hale gelinceye kadar ısıtılıp 8 adet cam şişenin her birine 35 gr olacak şekilde dökülmüştür. Her bir şişenin ağırlığı deney öncesinde tartılmış sonrasında şişeler RTFOT cihazında yerlerine yerleştirilmiş 163°C sıcaklıkta 75 dakika boyunca düşey ekseninde 15 devir yapacak şekilde döndürülmüş bu işlem sırasında cihazın içerisindeki hava üfleyici ile şişelere hava verilmiştir. Deney sonunda ise şişelerden 2 tanesi kütle kaybını ölçmek, kalan 6 şişe ise yaşlanma işlemi sonrasındaki özelliklerini penetrasyon, yumuşama noktası ve DSR deneyleri ile belirlemek için kullanılmıştır.



Şekil 44. RTFOT Deney cihazı

Modifiye bitümün uzun süreli yaşlandırma sonrasında fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için RTFOT deneyinden sonra PAV deneyi yapılmıştır (Şekil 45). PAV deneyi, PAV deney cihazı içerisinde numunelerin 21 bar (20,73 atm) basınç altında 100°C sıcaklıkta 20 saat beklemesiyle yapılmıştır. Deney tamamlandığında cihazın içerisinde

toplanan gazın alınması için 30 dakika boyunca 170°C sıcaklıkta vakum etkisi altına alınmıştır. Bu işlemlerin tamamlanmasıyla numuneler DSR deneyi için hazır hale gelmiştir.



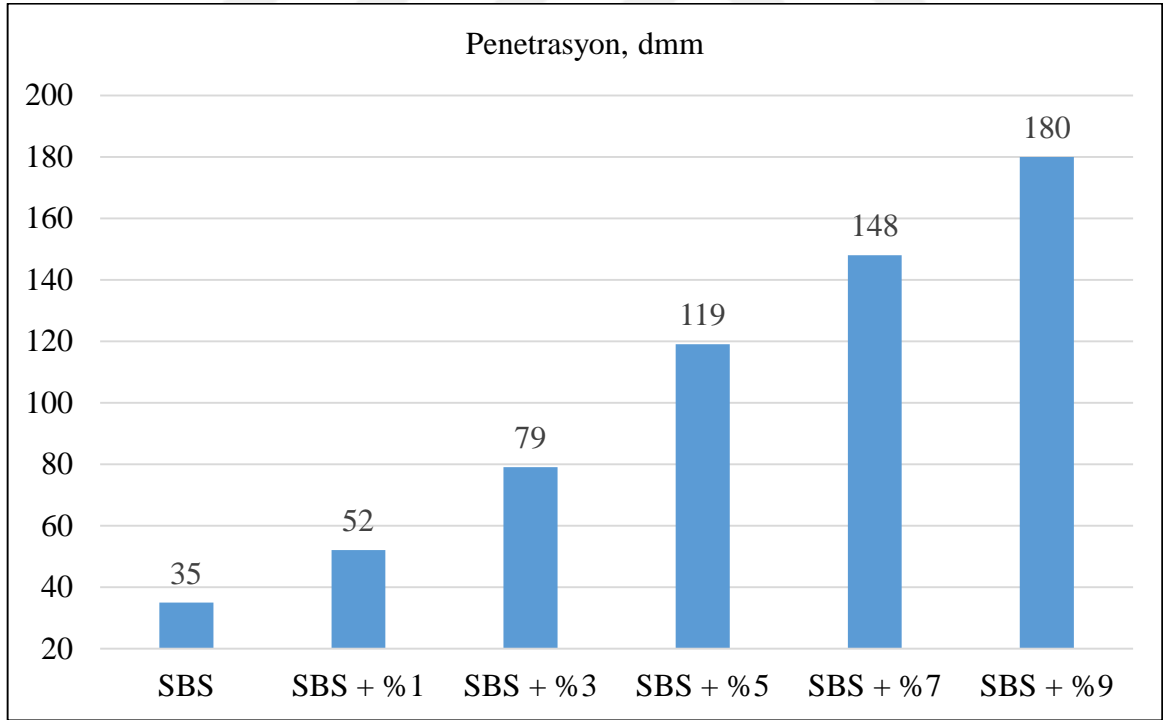
Şekil 45. PAV Deney cihazı

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde %5 SBS modifiyeli bitüme %1, %3, %5, %7, %9 oranlarında bitkisel atık yağ katkı maddesi ilave ederek ürettiğimiz modifiye bitümün uygulanan deneyler kapsamında elde edilen veriler, sonuçlar ve grafikler ile incelemeler ve değerlendirmeler yapılmıştır.

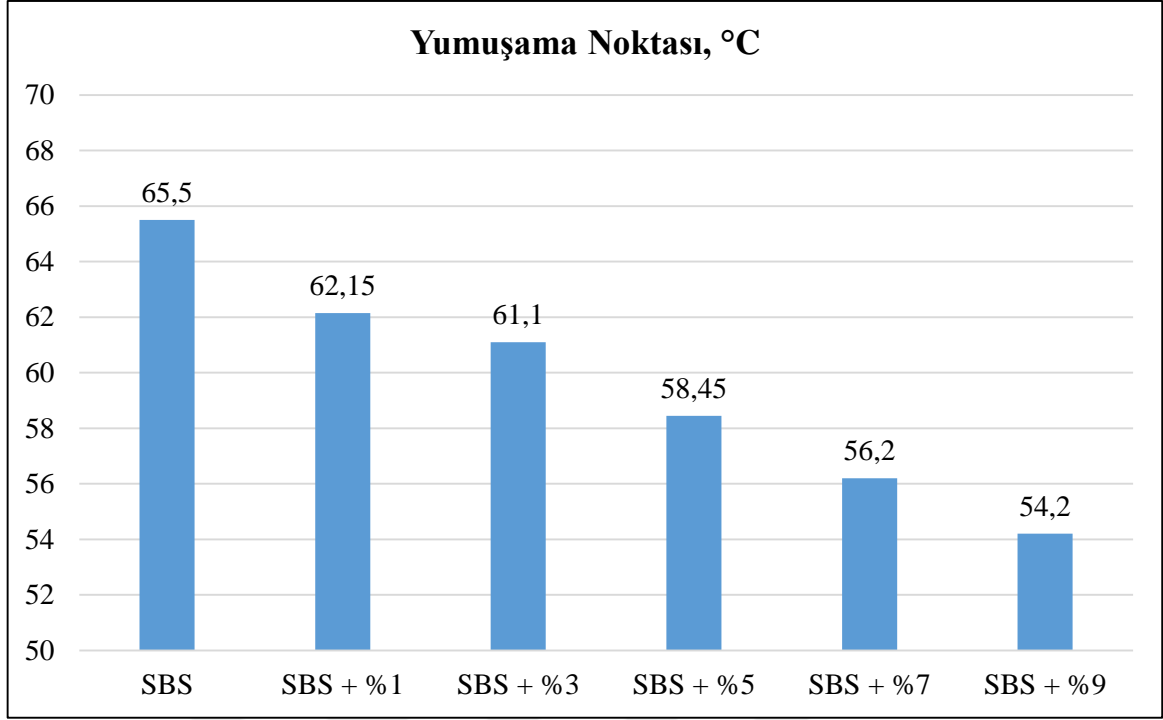
#### 3.1. Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Farklı oranlarda bitkisel atık yağ katkı maddesi eklenen SBS modifiyeli bitümün penetrasyon değerlerinin arttığı ve yumuşama noktası değerlerinin ise azaldığı Şekil 46 ve 47’de gösterilmiş ve bu sonuçlardan hareketle penetrasyon indeksi Şekil 48’de görülmektedir.

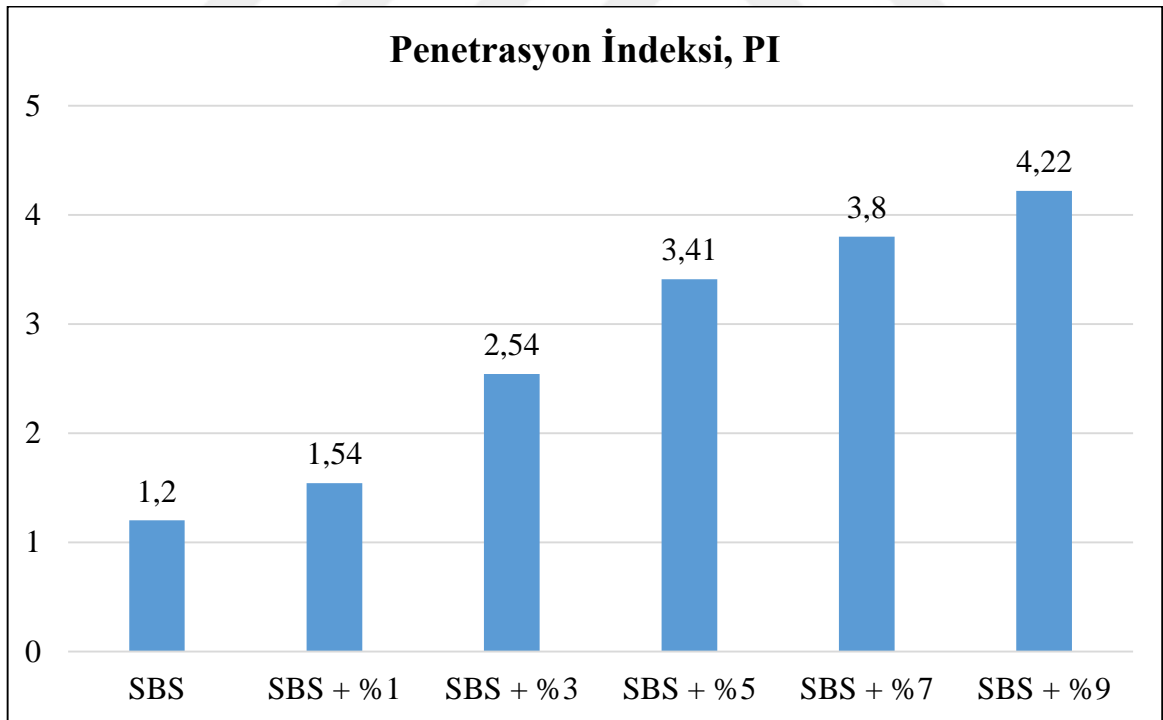


Şekil 46. Penetrasyon deneyi sonuçları





Şekil 47. Yumuşama noktası deneyi sonuçları



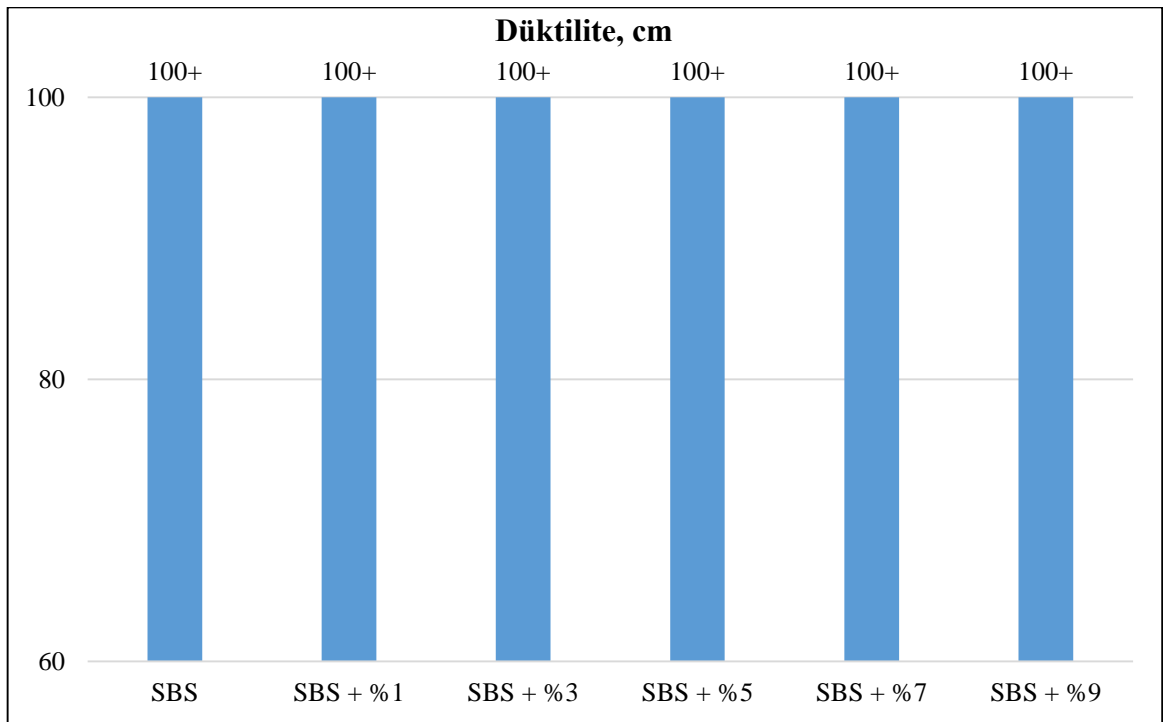
Şekil 48. Penetrasyon indeksi sonuçları

SBS modifiyeli bitümün penetrasyon değerleri %1, %3, %5, %7, %9 oranlarında yağ katkısı ile sırasıyla %48.5, %125.7, %240, %322.9, %414.3 oranlarında artarken,

yumuşama noktası değerleri ise sırasıyla %5.1, %6.7, %10.7, %14.2, %17.3 oranlarında azalmıştır. Bu değerlerden hareketle katkı maddesinin SBS modifiyeli bitümün kıvamının azaldığı yani yumuşadığı, sıcaklık hassasiyetinin ise arttığı anlaşılmıştır.

### 3.2. Düktilite Deneyi Sonuçları

SBS modifiyeli bitüm ve %1, %3, %5, %7, %9 oranlarında yağ katkısı ile deney sonuçları Şekil 49' de görülmektedir.

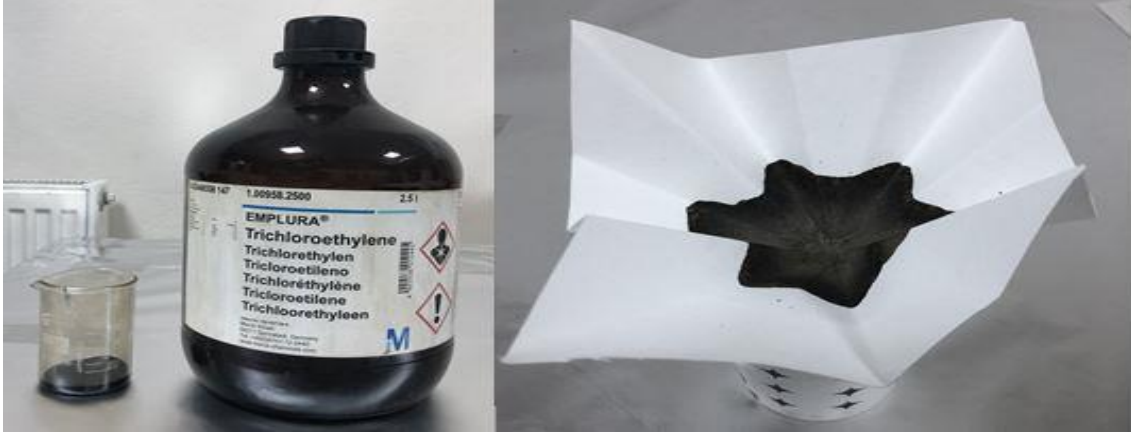


Şekil 49. Düktilite deneyi sonuçları

Bitümün katkı oranlarında 100 cm düktilite değerine ulaşıldığı, asfalt bağlayıcıda kopma olmadığı, başka bir deyişle şartname sınırlarının sağlandığı gözlemlenmiştir.

### 3.3. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi Sonuçları

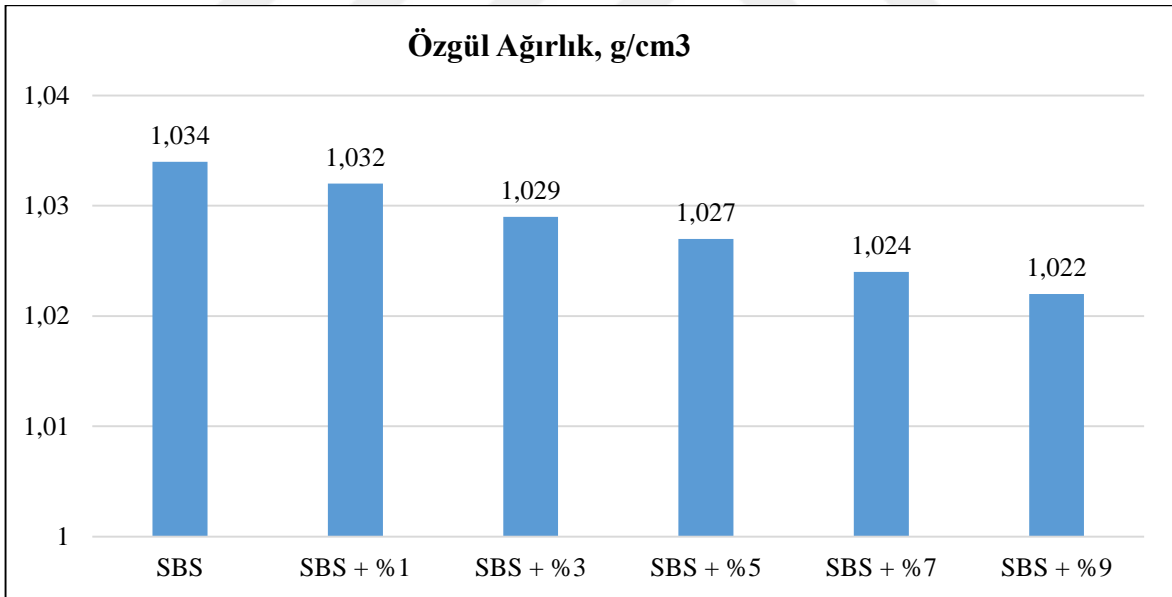
SBS modifiyeli bitüme %9 oranında bitkisel atık yağ eklenmesiyle elde edilen modifiyeli bitümün trikloretilende tamamen çözündüğü ve şartname sınırları içerisinde %99 oranında çözünmesi gereken bitümün bu şartı sağladığı görülmüştür (Şekil 50).



Şekil 50. Trikloretilende modifiyeli bitümün çözünmesi

### 3.4. Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

SBS modifiyeli bitüme ilave edilen yağın katkı oranının artmasıyla modifiye bitümün özgül ağırlık değeri azalmış ve Şekil 51’de görülmektedir.



Şekil 51. Modifiye bitümün özgül ağırlık sonuçları

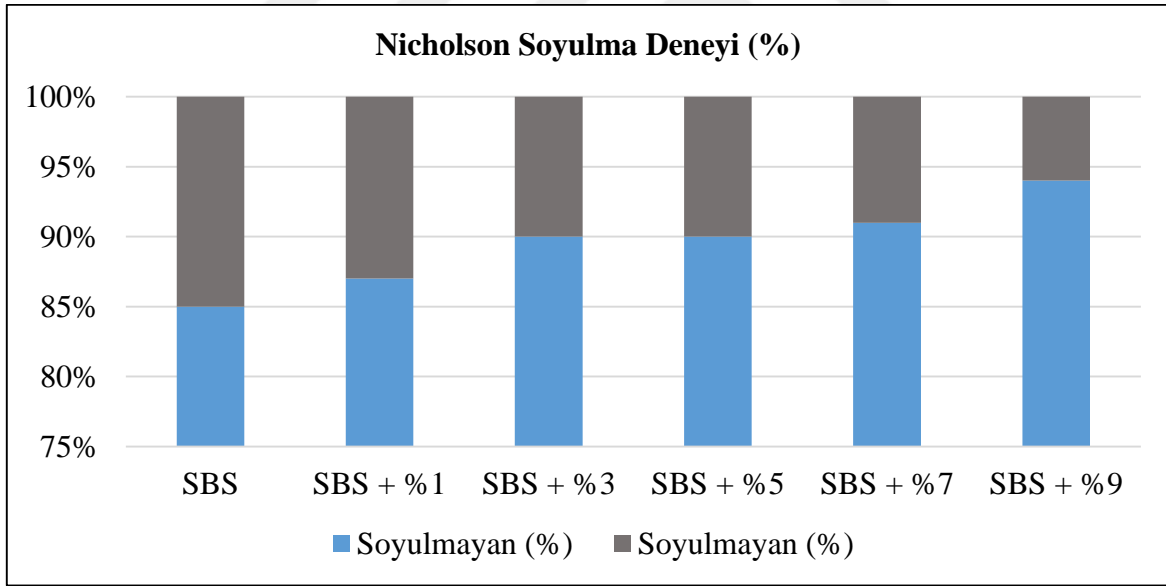
### 3.5. Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları

Modifiye bitümün agra ile adresansının su etkisi altındaki değişiminin incelenmesiyle katkı oranının artması soyulma direncinin arttığı ve soyulma miktarının

azaldığı Şekil 52’de görsel olarak belirtilmiştir. Soyulma direcinin sayısal değerleri ise Şekil 53’de görülmektedir.



Şekil 52. Soyulma deneyi numuneleri görüntüleri



Şekil 53. Nicholson soyulma deneyi sonuçları

### 3.6. Parlama Noktası Deneyi Sonuçları

Parlama noktası deneyi sonucunda SBS modifiyeli bitümün parlama noktası 340°C sıcaklık bulunmuştur. Bu sıcaklık değeri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık değerlerinden çok fazla olmaktadır.

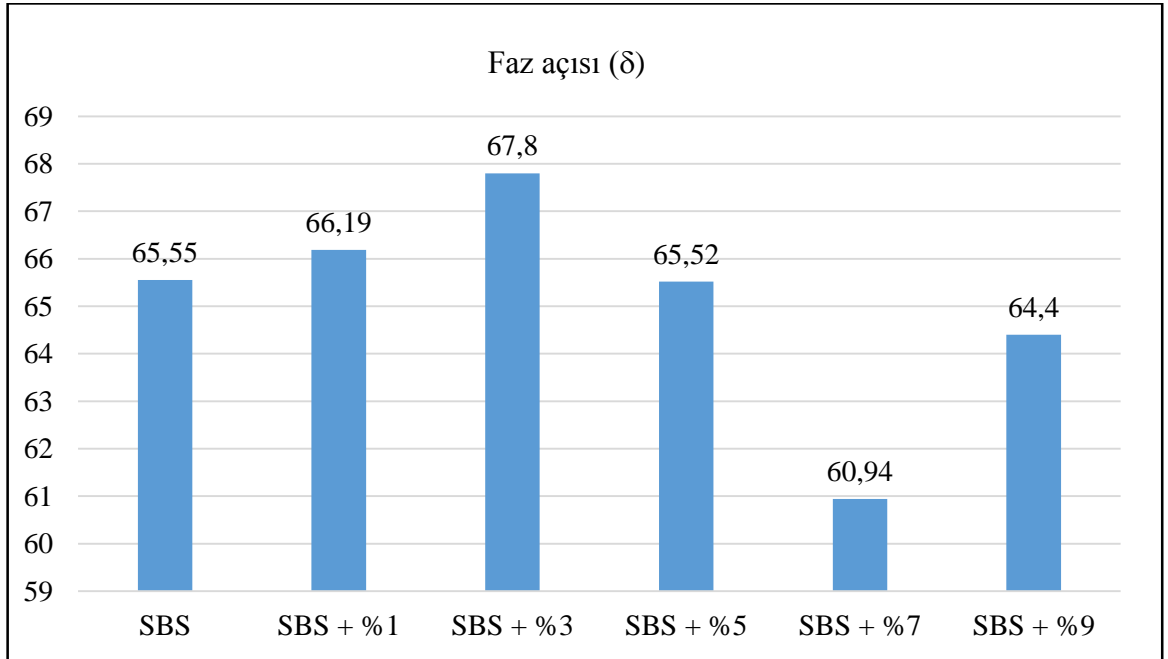
### 3.7. Dinamik Kesme Reometresi Deneyi Sonuçları (DSR)

Modifieli bitümün sırasıyla 64°C sıcaklığında 25 mm çapındaki plakaların aralarında 1 mm yükseklik olacak şekilde ayarlanmasıyla yapılan ve deneyin sonucunda bulunan  $G'$ ,  $G''$ ,  $G^*$ ,  $\delta$ ,  $G^*/\sin\delta$  değerleri bulunmuştur. Bu deneye ait sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.

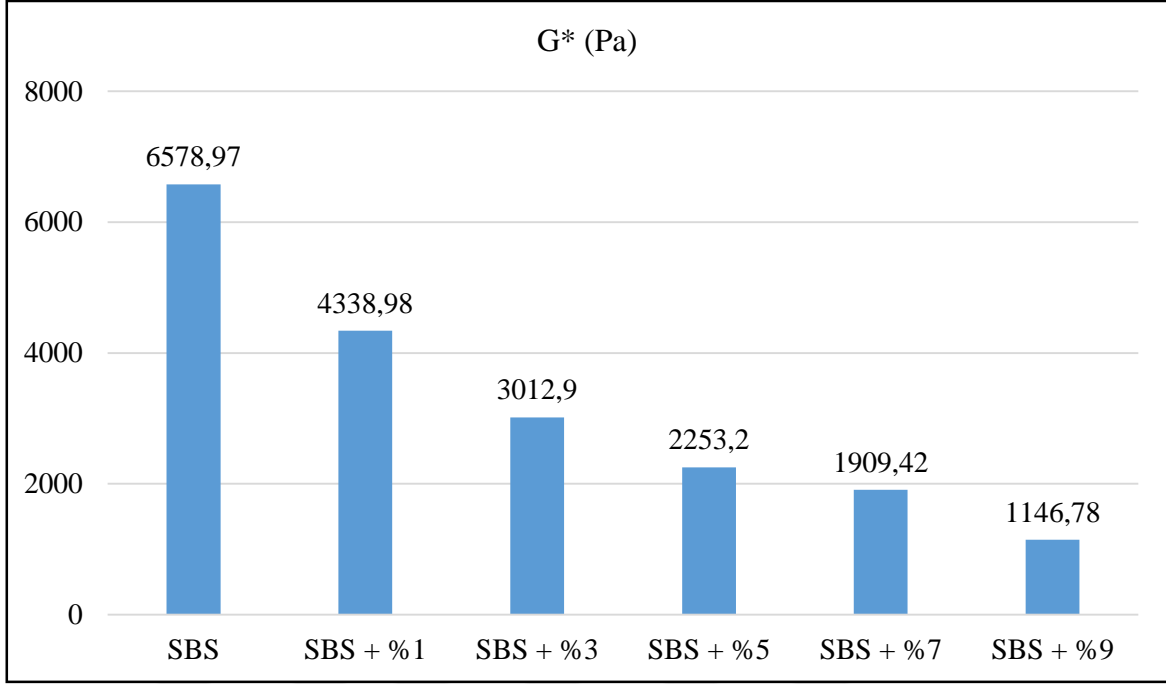
Tablo 6. DSR deneyi sonuçları

Modifiye Bitümler	Sıcaklık (°C)	$G'$ (Pa)	$G''$ (Pa)	$G^*$ (Pa)	$\delta$ (°)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	Şartname limiti (Pa) (AASHTO)
SBS	64	2723.01	5989	6578.97	65,55	7227.06	1000 Minimum
SBS+%1	64	1751.93	3969.57	4338.98	66,19	4742.77	
SBS+%3	64	1113,7	2789,6	3012,9	67,8	3253,5	
SBS+%5	64	933,82	2050,58	2253,2	65,52	2475,84	
SBS+%7	64	927,44	1669,05	1909,42	60,94	2184,4	
SBS+%9	64	495,5	1034,19	1146,78	64,4	1271,63	

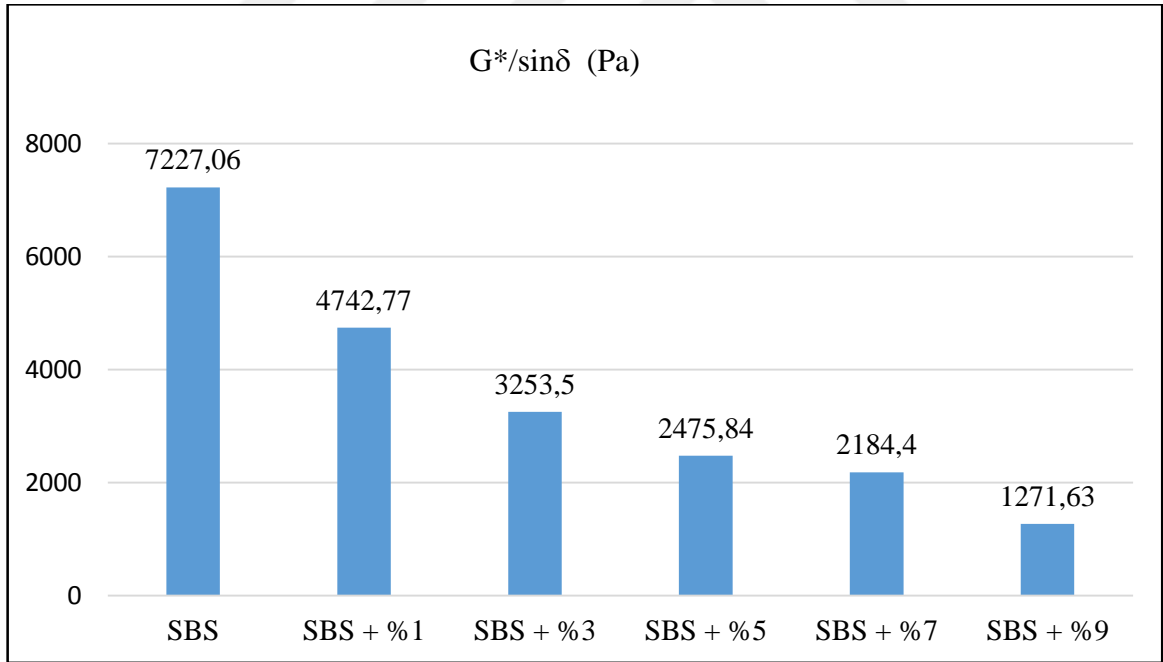
Dinamik kesme reometresi deneyinin  $\delta$ ,  $G^*$  ve  $G^*/\sin\delta$  değerleri Şekil 54-56' de grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 54. DSR deneyi  $\delta$  değerleri



Şekil 55. DSR deneyi  $G^*$  değerleri



Şekil 56. DSR deneyi  $G^*/\sin\delta$  değerleri

Yağ katkı miktarının artmasıyla SBS mofiyeli bitümün kompleks kayma modülü değerinin azaldığı ve tekerlek izi dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir (Bostancıoğlu, 2012). Buna rağmen 64° C sıcaklıkta SBS modifiyeli bitümün tüm katkı oranlarında

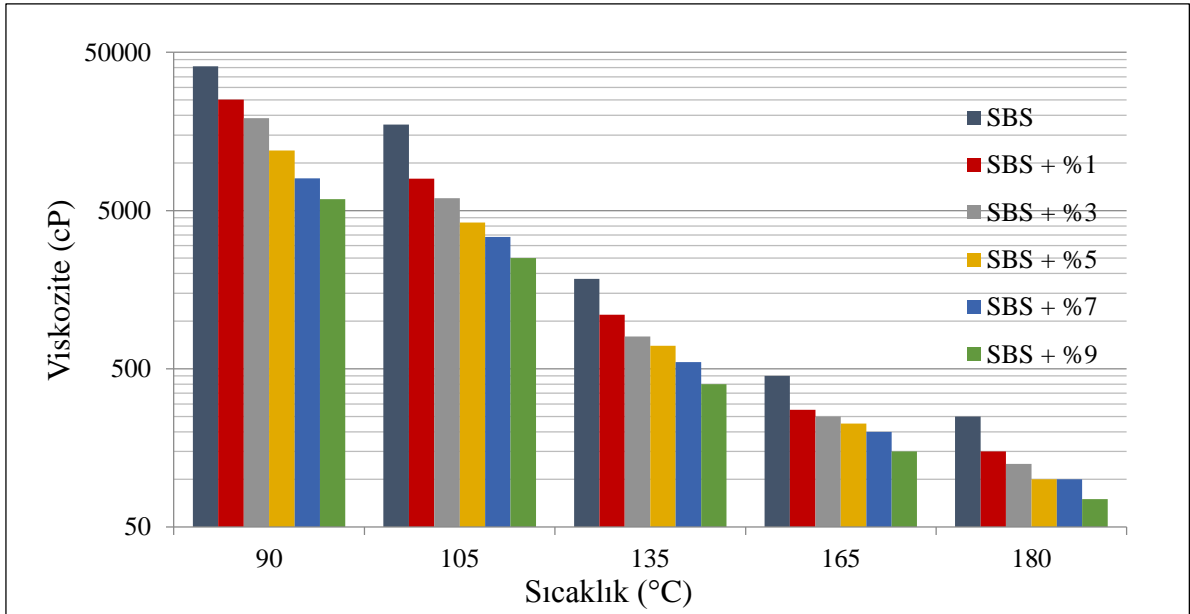
G\*/sinδ değerleri şartname limiti olan 1000 Pa değerinin üzerinde olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

### 3.8. Dönel Viskozimetre Deneyi Sonuçları (RV)

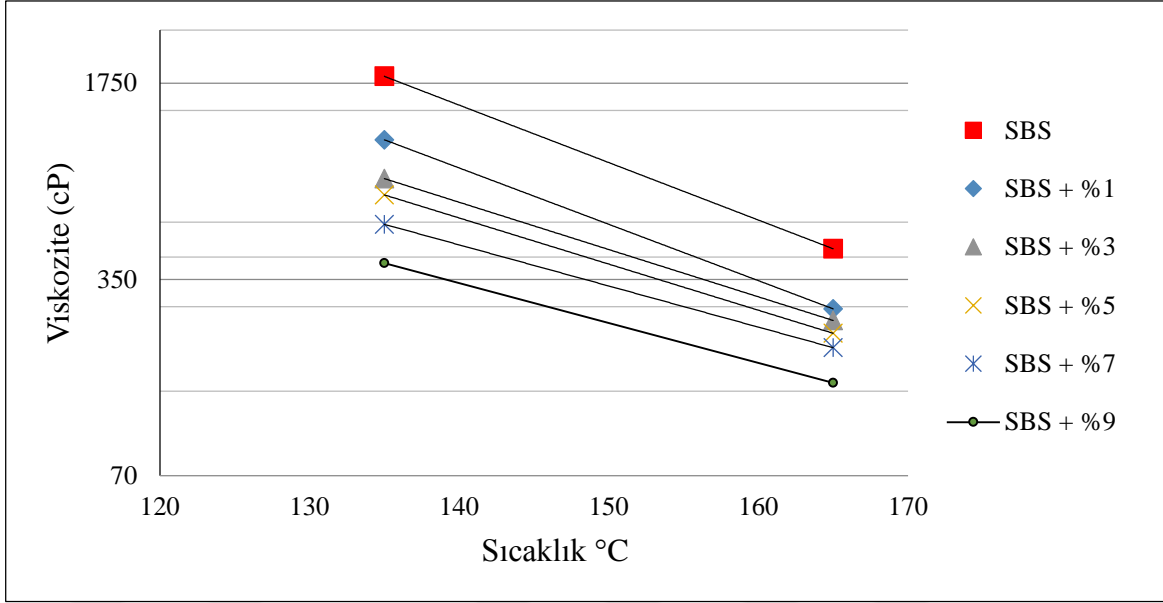
SBS modifiyeli bitüme eklenen yağ katkısıyla elde edilen bitümlerin RV deneyi ile sırasıyla 90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklarında viskozite değerleri bulunmuştur. Sonuçlar Tablo 7’de ve Şekil 57’de gösterilmiştir. 135°C ve 165°C sıcaklıktaki viskozite değerleri ile logaritmik sıcaklık ve viskozite grafiği elde edilmiştir (Şekil 58). Bu grafikten karıştırma sıcaklığı 170±20 cP değerine ve sıkıştırma sıcaklığı 280±30 cP değerlerine uygun sıcaklık aralığı belirlenmiştir (Tablo 8).

Tablo 7. Dönel viskozimetre deneyi (RV) sonuçları

Modifiye Bitümler	90°C	105°C	135°C	165°C	180°C
SBS	40750	17500	1850	450	250
SBS+%1	25100	7950	1100	275	150
SBS+%3	19150	6000	800	250	125
SBS+%5	12000	4200	700	225	100
SBS+%7	8000	3400	550	200	100
SBS+%9	5900	2500	400	150	75



Şekil 57. Modifiye bitümlerin viskozite değerleri



Şekil 58. Modifiye bitümlerin sıcaklık ve viskozite grafiği

Tablo 8. Modifiye bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Modifiye Bitümler	Karıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)		Sıkıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)	
	1	2	1	2
<b>SBS</b>	187,5	184,5	180	175,5
<b>SBS+%1</b>	180	175,8	168	163,8
<b>SBS+%3</b>	177	172,2	165	161,7
<b>SBS+%5</b>	174	169,2	163,4	159,6
<b>SBS+%7</b>	172,5	166,5	161	156,2
<b>SBS+%9</b>	165	160,2	153	146

Katkı oranındaki artış ile birlikte karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları azalmıştır. Yağ katkısının viskozite değerini düşürerek kıvamlılığını azalttığı görülmüştür. SBS modifiyeli bitümün işlenebilirliğinin arttığı ve 135°C sıcaklıkta tüm katkı değerleri için SBS modifiyeli bitümün 3000 cP olan şartname değerini aşmadığı gözlemlenmiştir.

### 3.9. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi Sonuçları

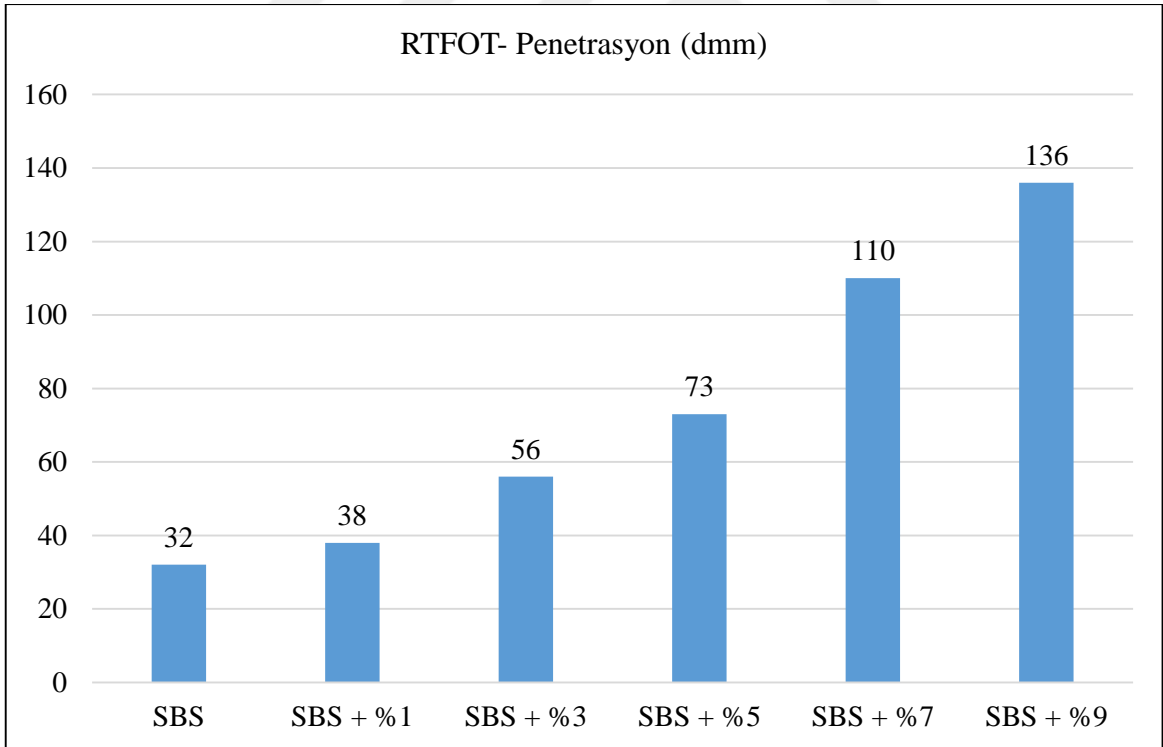
Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) sonrasında penetrasyon, yumuşama noktası ve DSR deneyleri tekrar uygulanmıştır. Bu deneylere ait veriler Tablo 9' da belirtilmiştir. Penetrasyon deneyinde RTFOT sonrası katkı miktarı arttıkça penetrasyon değerinin arttığı, yumuşama noktası deneyinde yumuşama noktası sıcaklığının azaldığı



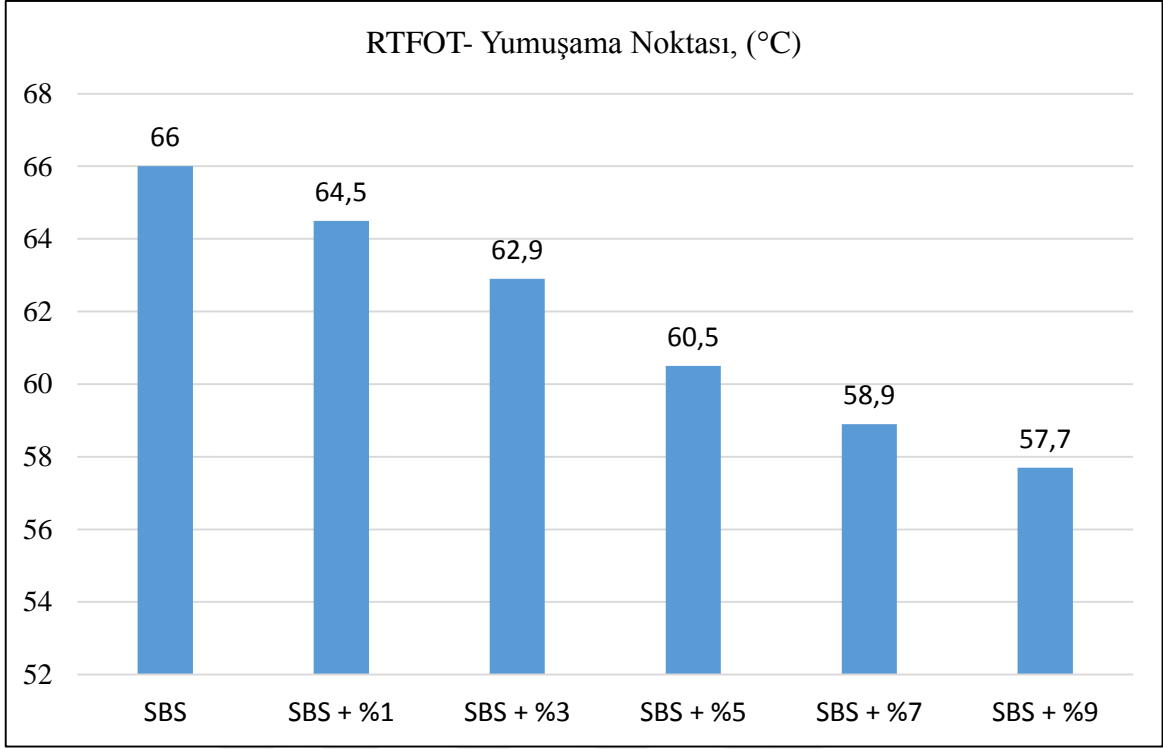
görülmektedir (Şekil 59 ve 60). Tablo 9’da belirtilen kütle kayıplarının incelenmesiyle yağ katkı oranının artmasıyla kütle kaybının azaldığı bundan hareketle bitümün üretim ve servis ömrü boyunca yaşlanmasının azalmasında önemli bir katkısı olduğu görülmüştür. Yumuşama noktası sıcaklık değerlerinin RTFOT deneyi öncesi ve sonrasındaki farkı katkı miktarı arttıkça arttığı Şekil 61’ de görülmektedir.

Tablo 9. RTFOT deneyi sonrasında bitümün fiziksel özellikleri

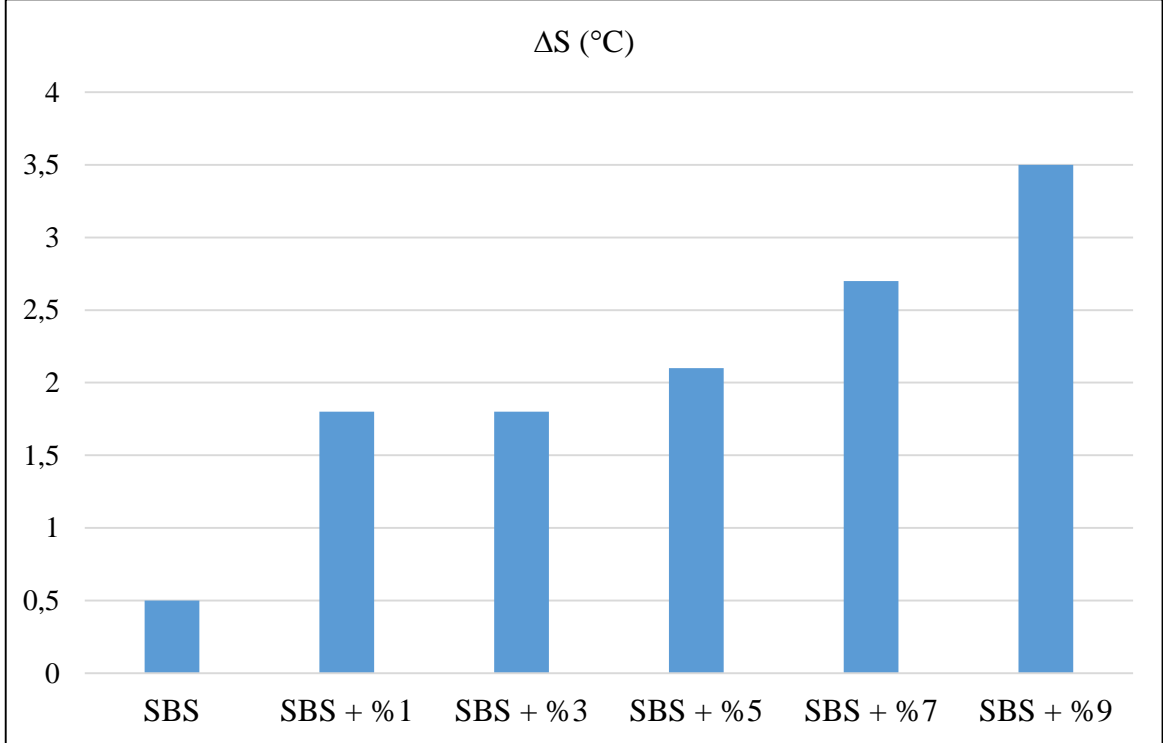
Deney	SBS	SBS +%1	SBS +%3	SBS +%5	SBS +%7	SBS +%9
Yumuşama Noktası (°C)	66	64,5	62,9	60,5	58,9	57,7
$\Delta S$ (°C)	0,5	1,8	1,8	2,1	2,7	3,5
Penetrasyon (dmm)	32	38	56	73	110	136
Kütle Kaybı (%)	0,23	0,17	0,14	0,14	0,13	0,11



Şekil 59. RTFOT deneyi sonrasında penetrasyon değerleri



Şekil 60. RTFOT deneyi sonrasında yumuşama noktası değerleri

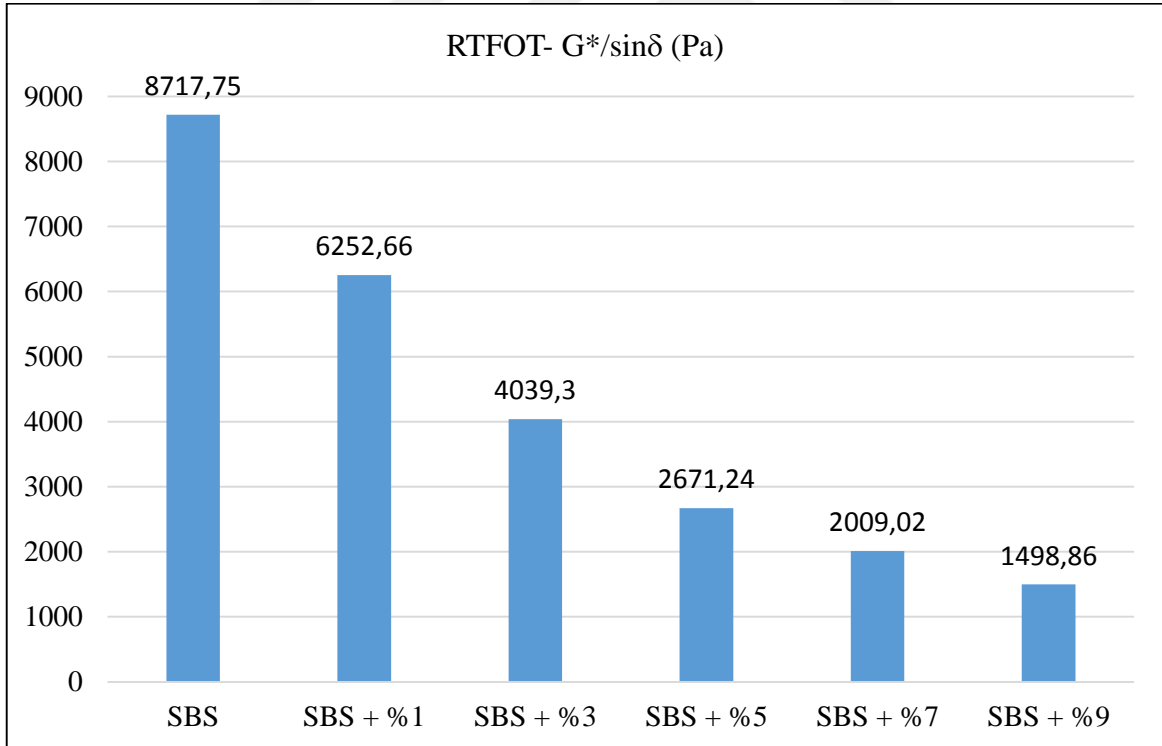


Şekil 61. Yumuşama noktası deneyi sıcaklık farkları

RTFOT deneyi sonrasında bitümün tüm katkı oranlarındaki numunelerine DSR deneyi tekrardan uygulanmıştır. Numuneler 25 mm'lik paralel plakalar arasına 1 mm boşluk olacak şekilde koyulmuş ve 64°C sıcaklıkta 120 Pa gerilme altında 1,59 Hz frekansta  $G'$ ,  $G''$ ,  $G^*$ ,  $\delta$  ve  $G^*/\sin\delta$  değerleri tespit edilmiştir ve bu değerler Tablo 10'da gösterilmiştir.  $G^*/\sin\delta$  değerleri ayrı olarak Şekil 62' de gösterilmiştir.

Tablo 10. RTFOT deneyi sonrası DSR sonuçları

Modifiye Bitümler	Sıcaklık (°C)	$G'$ (Pa)	$G''$ (Pa)	$G^*$ (Pa)	$\delta$ (°)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa)
SBS	64	3241,97	7272,54	7962,42	65,97	8717,75	Minimum 2200
SBS + %1	64	2324,85	5216,54	5711,15	65,89	6252,66	
SBS + %3	64	1488,76	3384,42	3697,39	66,26	4039,3	
SBS + %5	64	935,584	2270,8	2462,89	67,22	2671,24	
SBS + %7	64	699,585	1725,35	1861,79	67,93	2009,02	
SBS + %9	64	533,496	1275,76	1382,81	67,31	1498,86	



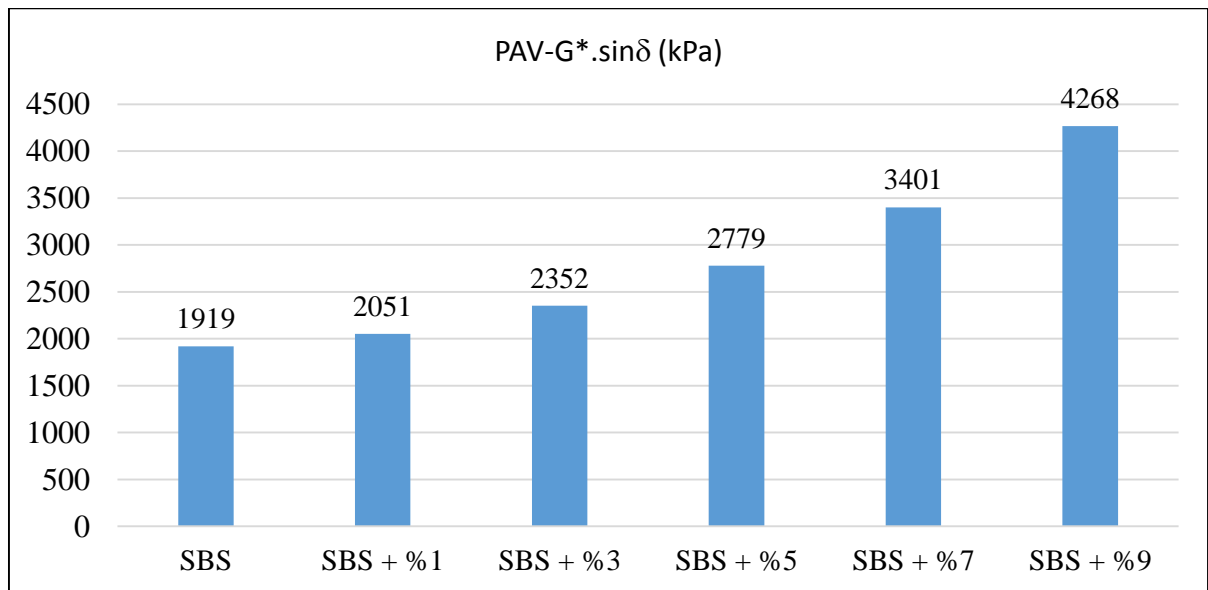
Şekil 62. RTFOT deneyi sonrasında  $G^*/\sin\delta$  değerleri

### 3.10. Basınçlı Yaşlandırma Kabini (PAV) Deneyi Sonuçları

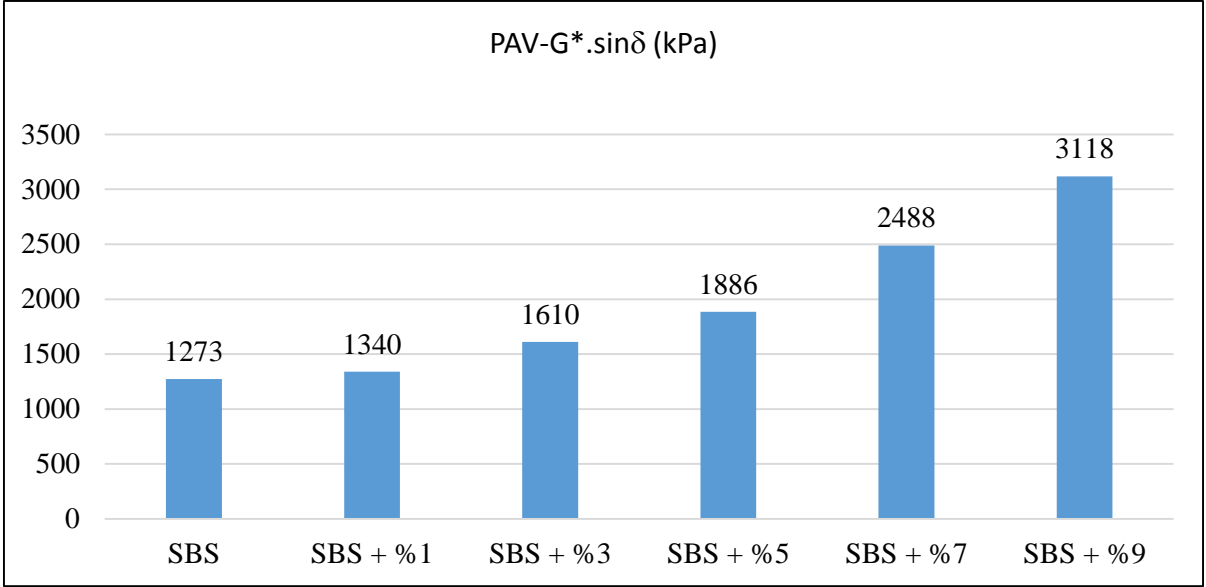
RTFOT deneyine tabi tutulan modifiye bitümlerin uzun süreli yaşlanmalarının incelenmesi için yapılan basınçlı yaşlandırma kabini (PAV) deneyinden elde edilen numunelere DSR deneyi uygulanmıştır. Bu numunelere ait veriler Tablo 11’de verilmiş olup  $G^*.sin\delta$  (yorulma direnci) değerleri 22°C sıcaklık için Şekil 63’de, 25°C sıcaklık için Şekil 64’de gösterilmiştir.

Tablo 11. PAV deneyi sonrasında yapılan DSR deneyi sonuçları

Modifiye Bitümler	Sıcaklık (°C)	G' (kPa)	G'' (kPa)	G* (kPa)	$\delta$ (°C)	G*.sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa) (AASHTOT5)
SBS	22	1825	1919	2648	46,45	1919	Maksimum 5000
	25	1123	1273	1698	48,59	1273	
SBS+%1	22	1806	2051	2733	48,65	2051	
	25	1040	1340	1696	52,17	1340	
SBS+%3	22	1751	2352	2995	51,73	2352	
	25	985	1610	1972	54,69	1610	
SBS+%5	22	1498	2779	3452	53,63	2779	
	25	817	1886	2312	54,69	1886	
SBS+%7	22	1120	3401	3759	64,80	3401	
	25	628	2488	2688	67,79	2488	
SBS+%9	22	826	4268	4561	69,38	4268	
	25	452	3118	3210	76,26	3118	



Şekil 63. PAV deneyi sonrası 22°C sıcaklıktaki DSR değerleri



Şekil 64. PAV deneyi sonrası 25°C sıcaklıktaki DSR değerleri

PAV deneyi sonrasında DSR deneyi  $G^*.sin\delta$  (yorulma direnci) değerlerinin düşük olması ve Superpave şartname değeri olan 5000 kPa değerini aşmaması gerekmektedir. Şekil 63 ve 64' de görüldüğü gibi yağ katkısı ilavesi tekerlek izi dayanımını düşürmüştür.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bitkisel Atık Yağ katkısı, %5 oranında SBS modifiyeli bitüme %1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarında katılmış, üretilen modifiye bitümlerin fiziksel ve reolojik özellikleri bitümlü bağlayıcılara uygulanan geleneksel ve Superpave kapsamındaki deneylerle araştırılmıştır. Farklı katkı oranlarında bitkisel atık yağın, SBS modifiyeli bitümlü bağlayıcı üzerindeki etkileri kıyaslanmıştır. Çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuç ve değerlendirmeler aşağıdaki gibidir.

- Penetrasyon deneyi dikkate alındığında katkı oranının artmasıyla modifiye bitümün penetrasyon değeri artmış, yumuşama noktası deneyinde ise yumuşama noktası sıcaklık değerleri azalmıştır. Bu değerler modifiye bitümün kıvamının azaldığını ve sıcaklık hassasiyetinin ise arttığını göstermektedir.
- Düktilite deneyi sonucunda bitümün katkı oranlarında asfalt bağlayıcıda kopma olmadığı, başka bir deyişle şartname sınırlarını sağladığı gözlemlenmiştir.
- Özgül ağırlık deneyi sonucunda eklenen yağ katkısının beklenildiği gibi özgül ağırlığı azalttığı bu azalmanın da yağ katkısının artan oranında kıvamın azaldığını göstermektedir. Bu kıvam azalması penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinin sonucuyla uyumaktadır.
- Parlama noktası deneyi sonucunda iş güvenliği konusunda parlama noktası değerinin sorun teşkil etmediği görülmüştür.
- Trikloretilende çözünürlük deneyi sonucunda yağ katkılı modifiye bitümlerin trikloretilende tamamen çözüldüğü görülmüştür.
- Nicholson soyulma deneyi sonucunda yağ katkısının artmasıyla soyulma direncinin arttığı, %9 katkılı modifiye bitümün soyulma direncinin %10.58 oranında arttığı görülmüştür.
- DSR deneyi sonucunda yağ katkısının artan oranında bitümün elastik davranıştan viskoz davranışa doğru eğilim gösterdiği, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi performansının azaldığı gözlemlenmiştir.
- RTFOT deneyi sonucunda katkı oranının artmasıyla kütle kaybının azaldığı bundan hareketle bitümün yaşlanmasının yavaşladığı gözlemlenmiştir. Bitümün yaşlanma performansının arttığı sonucuna varılmıştır.

- RV deneyi sonucunda yağ katkısının artmasıyla bitümün kıvamlılığının azaldığı, işlenebilirliği zor olan SBS modifiyeli bitümün işlenebilirliğinin arttığı görülmüştür.
- PAV deneyi sonucunda RTFOT deneyi sonrasında olduğu gibi DSR deneyi tekerlek izi dayanımının katkının artan oranında azaldığını, yaşlanma direncinin artmasına rağmen tekerlek izi dayanımının azaldığı görülmüştür.

Deney sonuçları topluca değerlendirildiğinde; Bitkisel Atık Yağ katkısının, bitümün işlenebilirliğini artırdığı, dolayısıyla asfalt karışımların üretiminde kolaylık getireceği, bununla birlikte karıştırma ve sıkıştırmada enerji tasarrufu sağlayabileceği sonuçlarına ulaşılmıştır. Diğer yandan, Bitkisel Atık Yağ katkısının, soyulma direncinde artış sağladığı gözlenmiştir ki; bu da servis koşullarında özellikle sürekli olarak suya maruz kalan ve suyun etkisiyle agrega asfalt bağlayıcı arasındaki bağın zayıflaması nedeniyle hizmet ömrü kısalan asfalt kaplamanın daha uzun süre hizmet verebileceği anlamına gelmektedir.

Bitkisel Atık Yağ katkısının, asfalt bağlayıcıya bu çalışma kapsamında araştırılmayan daha düşük oranlarda katılmasının etkileri araştırılmalıdır.

Bitkisel Atık Yağ katkısının soyulmaya karşı direnci nedeniyle bu konu üzerinde daha detaylı bir araştırmaya girilebilir.

Bitkisel Atık Yağ katkısının, özellikle geri dönüşüm asfalt kaplamalarda (RAP), servis ömrü boyunca yaşlanmış ve sertleşmiş olan asfalt bağlayıcı özelliklerinin iyileştirilmesinde gençleştirici katkı olarak değerlendirilebilmesine yönelik çalışma yapılabilir.

## 5. KAYNAKLAR

- Abuawad, İ.M.A., Al-Qadi, I.L. ve Trepainer, J.S., 2015. Mitigation of moisture damage in asphalt concrete: Testing techniques and additives/modifiers effectiveness, Construction and Building Materials, 84, 437-443.
- Aksoy, A., İskender, E., Oruç, Ş. ve Özen, H., 2012. SBS Polimeri ve Su hasarı Önleyici Katkıların Asfalt kaplamalarda Performans Karşılaştırması, İMO Teknik Dergi, 113, 23, 5967-5986.
- Behnood, A. ve Olek, J., 2017. Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA), Construction and Building Materials, 151, 464-478.
- Bostancıoğlu, M., 2012. Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler İle Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Chen, C., Podolsky, J.H., Williams, R.C. ve Cochran, E.W., 2018. Laboratory investigation of using acrylated epoxidized soybean oil (AESO) for asphalt modification, Construction and Building Materials, 187, 267-279.
- Chen, J.S. ve Huang, C.C., 2017. Fundamental Characterization of SBS-Modified Asphalt Mixed with Sulfur, Journal of Applied Polymer Science, 103, 2817-2825.
- ÇYGM, 2010. Bitkisel Atık Yağların Yönetimi, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Dong, Z., Yang, C., Luan, H., Zhou, T. ve Wang, P., 2019. Chemical characteristics of bio-asphalt and its rheological properties after CR/SBS composite modification, Construction and Building Materials, 200, 46-54.
- Elkashef, M., Podolsky, J., Williams, R.C. ve Cochran, E., 2017. Preliminary examination of soybean oil derived material as a potential rejuvenator through Superpave criteria and asphalt bitumen rheology, Construction and Building Materials, 149, 826-836.
- Elkashef, M. ve Williams, R.C., 2017. Improving fatigue and low temperature performance of 100% RAP mixtures using soybean-derived rejuvenator, Construction and Building Materials, 151, 345-352.
- Fernandes, S.R.M., Silva, H.M.R.D. ve Oliveira, J.R.M., 2018. Developing enhanced modified bitumens with waste engine oil products combined with polymers, Construction and Building Materials, 160, 714-724.
- Girdap, E., 2018. Taş Mastik Asfalt Karışımlarda SBS ile Birlikte PR PLAST S Katkısının Karışım Performansı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.



- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K. ve Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, 2001. Asphalt ve Uygulamaları, İsfalt Bilimsel Yayını No:1, İstanbul.
- Karakaş, A.S., 2014. Bitümlü Sıcak Karışımların Trafik Etkisi Altında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- KGM, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi-2013, Ankara.
- Kizirgil, M. E., 2013. Stiren-Butadien-Stiren ve Uçucu Külün Birlikte Kullanılmasının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Kök, B.V., Yılmaz, M. ve Güler, M., 2011. Evaluation of high temperature performance of SBS+Gilsonite modified binder, Fuel, 90, 3093-3099.
- Kutluhan, S., 2008. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunun Modellenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kutluhan, S. ve Açar, E., 2009. Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler ve azaltmaya yönelik öneriler, İ.T.Ü Dergisi, 8, 179-191.
- Lei, Y., Wang, H., Fini, E.H., You, Z., Yang, X., Gao, J., Dong, S. ve Jiang, G., 2018. Evaluation of the effect of bio-oil on the high-temperature performance of rubber modified asphalt, Construction and Building Materials, 191, 692-701.
- Lei, Z., Bahia, H. ve Yi-qui, T., 2015. Effect of bio-based and refined waste oil modifiers on low temperature performance of asphalt binders, Construction and Building Materials, 86, 95-100.
- Li, J., Zhang, F., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F. ve Chen, X., 2019. Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt, Construction and Building Materials, 201, 268-277.
- Liu, S., Peng, A., Wu, J. ve Zhou, S.B., 2018. Waste engine oil influence on chemical and rheological properties of different asphalt binders, Construction and Building Materials, 191, 1210-1220.
- Luo, W., Zhang, Y. ve Cong, P., 2017. Investigation on physical and high temperature rheology properties of asphalt binder adding waste oil and polymers, Construction and Building Materials, 144, 13-24.
- Malkoç, G., 2002. Yol Üstyapılarında Kullanılan Modifiye Asfaltlar ve Modifiye Bitüm Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Orhan, F., 2012. Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.

- Portugal, A.C.X., Lucena, L.C.F.L., Lucena, A.E.F.L., Costa, D.B. ve Lima, K.A., 2017. Rheological properties of asphalt binders prepared with maize oil, Construction and Building Materials, 152, 1015-1026.
- Rasool, R.T., Wang, S., Zhang, Y., Li, Y. ve Zhang, G., 2017. Improving the aging resistance of SBS modified asphalt with the addition of highly reclaimed rubber, Construction and Building Materials, 145, 126-134.
- Sağlık, A. ve Güngör, A.G., 2008. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü Yayını, Ankara.
- Sengoz, B. ve Isikyakar, G., 2007. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen, Construction and Building Materials, 22, 1897-1905.
- Sengoz, B., Topal, A. ve Isikyakar, G., 2009. Morphology and image analysis of polymer modified bitumens, Construction and Building Materials, 23, 1986-1992.
- Su, N., Xiao, F., Wang, J. ve Amirhanian, L.C.S., 2018. Productions and applications of bio-asphalts- A review, Construction and Building Materials, 183, 587-591.
- Sun, M., Zheng, M., Qu, G., Yuan, K., Bi, Y. ve Wang, J., 2018. Performance of polyurethane modified asphalt and its mixtures, Construction and Building Materials, 191, 386-397.
- Sun, Z., Yi, J., Huang, Y., Feng, D. ve Gou, C., 2016. Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil, Construction and Building Materials, 102, 496-504.
- Sun, D., Lu, T., Xiao, F., Zhu, X. ve Sun, G., 2017. Formulation and aging resistance of modified bio-asphalt containing high percentage of waste cooking oil residues, Journal of Cleaner Production, 161, 1203-1214.
- Sybilski, D., 1994. Relations Between Absolute Viscosity of Polymer Modified Bitumens and Rutting Resistance of Pavement, Material and Structures, 27, 110-120.
- Tunç, A., 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ankara.
- Tunç, A., 2004. Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ankara.
- Umar, F. ve Ağar, E., 1991. Yol Üstyapısı, İ.T.Ü İnşaat Mühendisliği Matbaası, İstanbul.
- URL-1, <https://www.otopark.com/2015/09/asfalt-yol-yerine-beton-yola-ne-dersiniz/>, 20 Şubat 2019.
- URL-2, <http://www.asnud.org.tr/asfalt.php?sayfa=29>, 21 Şubat 2019.
- URL-3, <http://www.asnud.org.tr/asfalt.php?sayfa=25>, 22 Şubat 2019.

- URL-4, <https://insapedia.com/asfalt-yollarda-meydana-gelen-kusur-ve-hasar-cesitleri/teker-izi/>, 25 Şubat 2019.
- URL-5, <https://www.movea.com.tr/asfalt-bozulmalari-neden-olusur/>, 25 Şubat 2019.
- URL-6, <https://insapedia.com/asfalt-yollarda-meydana-gelen-kusur-ve-hasar-cesitleri/>, 25 Şubat 2019.
- URL-7, <https://pixnio.com/tr/dokular/beton-doku/kirik-asfalt-kaldirim>, 26 Şubat 2019.
- URL-8, <https://bianet.org/bianet/kent/205100-istanbul-da-yollar-neden-cokuyor-bogaz-neden-dolduruluyor>, 27 Şubat 2019.
- URL-9, [http://web.hitit.edu.tr/dersnotlari/ibrahimbilici\\_11.03.2014\\_9Z6K.pdf](http://web.hitit.edu.tr/dersnotlari/ibrahimbilici_11.03.2014_9Z6K.pdf), 27 Şubat 2019.
- URL-10, <http://abtlab.com.tr/urun/penetrasyon-deneyi.html>, 1 Mart 2019.
- URL-11, <http://www.eylullab.com/Urunler/Bitum-Asfalt/Bitum-Asfalt-Deney-Test-Ekipmanlari/OTOMATIK-DIJITAL-YUMUSAMA-NOKTASI>, 1 Mart 2019.
- URL-12, <http://www.utest.com.tr/tr/20455/Fraass-Kirilma-Noktasi-Aparati>, 4 Mart 2019.
- URL-13, <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/202763>, 4 Mart 2019.
- URL-14, <http://web.firat.edu.tr/iats/cd/subjects/Civil&Construction/CAC-40.pdf>, 4 Mart 2019.
- URL-15, <https://alfatest.com.tr/language/tr/product-detail/kiris-egme-reometresi-bbr3-a-813/>, 4 Mart 2019.
- URL-16, <http://www.asphaltroadsystems.com/rwelaste-elastomer-katki-maddesi.html>, 7 Mart 2019.
- URL-17, <http://biyolojiden.blogspot.com/2015/11/organik-bilesikler-yaglar.html>, 11 Mart 2019.
- Xiang, L., Tu, J., Chen, J. ve Que, G., 2010. Outdoor aging of road asphalt and SBS modified asphalt, Chemical Science Engineering, 5, 35-42.
- Yang, X., You, Z., Dai, Q. ve Mills-Beale, J., 2014. Mechanical performance of asphalt mixtures modified by bio-oils derived from waste wood resources, Construction and Building Materials, 51, 424-431.
- Yang, X. ve You, Z., 2015. High temperature performance evaluation of bio-oil modified asphalt binders using the DSR and MSCR tests, Construction and Building Materials, 76, 283-387.
- Yılmaz, B., 2016. Bor İçerikli Organik Katkıyla Modifiye Edilen Asfaltın Performans Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H. ve Karim, M.R., 2012. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen, Journal of Hazardous Materials, 233-234, 254-258.
- Zhang, R., Wang, H., Gao, J., You, Z. ve Yang, X., 2017. High temperature performance of SBS modified bio-asphalt, Construction and Building Materials, 144, 99-105.



## ÖZGEÇMİŞ

Erman ÇAVDAR, aslen Trabzon Maçkalı olmakla beraber 1992 yılında Rize’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Rize’ de tamamladıktan sonra lise öğrenimini Trabzon’da tamamladı. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2011-2016 yılları arasında bitirerek İnşaat Mühendisliği unvanı aldı. Mezuniyetinden sonra Trabzon Armada Residance Şantiyesinde saha mühendisi olarak çalıştı. Aynı sene içerisinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. İleri derecede İngilizce bilmekte ve halen Karadeniz Teknik Üniversitesinde Araştırma Görevlisi görevine devam etmektedir.