

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK KIZARTMA YAĞI VE ATIK TARIMSAL KÜL İLE
MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN FİZİKSEL
VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Elif ZORLU

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali ÇOLAK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN

2023

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ATIK KIZARTMA YAĞI VE ATIK TARIMSAL KÜL İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Elif ZORLU

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali ÇOLAK

Dünyada artan nüfus sayısı ve teknolojinin gelişimine bağlı olarak hızla artan ve farklılaşan tüketim alışkanlıkları atık miktarını artırmıştır. Bu çalışmada; biyokütle ürünlerinden atık kızartma yağı ve atık tarımsal külün (çam dal, çam kapak, kavak kapak, mısır sapı) bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bitümlü sıcak karışımların performansını ve stabilitesinin artırılması, katkı miktarının optimize edilmesi, biyokütle ürünlerinin geri dönüşümü sağlanarak daha ekonomik tasarımlar oluşturulması amaçlanmaktadır. Çalışmada 70/100 penetrasyonlu saf bitüme, ağırlıkça %0, %2, %4 oranlarında atık kızartma yağı; ağırlıkça %0, %3, %6 oranlarında atık tarımsal kül eklenilmiştir. Modifiye bitümlerden 170°C, 180°C, 190°C sıcaklıklarda ve 10, 20, 30 dakikalık sürelerde, sabit 3000 RPM karıştırma hızında olmak üzere toplamda 9 deney grubu numunesi oluşturulmuştur. Bu numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT), FTIR deneyleri ve Marshall Tasarım deneyi uygulanmıştır. RTFOT ile yaşlandırılan numunelere yeniden penetrasyon, yumuşama noktası ve parlama noktası deneyleri uygulanarak ve penetrasyon indeksi hesaplanarak bitümlü bağlayıcıların özellikleri gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda; Atık kızartma yağı katkısının; bitümün penetrasyon değerini dolayısıyla işlenebilirliğini artırdığı, atık tarımsal kül katkısının ise penetrasyon değerini düşürdüğü, dolayısıyla kıvamlılığı artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Marshall deneyi sonucunda atık kızartmalık yağ katkısının stabilite değerini düşürdüğü, kül katkısının ise artırdığı sonucuna ulaşılmış; yağ ve kül katkısının akma değerlerinde ani bir artış ya da azalmaya sebep olmadığı görülmüştür.

2023, 74 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Atık Kızartma Yağı, Atık Tarımsal Kül, Bitümlü Sıcak Karışım (BSK), Biyokütle, Marshall, Modifiye Bitüm

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF BITUMINOUS BINDERS MODIFIED WITH WASTE FRYING OIL AND WASTE AGRICULTURAL ASH

Elif ZORLU

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asist. Prof. Dr. Muhammed Ali ÇOLAK

The rapidly increasing and differentiating consumption habits due to the increasing number of population in the world and the development of technology have increased the amount of waste. In this study; The effects of waste frying oil and waste agricultural ash (pine twig, pine cap, poplar cap, corn stalk) from biomass products on the physical and chemical properties of bitumen were investigated. It is aimed to increase the performance and stability of bituminous hot mixes, to optimize the amount of additives, and to create more economical designs by recycling biomass products. In the study, waste frying oil at the rates of 0%, 2%, 4% by weight, to pure bitumen with 70/100 penetration; Waste agricultural ash was added at the rate of 0%, 3%, 6% by weight. A total of 9 experimental group samples were created from modified bitumen at 170°C, 180°C, 190°C temperatures and at a constant 3000 RPM mixing speed for 10, 20, 30 minutes. Penetration, softening point, flash point, rotational thin film heating (RTFOT), FTIR tests and Marshall Design test were applied to these samples. The properties of bituminous binders were observed by applying repenetration, softening point and flash point tests to the samples aged with RTFOT and calculating the penetration index. In the results of working; Waste frying oil additive; It was concluded that bitumen increased the penetration value and thus its workability, while the waste agricultural ash additive decreased the penetration value and thus increased the consistency. As a result of the Marshall experiment, it was concluded that the additive of waste frying oil decreased the stability value, while the additive of ash increased it; It was observed that oil and ash additives did not cause an increase or decrease in yield values.

2023, 74 Pages

Keywords: Waste Cooking Oil, Waste Agricultural Ash, Hot Bitumen Mix (HBM), Biomass, Marshall, Modified Bitumen

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde ilgi, teşvik ve yardımlarıyla beni her zaman destekleyen danışman hocam Sayın Muhammed Ali ÇOLAK'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez aşaması boyunca bilgi, tecrübe ve hoşgörüsüyle kıymetli fikirlerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. O. Ünsal BAYRAK'a, Sayın Doç. Dr H. Ferit BAYATA'ya Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih İrfan BAŞ'a, laboratuvar çalışmaları aşamasındaki desteklerinden ötürü Arş. Gör. Ahmet Oğuz DEMİRİZ'e ve Arş. Gör. Ömer Faruk KELEŞ'e, destek ve yardımlarından ötürü değerli meslektaşlarım Suna IŞIK ve Özge DEMİR'e, deney sürecinde yardımlarını esirgemeyen Sinan GEDİK'e ve sevgili babama teşekkür ederim.

Son olarak, çalışmalarım boyunca desteklerini daima hissettiğim değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Elif ZORLU

Nisan, 2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	2
2.1. Konu Hakkında Yapılan Literatür Çalışmaları	2
2.1.1. Çeşitli katkılar ile modifiye edilmiş bitümle ilgili çalışmalar.....	2
2.1.2. Yağ katkılı modifiye bitümle ilgili çalışmalar	5
2.1.3. Kül katkılı modifiye bitümle ilgili çalışmalar	8
3. KURAMSAL TEMELLER.....	10
3.1. Bitümlü Bağlayıcılar	10
3.2. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)	10
3.2.1. BSK uygulaması yapılmış esnek üst yapılarda meydana gelen bozulmalar.....	11
3.2.1.1. Deformasyonlar.....	11
3.2.1.2. Tekerlek İzi	11
3.2.1.3. Bölgesel çökme (oturmalar).....	12
3.2.1.4. Ondülasyonlar	13
3.2.1.5. Çatlamalar	13
3.2.1.6. Ayrışmalar.....	14
3.2.2. Bitümlü sıcak karışım (BSK) bileşenleri	15
3.2.2.1. Agregat.....	15
3.2.2.2. Filler	15
3.2.2.2. Bitüm.....	16
3.3. Modifiye Bitüm	18
3.4. Biyokütle	19
3.4.1. Başlıca biyokütle kaynakları	20

3.4.1.1. Tarımsal biyokütle kaynakları.....	20
3.4.1.2. Orman ve orman ürünlerinden elde edilen biyokütle kaynakları	20
3.4.1.3. Hayvansal biyokütle kaynakları.....	21
3.4.1.4. Kentsel ve endüstriyel atıklardan elde edilen biyokütle kaynakları.....	21
3.4.2. Biyokütlenin kullanım alanları.....	21
3.4.3. Biyokütle atıklarının yeniden kullanımının faydaları	22
3.5. Atık Tarımsal Kül.....	22
3.6. Atık Kızartmalık Yağ	23
4. MATERYAL ve YÖNTEM	24
4.1. Bitümün Modifikasyonu	24
4.2. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddeleri.....	25
4.2.1. Atık kızartma yağı.....	25
4.2.2. Atık tarımsal kül karışımı	25
4.2.3. Bitümün seçimi ve özellikleri	28
4.3. Modifiye Bitümün Karıştırılması	29
4.4. Modifiye Bitüme Uygulanan Deneyler	30
4.4.1. Penetrasyon deneyi.....	30
4.4.2. Yumuşama noktası deneyi.....	31
4.4.3. Parlama noktası deneyi.....	32
4.4.4. Dönel ince film ısıtma kaybı deneyi (RTFOT)	32
4.4.5. FTIR (Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi)	33
4.4.6. Marshall tasarım deneyi	34
4.5. Agregası	35
4.6. Gradasyon.....	35
4.7. Deneyin Yapılışı.....	36
4.8. Agregası Seçimi (Agregası Granülometrisinin Belirlenmesi)	38
4.9. Marshall Stabilitesi Deney Numunelerinin Hazırlanması	39
4.10. Briketlerin Yüksekliklerinin Belirlenmesi	41
4.11. Briketlerin Hacimlerinin Belirlenmesi	41
4.12. Yoğunluk Ve Hava Boşluğu Değerlerinin Bulunması	42
4.13. Sıkıştırılmış Numunelerin Özgül Ağırlığı ve Karışım Yoğunluğu	42
4.14. Karışımın Maksimum Özgül Ağırlığı	42
4.15. Hava Boşluklarının Bulunması	43

4.16. Mineral Agregalar Arasındaki Boşluk Yüzdesi (VMA):.....	44
4.17. Bitüm İle Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA)	44
4.18. Marshall Stabilometresini Kullanarak Stabilite Ve Akma Değerlerinin Bulunması	45
4.19. Optimum Bitüm Miktarı Tayini.....	45
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	46
5.1. Penetrasyon Deneyi Sonuçları.....	46
5.2. Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	48
5.3. Parlama Noktası Deneyi Sonuçları.....	50
5.4. Penetrasyon İndeksi (PI) Sonuçları	50
5.5. RTFOT (Dönel İnce Film Isıtma Kaybı) Deneyi Sonuçları.....	52
5.6. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi Sonuçları.....	54
5.7. Marshall Tasarım Deneyine Göre Stabilite Değerleri	62
5.8. Marshall Tasarım Deneyine Göre Akma Değerleri	62
5.9. FTIR (Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi).....	63
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	70

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1	Tekerlek izi deformasyonu	12
Şekil 3.2.	Bölgesel çökme	12
Şekil 3.3.	Ondülasyon	13
Şekil 3.4.	Çatlamalar	14
Şekil 4.1.	Atık kızartmalık yağ	25
Şekil 4.2.	Atık tarımsal kül karışımı	26
Şekil 4.3.	Mısır sapı külünün XRF analiz sonuçları	26
Şekil 4.4.	Kavak kapak külünün XRF analiz sonuçları	27
Şekil 4.5.	Çam kapak külünün XRF analiz sonuçları	27
Şekil 4.6.	Çam dal külünün XRF analiz sonuçları	28
Şekil 4.7.	Değişik parametre ve seviyelerde hazırlanmış bitüm numuneleri	29
Şekil 4.8.	Kendinden ısıtıcılı High Shear Mikser	29
Şekil 4.9.	Penetrasyon deney cihazı	30
Şekil 4.10.	Yumuşama noktası deney cihazı	31
Şekil 4.11.	Parlama noktası deney cihazı	32
Şekil 4.12.	RTFOT(Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deney) Cihazı	33
Şekil 4.13.	FTIR Cihazı	34
Şekil 4.14.	Çalışmada kullanılan agrega	36
Şekil 4.15.	Numunelerin bekletildiği havuz	37
Şekil 4.16.	Marshall stabilite deney aleti	37
Şekil 4.17.	Marshall stabilite deney tokmağı	38
Şekil 4.18.	Numunelerin dijital tartıyla tartılması	40
Şekil 4.19.	Deney malzemelerinin ısıtıldığı etüv	40
Şekil 4.20.	Kalıplara yerleştirilip sıkıştırılmış numuneler	41
Şekil 4.21.	Numunelerinin 3 boyutunun ölçülmesi	42
Şekil 5.1.	RTFOT Öncesi Penetrasyon deneyi sonuçları	47
Şekil 5.2.	RTFOT Sonrası Penetrasyon deneyi sonuçları	47
Şekil 5.3.	RTFOT Öncesi Yumuşama noktası deneyi sonuçları	49
Şekil 5.4.	RTFOT Sonrası Yumuşama noktası deneyi sonuçları	49
Şekil 5.5.	Penetrasyon İndeksinin Parametrelere göre Değişimi	51
Şekil 5.6.	RTFOT Kütle kayıpları grafiği	52
Şekil 5.7.	1150'şer gram olarak tartımı yapılmış kuru agregalar	54

Şekil 5.8. Karıştırma Cihazı	55
Şekil 5.9. Kuru ağırlıkları alınmış, isimlendirilmiş briketler	55
Şekil 5.10. Sudaki ağırlıkların tartıldığı Arşimet terazisi	56
Şekil 5.11. Marshall stabilite ve akma deney cihazı	56
Şekil 5.12. Stabilite- Bitüm %'si.....	58
Şekil 5.13. Akma- Bitüm %'si	58
Şekil 5.14. Dp- Bitüm %'si	58
Şekil 5.15. Vf- Bitüm %'si.....	59
Şekil 5.16. Vh- Bitüm %'si	59
Şekil 5.17. Vma- Bitüm %'si	59
Şekil 5.18. 1 Nolu Deney RTFOT Öncesi - FTIR	63
Şekil 5.19. 5 Nolu Deney RTFOT Öncesi - FTIR	64
Şekil 5.20. 5 Nolu Deney RTFOT Sonrası - FTIR	64

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Sık Kullanılan Modifiyerlerin Bitüm Üzerindeki Tesirleri	19
Tablo 4.1. Modifiye Bitümün Parametre ve Seviyeleri	24
Tablo 4.2. B 70/100 Penetrasyonlu Saf Bitümün Deney Sonuçları.....	28
Tablo 4.3. Bu Çalışmada Kullanılan Agreganın Fiziksel Özellikleri	35
Tablo 4.4. Bu Çalışmada Kullanılan Agregada Gradasyonu	36
Tablo 4.5. Her Briket İçin Dane Büyüklüklerine Göre Alınan Agregada Miktarları	39
Tablo 4.6. Marshall Tasarım Yöntemi Kriterleri	45
Tablo 5.1. Penetrasyon Değerleri Tablosu	46
Tablo 5.2. Yumuşama Noktası Değerleri Tablosu	48
Tablo 5.3. Parlama Noktası Sonuçları.....	51
Tablo 5.4. Penetrasyon İndeksi Sonuçları.....	50
Tablo 5.5. RTFOT Deneyi sonrası deney gruplarının kütle kayıpları	53
Tablo 5.6. Optimum Bitüm % sinin bulunması için kullanılan hesaplamalar	57
Tablo 5.7. B 70/100 saf bitümün optimum bitüm yüzdesinin Marshall Dizayn yöntemiyle belirlenmesi için yapılan deney sonuçları tablosu	60
Tablo 5.8. B 70/100 saf bitümün optimum bitüm yüzdesinin deney sonuçları tablosu	61
Tablo 5.9. Yapılan Deneyler Sonucu Elde Edilen Stabilite Değerleri	62
Tablo 5.10. Yapılan Deneyler Sonucu Elde Edilen Akma Değerleri	63
Tablo 5.11. FTIR Spektrumuna Göre Numunelerin Frekans Aralıkları	64

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

%	Yüzde
cm^{-1}	Dalga Sayısı Birimi
$^{\circ}C$	Santigrat Derece
devir/dak	Dakikadaki Devir Sayısı

Kısaltmalar

BBR	Kiriş Eğme Reometresi
%F	Karışimdaki filler %'si
%İ	Karışimdaki ince agreg a %'si
%K	Karışimdaki kaba agreg a %'si
D _p	Numunenin pratik hacim özgül ağırlığı
D _{port}	Numunelerin ortalama pratik hacim özgül ağırlığı
DSR	Dinamik Kayma Reometresi
Dt	Numunenin Teorik Max. özgül ağırlığı
G _{sa}	Agreg a zahiri özgül ağırlığı
G _{sb}	Agreg a hacim özgül ağırlığı
G _{se}	Agreg a efektif özgül ağırlığı
ITFT	Dolaylı Çekme Yorulma Testleri
ITSM	İndirekt Çekme Rijitlik Modülü
PAV	Basıncılı Yaşlandırma Kabı Deneyi
P _{be}	Agreg a ağırlığına göre efektif bitüm %'si
RLA	Tekrarlanan Eksenel Yük
RPM	Dakikadaki Devir Sayısı (Revolutions Per Minute)
RTFOT	Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi
RV	Dönel Viskozimetre Deneyi
TFOT	İnce Film Etüvü Deneyi)
V	Numunenin hacmi
V _a	Numunedeki agreg a hacmi %'si

V_b	Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si
V_f	V_{ma} 'nın bitümle dolu boşluk %'si
V_h	Numunedeki boşluk yüzdesi
V_{ma}	Agregalar arasındaki boşluk %'si
W_a	Agregaya göre seçilen bitüm %'si
W_A	Toplam agrega ağırlığı (1150gr)
W_b	Karışıma göre seçilen bitüm %'si
W_B	Bitüm ağırlığı (agregaya göre)
W_{doygun}	Doygun-yüzey kuru ağırlık
W_{hava}	Havadaki kuru ağırlık
W_{su}	Sudaki ağırlık

1. GİRİŞ

Günümüzde esnek üstyapılar tüm dünyada olduğu gibi, ülkemizde de karayolu ulaşımının önemli bir bölümünü oluşturur. 2022 yılı verilerine göre toplamda 68.526 km lik yol ağının 28.306 km si asfalt betonu yollar oluşturmaktadır. Bu toplam uzunluğun %40 lık bir kısmına denk gelen önemli bir uzunluktur (KGM, 2022). Esnek kaplama yolların stabilite ve performans açısından üstün kalitede olması, kullanım süresinin kısa olmaması ve tamirat bedelinin az olması istenmektedir. Esnek üstyapıların bu beklentileri karşılaması için kalıcı deformasyonlar, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları, asfalt kaplama içindeki agreganın su sebebiyle asfalttan sıyrılması ve düşük dayanım gibi önemli bozuklukların asgari seviyeye indirilmesi gerekmektedir. Bu değişiklikler genel olarak esnek üst yapı kaplama malzemelerinden biri olan bitümlü bağlayıcıya modifikasyon yaparak sağlanmaktadır. Bu uygulama, asfaltın verimini artırmak için, asfalt veya asfalt bağlayıcı karışımına belirli oranlarda ve koşullarda modifiye edici katkıların eklenmesiyle yapılır. Son yıllarda sıcak bitümlü karışımların performansını arttırmak için çeşitli malzemeler kullanılarak modifiye bitümlü karışımlar oluşturulmaktadır.

Bu çalışmada; biyokütle ürünlerinden atık kızartma yağı ve atık tarımsal külün (çam dal, çam kapak, kavak kapak, mısır sapı) bitümün fiziksel ve özelliklerine etkisi incelenmiştir. Biyokütle, organik atıkların yanı sıra bitkisel yağ atıkları, tarımsal hasat artıkları dâhil, tarım ve orman ürünlerinden ve bu ürünlerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynaklardır. Biyokütle enerjisi, yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi ve fosil kaynaklı enerjiye göre çevre dostu olması nedeniyle günümüz ve gelecek için önemli, sürdürülebilir bir enerji türüdür.

Çalışma kapsamında, atık kızartma yağı ve atık tarımsal kül karışımı kullanılarak farklı karışım oranlarına sahip modifiye bitüm numuneleri oluşturulmuş, karıştırma hızı sabit tutulurken; karışım sıcaklığı ve karışım süreleri değişken parametreler olarak ele alınmıştır. Bitümlü sıcak karışımların performansını ve stabilitesini artıracak bir tasarım yapılması, katkı miktarının optimize edilmesi, fazla katkı kullanımının engellenmesi ve biyokütle ürünlerinin geri dönüşümü sağlanarak daha ekonomik tasarımlar amaçlanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Konu Hakkında Yapılan Literatür Çalışmaları

Asfalt kaplamaların performansının iyileştirilmesi, kullanım sonucu ortaya çıkan bozulmaların en aza indirilmesi ve dolayısıyla kullanım ömürlerinin mümkün oldukça uzatılmaya çalışılması, geçmişten beri araştırmacıların üzerinde çalıştığı bir konu olmuştur. Bu çalışmaların birçoğunda asfalt kaplamalarında kullanılan bağlayıcılara çeşitli katkı maddeleri eklenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

2.1.1.Çeşitli katkılar ile modifiye edilmiş bitümle ilgili çalışmalar

Şengöz ve Işıkyakar (2007), saf bitümü KRATON D-1101 ve Evatone 2805 polimerleri ile modifiye ederek, asfalt çimentosuna etkilerini araştırmışlardır. KRATON D-1101, SBS polimeri olarak kullanırken Evotone 2805 Eva polimeri olarak kullanılmıştır. SBS polimeri bitüme ağırlıkça yüzde 2, 3, 4, 5, 6 oranlarında eklenirken, Eva polimeri ise yüzde 3, 4, 5, 6, 7 oranda eklenmiştir. Modifiye yapılırken bağlayıcı bitümün karıştırma sıcaklığı 185 C, karıştırma süresi ise 2 saat olarak belirlenmiştir. Modifiye bitümlere stabilite, akma değerlerinin belirlendiği Marshall deneyi yapılmıştır. Çalışma sonucunda SBS ve Eva polimer katkılarının asfalt kaplamasının sertliğini artırdığı sıcaklığa karşı hassasiyetinin ve asfalt kaplamalarının biçimlerinin kalıcı olarak bozulmalara karşı mukavemetinin artırdığını gözlemlemişlerdir.

Chen ve Yuan (2007), çalışmalarında AC-10 ve AC-20 olmak üzere iki değişik türde asfalta SBS-1 ve SBS-r olan iki değişik türde SBS kullanarak modifiye bitümler elde etmişlerdir. SBS katkılarının yüzde 1, 3, 5, 7 ve 9 oranlarında kullanıldığı karışımları 170 C sıcaklıkta 1 saat boyunca karıştırmışlardır. Daha sonra kullanılan SBS nin ağırlığınca yüzde 1,3 ve 5 oranında sülfür eklenmiş ve bu karışım da bir saat boyunca karıştırmıştır. Elde edilen numunelere modifiye bitümlere uygulanan deneylerin bazıları uygulanmış ve sonuç olarak da modifiyeli numunelerin elastikiyet olarak gelişme kaydettiği ve depolama dayanıklılıklarının arttığı gözlemlenmiştir.

Şengöz ve arkadaşları (2009), çalışmalarında penetrasyonu 50/70 olan asfalta yüzde 2, 3, 4, 5, 6 oranında KRATON D-1101 (SBS), yüzde 3, 4, 5, 6 oranında Evatone 2805 (EVA) ve yüzde 2, 3, 4, 5, 6 oranında Elvaloy 3427 AC (EBA) ekleyerek hazırladıkları karışımları, hızı dakikada 1000-1200 devir olacak şekilde 180-185 C sıcaklıklarında

karıştırmışlardır. Oluşturulan numunelere kıvamlılığı ölçen penetrasyon, sıcaklığa karşı duyarlılığı ölçen yumuşama noktası ve yaşlanmayı ölçen TFOT deneyleri yapılmıştır. Asfalta eklenen katkı miktarındaki artış, yumuşama noktasında artışa sebep olurken penetrasyonda düşüşe yani modifiye bitümün sertleşmesine sebep olmuştur. Bitümün sertleşmesi ise asfaltın tekerlek izine karşı mukavemetini düşürdüğünü göstermiştir.

Xiang vd. (2010), Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) ile modifiye ettikleri asfaltın ve yol asfaltının atmosferik ortamdaki yaşlanmasını araştırmışlardır. Yaşlandırma sürecinde her iki asfaltın performanslarındaki değişimler benzerlik göstermiş olup süreç ilerledikçe numunelerin penetrasyon değerleri azalırken yumuşama noktalarında artış gözlemlenmiştir. Her iki asfalt numunesinin kimyasal içeriğinde bulunan sülfoksit ve karbonil miktarının atmosferik ortamdaki yaşlanmayı önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir.

Aksoy, İskender, Oruç ve Özen (2012), birlikte yürüttükleri bir araştırmada stiren-bütadien-stiren ve yağ asidi içerikli modifikasyonu amin ile yapılmış bitümün performansını kıyaslamışlardır. SBS modifiyeli bitüm, geleneksel bitüm ve AS modifiyeli bitümler toplamda 4 adet deneye tabi tutularak karşılaştırılmıştır. Deneylerin sonucunda stiren-bütadien-stiren modifiyeli bitüm ile AS modifiyeli bitümün su hasarı mukavemeti ve çatlama direnci geleneksel bitüme göre artış göstermiştir. Aynı zamanda SBS modifiyeli bitümlerin esneklik modülü yaklaşımının modifikasyonu amin ile yapılmış bitüme göre performansının daha çok olduğu görülmüştür.

Abuawad vd. (2015), yaptıkları çalışmalarda asfalt betonunda meydana gelen su kaynaklı bozulmaların minimize edilmesi amacıyla stiren-bütadien-stiren, hidratlanmış kireç, polifosforik asit ve soyulma önleyici modifiyerler eklemişlerdir. Modifikasyonu bu katkılarla yapılan asfalt betonuna, Modifiye Lottman, tekerlek izi ve kırılma deneyleri yapılmıştır. Deneylerin sonunda soyulma önleyici ve hidratlanmış kirecin su kaynaklı bozulmaları azalttığı, ama polifosforik asidin su kaynaklı bozulmaları azaltmakta herhangi bir katkısı olmadığı saptanmıştır. Bununla birlikte stiren-bütadien-stiren katkısının asfaltın tekerlek izi dayanımını artırdığını ve su kaynaklı bozulmaları büyük oranda kontrol altına alabildiği çalışma sonunda tespit edilmiştir.

Behnood ve Olek (2017), çalışmalarında bitüme oranlı bir şekilde SBS, GTR (kauçuk lastik) ve PPA katkılarını ekleyerek bitümün akışkanlık özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma Dinamik Kayma Reometresi, Basıncılı Yaşlandırma Kabı, Kiriş Eğme

Reometresive, Dönel İnce Film Isıtma Kaybı deneyleri ile yürütülmüştür. Eklenen katkıların tümünün yüksek sıcaklık mukavemetini artırdığı görülmüştür. Bununla birlikte kauçuk lastiğin sertliğinin düştüğü ve sertliğin düşük sıcaklıkta daha çok görüldüğü saptanmıştır.

Rasool vd. (2017), çalışmalarında stiren-bütadien-stiren (SBS)ile Modifiye ettikleri bitüme yüksek oranda rejenere kauçuk (HRR) ilave edilerek yaşlanma direncini incelemişlerdir. Bu incelemeyi penetrasyon, düktilite, yumuşama noktası deneyleri ile yapmışlardır. Stiren-bütadien-stiren modifiyeli bitüme yüksek oranda rejenere kauçuk ilave edilmesinin yaşlanma öncesi ve sonrasında penetrasyon değerinin artırdığı, düşük viskozitelerin işlenebilirliğini artırdığı depolama dayanımını yükselttiği görülmüştür.

Sun vd. (2018), araştırmalarında modifier olarak poliüretan, stiren-bütadien-stiren kullanıp bunları kendi aralarında ve konvansiyonel asfaltla karşılaştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda poliüretanın modifiyer olarak kullanıldığı asfaltın kıvamlılığının, deformasyon dayanımının ve nem hasarı mukavemetinin stiren-bütadien-stireninmodifiyer olarak kullanıldığı asfalta ve konvensiyonel asfalta kıyasla daha çok olduğu görülmüştür. Bununla birlikte stiren-bütadien-stiren modifiyeli asfaltın düşük sıcaklık dayanımının poliüretan modifiyeli asfalta kıyasla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Sun, Lu vd. (2017), çalışmalarında 70 penetrasyon değerli bitüm, stiren-bütadien-stiren modifiyerli bitüm ve modifikasyonunu fazlaca atık yağ ile yaptıkları bitümü karşılaştırmışlardır. Kiriş Eğme Reometresi deney sonuçlarına göre; düşük sıcaklıktaki çatlama dayanımının üç bitüm arasındaki en iyi değerinin yüksek yağ içeren bitüm olduğu; Dönel viskozimetre deneyi sonuçlarına göre ise yüksek sıcaklık dayanımının yüksek yağ içeren bitümle stiren-bütadien-stiren içeren bitümün benzerliklerinin fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte Yaşlanma mukavemetinin en iyi sonuçlarını yüksek oranda atık yağ içeren bitümde olduğu görülmüştür.

Portugal, Lucena vd. (2017), araştırmalarında SBS modifiyeli ile 50/70 penetrasyonlu bitüme yüzde 1-2-3 oranlarında yeni ve atık mısır yağı ilave ederek bitümün akışkanlığını araştırmışlardır. Sonuç olarak, sıcaklık farklılıklarında atık mısır yağı katkılı bitümün kararlılığının diğer numunelerden fazla olduğu, yaşlanma direncinde ise %2 ve %3 mısır yağı katkılı bitümün daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşmakla birlikte, genel olarak kullanılan yağların yeni veya atık yağ olmasının

sonuçları çok fazla değiştirmediği bu nedenle çevresel duyarlılık nedenleriyle atık yağın kullanımının daha uygun olacağı sonuçlarına varılmıştır.

Chen, Podolsky, Williams ve Cochran (2018), çalışmalarında AESO (akrikatlı epoksitlenmiş soya yağı) kullanımının bitüm üzerinde nasıl etilediğini araştırmıştır. Piyasa ürünü olan soya yağı ile laboratuvarda üretilen soya yağı %3 %9 ve %15 oranında kullanılarak modifikasyonlar yapılmıştır. Elde edilen numunelere DSR, BBR, LAS ve RV deneyleri yapılmıştır. Sonuçlara göre kullanılan iki yağında sıkıştırma ve karıştırma sıcaklığını azalttığı ama akışkanlık değerini düşürdüğü görölmüştür. Viskozite değerini düşürdüğünden kritik yüksek sıcaklık performansının da olumsuz etkilendiği görölmüştür. Bitüme eklenen soya yağı arttıkça paralel olarak yorulma performansı yükselmiştir. Ek olarak kullanılan yağlar aynı oranda kullanıldığında laboratuvarlarda üretilen soya yağının yorulma dayanımı ve düşük sıcaklık performansının piyasa da satılan soya yağına göre daha iyi olduğu görölmüştür.

Su, Xiao, Wang, Cong ve Amirkhanian (2018), çalışmalarında atık yağ, ağaç yağları, yağlama yağları, soya yağı gibi çeşitli yağları kıyaslayarak bitüm üzerinde olan etkilerini incelemişlerdir. Yapılan deneylerin sonucunda ağaç kökenli yağların yorulma performansını yükselttiği ve kısa zamanlı performanslarının iyi olduğu görölmekle birlikte, ağır yağların birçoğunun yüksek sıcaklık dayanımında düşüşe yol açtığı gözlemlenmiştir. Ek olarak tekerlek izi direncini am ağacı talaşı yağının artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

2.1.2. Yağ katkılı modifiye bitümle ilgili alışmalar

Yang ve You (2015), çalışmalarında atık ağaç kökenli olan artırılmış, artırılmamış ve polimer modifiyeli yağ olmak üzere üç ayrı tipte biyo-yağ , %5 ve %10 oranlarında eklenerek modifikasyonu yapılan bitümün yüksek sıcaklıktaki performanslarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda kullanılan yağların bitümün yüksek sıcaklık kararlılığını arttırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte polimer modifiyeli bitümün içeriğine bulunan polimer oranını on binde dört gibi çok düşük bir oranda olması performansının diğer bitümlere göre kıyaslandığında fazla olmadığı görölmüştür.

Luo, Zhang ve Cong (2017), çalışmalarında ayrı oranlarda stiren-bütadien-stiren, polietilen polimerleri ve atık yağ kullandıkları modifiye bitümlerin akışkanlık özelliklerini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda polietilen polimer ve atık yağ modifiyeli bitümün yumuşama noktası sıcaklığındaki yükselişin daha az olduğu, penetrasyon değerinin oranındaysa daha fazla olduğu, ayrıca yaşlanma mukavemetinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak atık yağ ve polietilen polimer modifiyeli bitümün tekerlek izi direncinin fazla olduğu, daha az bozulma sergilediği ve depolama dayanımının nispeten iyi olduğu tespit edilmiştir.

Zhang, Wang vd. (2017), araştırmalarında stiren-bütadien-stiren ile modifiye edilmiş bitüme %5 %10 %15 ve %20 oranlarında ağır biyolojik yağ eklenerek modifiyeli bitümler oluşturulmuş ve Dönel Viskozimetre Deneyi. Dinamik Kayma Reometresi gibi deneylere tabi tutularak incelenmiştir. İncelemede, bitimlerin yağ oranının yükselmesi ile birlikte stiren-bütadien-stiren ile modifiye edilmiş bitümlerin akışkanlık değerlerinde azalma ortaya çıkmıştır. Biyolojik yağın bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını düşürdüğü görülmüştür. Stiren-bütadien-stiren modifiyeli bitümün tekerlek izi dayanımının saf bitüme kıyasla daha fazla olduğu ve eklenen yağında bu dayanımı artırdığı gözlemlenmiştir.

Lei, Wang vd. (2018), çalışmalarında atık lastik parçaları ile modifikasyonu yapılan asfaltın yüksek sıcaklık performansını geliştirmek amacıyla mısır atıklarından üretilen yağı %5 %10 ve %15 oranlarında asfalta ilave edilerek inceleme yapmışlardır. Çalışma sonucunda viskozite ölçüsünün önce arttığını daha sonra azaldığı tespit edilmiş ve en fazla viskozite değerine sahip asfaltın %10 oranında yağ eklenen modifiye asfalt olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan Lastik parçalarının yüksek sıcaklık performansını değiştirdiği ve yağlarında performansı artırdığı görülmüştür. Ek olarak modifiyeli bitümün yorulma dayanımının özelliğinin iyileştiği tespit edilmiştir.

Liu, Peng, Wu ve Zhou (2018), araştırmalarında atık motor yağlarını %4 ve %8 oranında 60/80 penetrasyonlu bitüme ve iki ayrı türde stiren-bütadien-stiren modifiyeli bitüme eklenmiş ve karşılaştırılmıştır. Atık motor yağlar ile modifiye edilen asfaltın içerisinde bulunan büyük moleküllerin yüzde oranlarında azaldığı tespit edilmiş ancak küçük moleküllerin yüzde olarak arttığı tespit edilmiştir. Ek olarak asfaltın yaşlanma direncini artırdığı görülmüştür.

Fernandes, Silva, Oliveira (2018), çalışmalarında bitüme polietilen, lastik parçacığı, stiren-bütadien-stiren ile atık ve geri dönüşüm ile elde edilen motor yağlarını ekleyerek bitümün özyapısal özellikleri incelenmiştir. alışmalar nihayetinde modifiyeli bitümlerin ısı duyarlılıklarının düşük olduğu, tekerlek izi direncinin yüksek sıcaklıklarda daha yüksek olduğu, düşük sıcaklıkta ise modifiyeli bitümün daha esnek davrandığı tespit edilmiştir. Atık yağlar ile geri dönüşüm geçiren yağlar karşılaştırıldığında geri dönüştürülen yağların yüksek akışkanlık değerinden ötürü meydana gelen bağlayıcı özellikleri ile daha fazla miktarda bitümün yerine geçebileceği tespit edilmiştir.

Li, Zhang vd. (2019), çalışmalarında %4 oranında stiren-bütadien-stiren ile modifiye edilmiş bitüme soya yağı eklemek suretiyle bitümün özelliklerindeki değişimleri kıyaslamışlardır. İnceleme sonucunda yumuşama noktası değerinin artmasıyla, düşük ve yüksek sıcaklık performansında soya yağı katkılı stiren-bütadien-stiren modifiyeli bitümün, sadece stiren-bütadien-stiren katkılı bitüme göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca soya yağı eklenerek oluşturulan bitümün tekerlek izi direncini, yorulmaya bağlı oluşan çatlamalara karşı direncin iyileştideği görülmüştür. Ek olarak soya yağı eklenmesinin SBS modifiyeli asfaltın maliyetini de düşürebileceği ön görülmüştür.

Dong, Yang vd. (2019), çalışmalarında hintyağı ile elde edilen SBH biyo-asfaltı, kırıntı kauçuk ve SBS bitüme eklenerek oluşturulan bu birleşimin performansını incelemişlerdir. İnceleme sonucunda bitümün yaşlanma direncinin iyileştideği, %15 oranında SBH eklenen bitümün yüksek ve düşük sıcaklıkta performansının yükseldideği tespit edilmiştir.

Zargar vd. (2012), yaşlanmış bitümün gençleşmesinde atık yemeklik yağın etkisini araştırmışlardır. Penetrasyon değeri 40/50 ve yaşlandırılmış bitüme ağırlıkça yüzde 1, 2, 3, 4, 5 oranlarında atık yemekli yağ ekleyerek 160 derece sıcaklıkta yarım saat karıştırıp yağ oranının değişiminin penetrasyon ve yumuşama noktası üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda atık yemeklik yağ oranının fazla katıldığı modifiye bitümlerde yumuşama noktası değeri azalırken penetrasyon değerinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Atık yemeklik yağ katkısının bitümü gençleştirdideği ve katkı olarak olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Sun vd. (2016), penetrasyon derecesi 40/60 olan bitüme Atık yemeklik yağlardan oluşturulmuş biyo-yağ eklenerek modifikasyonu yapılmış bitümün özelliklerini

araştırmışlardır. Bitüme yüzde 2, 4, 6, 8 oranlarında biyo-yağ eklenerek 135 derece sıcaklıkta, dakikada 5000 devir hızda karıştırılmıştır. Bu karışıma; bitümün zaman içinde orta ve yüksek sıcaklıklarındaki akışkanlığını belirleyen dinamik kesme reometresi deneyi, bitümün eğilme sertliğini ölçmek için kiriş eğme reometresi deneyi ve işlenebilirlik özelliğini belirlemek amacıyla Dönel Viskozimetre Deneyi deneyleri yapılmış; biyo-yağların bitümde yumuşama noktasını ve akmaya karşı mukavemetini azalttığı, penetrasyon değerini artırdığı gözlemlenmiştir.

2.1.3. Kül katkılı modifiye bitümle ilgili çalışmalar

Xue vd. (2014), çalışmalarında bitüm modifikasyonunda biyokütle küllerinden iki tanesini (pirinç kabuğu külü ve talaş külü) kullanmışlardır. Modifiye bitümün bazı fiziksel özelliklerinden viskozitesini, işlenebilirliğini ve yıpranma özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde kül ve bitümün kimyasal reaksiyona girmediği, fiziksel olarak homojen bir şekilde karıştığı gözlemlenmiştir. Talaş külüne nispeten pirinç kabuğu külünün bitümün fiziksel özelliklerini beklenen performans değerlerine daha çok yaklaştırdığı görülmüştür. Sonuç olarak, modifiye bitümün yüksek sıcaklıklarda bozulma direnci artmıştır. Pirinç kabuğu külü ve Talaş külünün modifikasyonda kullanılması tekerlek izi direncinde artış sağladığı gözlemlenmiştir.

ZL Abo-Şanab vd. (2021), çalışmalarında; bitümün ağırlıkça %3, 5, 7 ve 10 oranında atık mısır koçanı, pirinç kabuğu ve şeker kamışı liflerinden oluşan tarımsal külleri kullanarak modifiye bitümün performansını artırmayı amaçlamışlardır. Modifiye bitümün fiziksel özelliklerini incelemek için Penetrasyon, yumuşama noktası deneyleri, akışkanlık özelliğini incelemek için Rotasyonel viskozimetre deneyi yapılmıştır. Sonuç olarak penetrasyon değerinde azalma, yumuşama noktası değerinde artış görülmüş ve yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyon değerinde azalma, düşük sıcaklıklarda termal çatlamalarda azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte tekerlek izi direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Genel olarak saf bitüme kıyasla modifiye bitümün performans değerlerinin daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Zülfikri vd. (2016), asfalt karışımlarında filler malzemesi olarak şeker kamışı küspesi külünün etkisini inceledi. Şeker kamışı küspesi külünün normal sıcak asfalt karışımının Marshall stabilitesini, akış ve Esneklik Modülünü artırdığı görülmüştür. Şeker kamışı küspesi külü; saf bitümlü sıcak asfalt karışımına göre sırasıyla Marshall stabilitesini

% 0.6, akışı % 4.9 ve Esneklik Modülünü %17.4 artırdığı gözlemlenmiştir.

Arabani ve Esmaaeli çalışmalarında, toplam bitüm ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yer fıstığı kabuğu külünü modifiye edici olarak eklemişlerdir. Bitüme uygulanan deneyler, yüksek sıcaklıkta depolama kararlılığı, dönme viskozitesi (RV), dinamik kayma reometresi (DSR), ve bükme kirişi reometresi (BBR) testleri yapılmıştır. Ayrıca, Marshall, indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM), tekrarlanan eksenel yük (RLA) ve indirekt çekme yorulma (ITF) testleri yapılmıştır.

Sonuç olarak bitümün ağırlıkça %10 a kadar yer fıstığı kabuğu külü ilave dildiği karışımla yüksek sıcaklıkta depolama sırasında kararlı kaldığını ortaya koydu. Ayrıca, asfalt bağlayıcıya yer fıstığı kabuğu külü ilavesinin ardından yumuşama noktası, viskozite ve tekerlek izi direncinde bir artış, penetrasyon değeri, süneklik, yorulma direnci ve düşük sıcaklıkta çatlama direncinde bir azalma gözlemlendi. Ayrıca yer fıstığı kabuğu külü ile modifikasyonun asfalt karışımlarının mekanik performansını arttırdığı kanıtlanmıştır.

Sahar Abbasalizadeh Boura & Saeid Hesami (2020), Çalışmalarında biyokütle filler malzemesi olarak Pirinç Kabuğu Külü ve Külünü kullanmışlardır. Karışımlardaki kül katkısının performanslarına olan etkilerini incelemek amacıyla Marshall Stabilesi, Dolaylı çekme mukavemeti, Nem duyarlılığı ve esneklik modülü testleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, %75 Pirinç Kabuğu Külü ve %25 kireçtaşı oranlarındaki karışımın, %100 kireçtaşı içeren karışıma oranla Marshall Stabilesinin daha fazla olduğu ve nem duyarlılığının daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte; %e 25 Ağaç Testere külü ve % 75 kireçtaşı oranlarındaki karışımın en fazla gerilme başarımına sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle, filler malzeme yerine biyokütle küllerinin kullanılmasının, sürdürülebilirliğin sağlanmasının yanı sıra, sıcak asfalt karışım performansını iyileştirdiği görülmüştür.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Bitümlü Bağlayıcılar

Bitümlü bağlayıcılar, Bitüm ve katran olmak suretiyle sınıflandırılırken, Bitümler de kendi içinde Doğal ve Yapay bitümler olarak üzere iki alt başlığa ayrılmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması aşağıdaki gibi gösterilebilir.

1. Bitüm

➤ Doğal Bitümler

- Kaya Asfaltı
- Gilsonit
- Göl Asfaltı

➤ Yapay Bitümler

- Bitüm
- Modifiye Bitüm
- Sıvı Petrol Bitüm
- Okside Bitüm
- Bitüm Emülsiyonları

2. Katran

- Odun Kökenli Katranlar
- Kömür Kökenli Katranlar (Yüknü, 2021)

3.2. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)

Bitümlü sıcak karışım; iri agregalar ile filler boyutları arasındaki agregaların uygun gradasyonuna göre ayarlanmış agregalar malzemesi; agregalar oranına göre çok daha az miktarda bitümlü bağlayıcı ve hava boşluğundan oluşan, belirli sıcaklık, nem gibi şartlar altında karıştırılan esnek üst yapı kaplama malzemesidir.

Bitümlü sıcak karışımlar günümüzde kullanılan en gelişmiş kaplama malzemesi olmakla birlikte maliyetleri oldukça yüksektir. Bu nedenle, uzun ömürlü olması ya da bozulmalara karşı dayanıklı olması gibi beklentileri karşılamalıdır. Kullanıldığı yol tipi ya da uygulanacağı coğrafyaya göre spesifik olarak performans beklentileri değişmekle birlikte, genel olarak; ekonomik olması, dayanımının yüksek olması, yüzey pürüzlülüğünün yeterli olması, işlenebilir olması, imalat sırasında ve sonrasında

bozulma olmaması gibi özellikler beklenir.

Esnek üst yapı kaplamasının sıcak karışım üretimi esnasında makul nicelik ve çeşitte bitümlü bağlayıcı kullanılmazsa; karışımın üretimi esnasında ve/veya sonrasında üst yapı kaplamasında strüktürel sorunlar ortaya çıkar. Karışımın üretimi sırasında bitümün dizayn sıcaklıklarının üzerindeki bir sıcaklıkta karışıma eklenmesi nedeniyle kaplamalarda, kalıcı bozulma; bitümün dizayn sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta karışıma eklenmesi nedeniyle kaplamalarda çatlama ve sökülme, gibi sorunlar ortaya çıkarken, nicelik bakımından hacimce az ya da fazla eklenmesiyle işlenebilirlik, kuma gibi sorunlar ortaya çıkabilir.

Bununla birlikte esnek kaplamalı yollarda genel olarak oluşan kusurların sebeplerini trafikselsel, çevresel, yapısal ve malzeme kaynaklı olarak dört başlık altına toparlayabiliriz. Bu sebeplerin sonucu olan kusurları da deformasyonlar, ayrışmalar ve çatlamlar halinde sıralamak mümkündür (Bağdatlı, 2017).

3.2.1. BSK uygulaması yapılan esnek üst yapılarda meydana gelen bozulmalar

3.2.1.1 Deformasyonlar

Deformasyonlar, esnek üst yapı kaplama serimi ve sıkıştırma işleminden belirli bir süre sonra meydana gelen yapısal bir bozulma türüdür. Yol boyunca yer yer görülen bu bozulma türü kalıcıdır. Nedenlerinden bazıları; üst yapı tabaka kalınlıklarının yeterli olmaması, üst tabakanın altında kalan zeminin hacminde meydana gelen değişimler, bağlayıcı malzeme ya da ince agreganın (filler) gereğinden fazla kullanılması, akaçlamanın yeterince iyi yapılmaması, üst yapı kaplamasının kompaksiyonunun yeterince iyi yapılmaması ve sıcak asfalt karışımının sağlamlılığının az olmasıdır (Kutluhan, 2008; Tunç, 2004).

3.2.1.2 Tekerlek izi

Yoldan geçen araçların tekerleklerinin yola değdiği noktalarda yol eksenı boyunca meydana gelen yer çekimi doğrultusundaki kalıcı bozulmalara tekerlek izi denir. Çoğunlukla ağır trafik yükünün meydana geldiğı yollarda oldukça fazla görülür. Tekerlek izleri özellikle trafiğı yoğun ve sıcaklıkların yüksek olduğı bölgelerde sorun teşkil etmektedir. Tırmanma şeritlerinde ağır taşıtların yavaş hızları, büyük derece penetrasyonlu asfalt, sıkıştırma işleminin yeteri kadar yapılamaması gibi sebeplerle

meydana gelir (Tunç, 2004). Tekerlek izi oluşumu yapısal, akma, aşınma ve oturma tekerlek izleri olmak üzere 4 tipten oluşur.



Şekil 3.1. Tekerlek izi deformasyonu

3.2.1.3 Bölgesel çökme (oturmalar)

Yolun belirli bölgelerinde 0,5-2,0 m yarıçaplı dairesel şekle yakın boyutlu çökme ve oturma şeklinde görülen bozulmalardır. Kompaksiyon işleminin yeteri kadar yapılmaması, aşınma katmanının deformasyonu, gereğinden fazla su muhtevası, ayrışma vb. nedenlerle meydana gelir. Yolun belli kısımlarında oluştuklarından dolayı onarılmaları mümkündür (Tunç, 2004).



Şekil 3.2. Bölgesel çökme

3.2.1.4 Ondüasyonlar

Bitümlü sıcak karışımların stabilitesinin yetersiz olmasıyla kaynaklanan trafik akışının olduğu doğrultuda kaplamada dalgaya benzer şekilde oluşan bozulmalardır. Üstelik çok fazla bitüm, binder tabakasının yetersizliği, yüksek penetrasyon derecesine sahip asfalt ondüasyonların yani dalgalanmaların oluşumuna neden olabilir. Yolun belli kısımlarında oluştuklarından dolayı onarılmaları mümkündür (Tunç, 2004).



Şekil 3.3. Ondüasyon

3.2.1.5 Çatlamalar

Asfalt betonu kaplamaları üstündeki trafik yükleri, çevre ve iklim etkisi ile çeşitli şekillerde, büyüklüklerde ve derinlikte oluşan deformasyonlardır. Çatlaklar genellikle stabilite çatlağı, yorulma çatlağı ve yansıma çatlakları olarak sınıflandırılabilirler.

- Stabilite çatlakları, trafik yüklerinin kaplamanın altında oluşturduğu çekme gerilmelerinin kaplamanın çekme mukavemetini aşması sonucunda kaplamanın altından başlayarak zamanla yukarıya çıkması ile oluşur ve bu çatlaklar yapısal çatlaklardır.



Şekil 3.4. Çatlamlar

- Yorulma çatlakları, ağır trafik yükü tekrarı ile kaplamanın yorulma dayanımını aşması ile oluşur. Bu çatlaklar karışımı oluşturan malzeme özelliklerine, karışım özelliklerine, ağır trafik etkisine ve çevresel koşullara bağlıdır.
- Yansıma çatlakları, zarar görmüş bir esnek ya da rijit kaplamanın üstüne takviye tabakası yapıldığında ya da yarı rijit bir temel tabakası üstüne yapılan esnek kaplamada ya da kaya zemin üstüne 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 bölümlerdeki çatlakların yüzeye yansıması sonucu oluşmaktadır (Tunç, 2004).

3.2.1.6 Ayırışmalar

Bu tip bozulmalarda aşınma tabakasının trafiğin ve iklim faktörlerinin mekanik etkisi ile zamanla kaplamadan küçük parçalar halinde ayrılmasından kaynaklanır ve kopma ve parçalanma şeklinde görülür. Ayırışmalara genel olarak asfaltın belirli bir adezyona sahip olmaması ve penetrasyon derecesinin yüksek olması, serim sırasında segregasyon ya da karışımın homojen olmaması, kullanılan malzemelerin düşük kalitede olması gibi sebepler yol açar. Ayırışmalar, folluk tipi oyuklar, sökülmeler, soyulmalar ve kusmalar olarak dört tipte ele alınabilir (Tunç, 2004).

Bitümlü sıcak karışımlarda görülen bozulmaları önlemek veya en aza indirmek için BSK'nın bileşenlerini ve özelliklerini tanımak gereklidir. Bitümlü sıcak karışımların bileşenlerinden, hacimce en çok alan kaplayanı olan agrega, karışıma viskoelastik özellik katan bitümlü bağlayıcı ve işlenebilirlikte önemli rol oynayan filler malzemelerini kısaca aşağıdaki gibi sıralayabiliriz (Tunç, 2004).

3.2.2. Bitümlü sıcak karışım (BSK) bileşenleri

3.2.2.1 Agregata

Agregata; çeşitli boyutlarda parçalanmış ve/veya bütün taneler halinde doğal, suni ya da her iki tipi bir arada bulunan mineral malzeme kütlesidir (TS 706, 2017).

Esnek üst yapı kaplamasının yük taşıma performansını etkileyen en önemli bitümlü sıcak karışım bileşeni olan agregata; kum, çakıl, kırmataş, cüruf ve diğer mineral bileşiklerden meydana gelir (Yağız ve ark., 1967), (Asfalt El Kitabı, 2002).

Bitümlü sıcak kaplamalarda %90-95 oranında kullanılan agregalar seçilirken temiz olmasının yanında dikkat edilmesi gereken bazı fiziksel ve mekanik özellikler de vardır. Bu özelliklerin bilinmesi agregaların kullanılacağı bitümlü karışımlar için yeterliliğini anlamamıza yardımcı olmaktadır.

Agreganın kullanılacağı tabakaya göre dane boyutu ve gradasyona dikkat edilirken, işlenebilirlik, sıkıştırılabilirlik ve uygun stabilite için dane şekline dikkat edilir. Agregaların pürüzlülüğü kayma gerilmesi direnciyle doğru orantılı olduğundan yük taşıma kapasitesi için danelerin yüzey yapısına bakılır. Karışımda kullanılan agregaların bitümle yapışmasını sağlamak, bitüm oranı ve emilimi etkilediğinden agreganın yeterli gözenekliliğe sahip olması beklenir. Don etkisi ve su sebebiyle ufalanmaya ve ayrılmaya, kırılmaya karşı dayanıklı olması için sağlamlık özelliğine dikkat edilirken; yine su etkisiyle bitümün agregata üzerinden soyulmaması için bitümle kaplanabilme özelliğine dikkat edilir. Bu nedenle agregaların bu özelliklerini belirlemek için agregalara çeşitli deneyler yapılmaktadır. Bu deneyleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Elek Analizi Deneyi (ASTM C131 – TS 1900)
- Los Angeles Aşınma Deneyi (TS EN 1097-2 - AASHTO T96)
- Yassılık İndeksi Değeri (BS 812)
- Cilalanma Deneyi (TS EN 1097-8)
- Vialit Yöntemi İle Yapışma Deneyi
- Soyulma Mukavemet Deneyi (ASTM D 1664)
- Özgöl Ağırlık (TS EN 1097-6)Ve Absorbsiyon Deneyi (Orhan, F 2012)

3.2.2.2 Filler

Bitümlü sıcak karışımlarda büyük iri ve ince daneli agregalar arasındaki boşluğun bir kısmını doldurmak ve yüksek sıcaklıklarda esnek üst yapı kaplamasının bozulmalara

karşı direncini artırma amacıyla kullanılan, 0,075 mm lik elekten geçen, bitümlü karışım içinde genel olarak içinde % 3 ile % 9 oranları arasında bulunan BSK bileşenidir.

Fillerin bir etkisi bağlayıcılık olduğundan BSK içerisinde bitüm gibi davranarak bağlayıcı etki gösterir ve harç oluşturur. Diğer bir etkisi ise belli bir orana kadar ince agregada gibi boşluk doldurduğundan ince agregada gradasyonunu değiştirir ve agregada daneleri arasındaki temas noktasının sayısını artırarak karışımın yoğunluğunu artırır. Filler Bitümlü sıcak karışımlara fiziksel etki olarak etki sağlamalı, kimyasal olarak reaksiyona girmemelidir. Bitümlü sıcak karışımın sıcaklığı filleri fiziksel, kimyasal olarak herhangi bir değişikliğe uğratmamalı, bağlayıcıya karşı adezyon performansı yeterli olmalıdır (Ağar ve Umar, 1991).

3.2.2.3 Bitüm

Bitüm, bilinen 250 den fazla kullanım alanına sahip, ham petrol yataklarındaki fay sızıntıları sebebiyle doğal olarak doğada bulunabilen ya da ham petrol-taş kömürü gibi malzemelerin çeşitli işlemlerden geçirildikten sonra yan ürün veya artık ürün olarak elde edilebilen yapışkan, su geçirmez, hidrokarbon bir malzemedir (Lav, A. H. 2004).

Bitümün başlıca kullanım alanları şöyledir:

Tarımda;

- Çiftlik ambarı zemini, hayvan besleme platformları ve benzeri zeminlerin izolasyonunda,
- Ağaçların boyanmasında, yer üstü ve yer altında su ve nem bariyerlerinin oluşturulmasında,

Binalarda;

- Temel, çatı ve benzeri alanlarda su yalıtımının yapılmasında
- Likit çatı kaplamaları, lamine çatı kiremitleri, plastik çimento, şingıl ve benzeri maddelerin üretilmesinde
- Taş duvar kaplama, ses yalıtımı, hava kurutmalı boyalar, vernikler, tesisat ve boruların geçirimsizliğinde

Hidrolik ve Erozyon Kontrolü;

- Kanal astarların dolgu macunlarında
- Baraj harçları, baraj kaplama-koruma, su yolu korumalarında
- Kum tepeleri stabilizasyonunda,
- Toprak seti ve akarsu kıyıları koruma şiltelerinde,

Endüstride;

- Alüminyum folyo bileşimleri, boya bileşimleri, kağıtlar, boru hattı izolasyonu-laminasyonunda,
- Otomotivde; fren, debriyaj balataları, ara sac şeritlerinde, taşıt altlarında
- Elektrikte; Armatür karbonları, Akü kutuları, buat bileşimleri, bantlar, kablo kaplamalarında,
- Parlatıcı bileşikler, tabut kaplamaları, mumyalama, genişleticiler, patlayıcılar, yangın söndürme bileşiklerinde,
- Güçlendirilmiş bitüminize kumaşlar, branda bezi, halı kaplama, kumaşlar, keçelerde
- Küf önleyiciler, Talaş, mantar asfalt bileşikleri, İşlenmiş deri, ambalaj kağıtlarında,
- Likit çatı kaplamaları, lamine çatı kiremitleri, plastik çimento, şingıl ve benzeri maddelerin üretilmesinde
- Taş duvar kaplama, ses yalıtımı, hava kurutmalı boyalar, vernikler, tesisat ve boruların geçirimsizliğinde
- Asit izolasyonlu emaye, reçine ve vernikler, anti-oksidanlar ve solventler, pas ve çürüme önleyici boyalarda
- Döküm kalıpları, kil maddeler, depilatuarlar, genişleme derzleri, suni deri, yakıt, conta, gramafon plakları, ayna arkası, kauçuk kaplama bileşimleri ayakkabı taban ve dolgularında

Demiryolları;

- Balast özellikleri iyileştirmede, kıvrım yağları, aderans artırıcı, ray dolgularında
- Yaya geçidi kaplaması, istasyon platformları, yükleme alanlarında
- Demiryolu traversleri, taş döşenmiş balastlarda

Eğlence;

- Paten sahaları, yüzme havuzları, koşu-yarış pistlerinde,
- Tenis kortları sahaları için kaplanmış yüzeylerde,
- Jimnastik ve spor salonlarında, açık hava sinemalarında,
- Sentetik oyun alanları yüzeyi altına yapılan taban malzemesinde

Yol kaplamasında;

- Asfalt blokları, tuğla dolguları, köprü üst kaplamalarda
- Çatlak dolguları, drenaj kanalları, beton altı izolasyonunda,
- Zemin stabilizasyonu, otoyollar, caddeler, banketlerde ve daha birçok alanda kullanılmaktadır (Lav, A. H. 2004).

Bitüm fiziksel olarak, sıcaklığa bağlı olmak üzere değişim göstererek katı veya viskoz kıvamda bulunabilir. Yapışkanlık, bağlayıcılık, geçirimsizlik gibi çok çeşitli özellikler sahip olan bitüme fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleme üzere:

- Penetrasyon Deneyi (ASTM D5-AASHTO T49 EN 1426- TS 118)
- Yumuşama Noktası (ASTM D36- EN 1427- TS 120)
- Trikloretilende çözünürlük (ASTM D2042- AASHTO T44 TS 1090)
- İnce film halinde ısıtma (TFOT) (ASTM D1754- AASHTO T179)
- Parlama noktası (ASTM D113- AASHTO T5 TS 119)
- Özgül Ağırlık (TS 1087- ASTM D70) deneyleri yapılmaktadır.

3.3. Modifiye Bitüm

Saf bitümlerin kullanım ömürleri, artan trafik yoğunluğu altında beklenen performansı karşılamamaktadır. Bu amaçla saf bitüme fiziksel, kimyasal ya da diğer katkılar eklenerek modifikasyonu yapılır. Böylece modifiye bitümler; sıcaklık farklarına karşı daha az duyarlı olur, modifiye bitümün kullanıldığı kaplamalar sıcaklıktan dolayı oluşan bozulmalara karşı daha mukavemetli olur, yaşlanmaya karşı direnci artar, yüksek sıcaklıktan kaynaklanan tekerlek izinde oturması azalır, düşük sıcaklıktan kaynaklanan termal çatlakları azalır ve esnekliği korunur, çatlakları önlenir, agrega ve bitüm arasındaki oksidasyona karşı direnci artar (Yükü, K. ve Arkadaşları 2021).

Modifiye bitümün oluşturulmasında kullanılan modifiyerler bitümlü bağlayıcıların amaçlarına uygun olmalıdır. Soğuk iklimlerde kullanılan modifiyerler ile işleme performansının spesifik olarak belirli bir düzeyde beklendiği bitümlü bağlayıcıların modifiyerlerinin de farklı olması gerekmektedir.

Örnek olarak; kalıcı deformasyona karşı direncin artmasını beklediğimiz bir modifikasyonda yumuşama noktası değerini artıracak modifiyer- Termoseting Polimerler, Filler- kullanılması doğru olacaktır. Öte yandan asfalt karışımının bağlayıcılığını artırmak, penetrasyon ve yumuşama noktasını düşürmek ya da akışkanlığı düşürmek hedeflendiğinde yağların modifiyer olarak kullanımı uygun olacaktır.

Tablo 3.1. Sık Kullanılan Modifiyerlerin Bitüm Üzerindeki Tesirleri (Ilıcalı, 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

Bitümlü bağlayıcı karışımının uygulanacağı çevresel koşullar, trafik yükü ve tipi dikkate alınarak, esnek kaplamanın beklenen özelliklerine göre modifiyer seçilir. Kısa ve uzun süreli sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetin azaltılması, yüksek sıcaklıktan kaynaklanan tekerlek izinin azaltılması ya da düşük sıcaklık etkisinden kaynaklı termal çatlakların azaltılması, deformasyon direncinin fazla olması, rijitliğin azaltılması, su ve nem hasarının azaltılması, karışım stabilitelerinin artırılması, yaşlanma direncinin artırılması modifiye bitümlü bağlayıcıların kullanıldığı asfalt karışımlardan beklenen teknik özelliklerinden bazılarıdır.

3.4. Biyokütle

Biyokütle, organik atıklar, bitkisel yağ atıkları, tarımsal hasat artıkları ve tarım ve orman ürünlerinin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünler gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen bir enerji türüdür. Bu tür bir enerji, fosil kaynakların aksine

evre dostu olduğu için gelecek için önemli bir sürdürülebilir enerji kaynağı olarak görülür.

Biyoktle enerjisi, organik atıklar, bitkisel yağ atıkları, tarımsal hasat artıkları ve tarım ve orman ürünlerinin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünler gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilir. Bu tür bir enerji, fosil kaynakların aksine evre dostu olduğu için günümüz ve gelecek için önemli bir sürdürülebilir enerji kaynağıdır.

Biyoktle enerjisi, sosyal ve ekonomik etkiyi birlikte yaratan tek yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyoktle, evre dostudur ve ısı-soğuk, elektrik, katı-sıvı-gaz-biyoyakıtlar gibi farklı türlerde enerjiye ulaşılmasına yardımcı olur. Ayrıca biyokütleden elde edilebilen ulaştırma yakıtları ve petrol ve petrol türevlerinden elde edilen yüzlerce kimyasal madde de mevcuttur.

Tarımsal biyoktle, hasat sonrası arta kalan atıklar, budama atıkları ve hayvansal atıklardan oluşur. Bu tür biyoktle, ülkemizde bulunan linyitlerden daha yüksek ısıl değere sahiptir. Örneğin, fındık zurufu 4226 kcal/kg, ayçiçeği sapı 4040 kcal/kg ve eltik kavuzu 3725 kcal/kg ısıl değere sahiptir. Bitkisel biyoktle ise, fotosentez sürecinde ortamdaki CO₂'yi güneş işığı ve klorofil yardımıyla yaşam enerjisine dönüştürür. Biyoktle enerji formuna dönüştürüldüğünde, dönüşüm sonucu ortaya çıkan karbondioksit, biyoktle oluşumu sırasında emilen karbondioksit ile eşittir ve bu nedenle biyoktle enerjisi karbon ntrdr. Bu özelliği sayesinde, biyoktle, CO₂ salımlarını kontrol altında tutarak iklim değişikliğine katkıda bulunan önemli bir enerji kaynağıdır. Tarım ve Orman Bakanlığı, (2023).

3.4.1 Başhca biyoktle kaynakları

3.4.1.1 Tarımsal biyoktle kaynaklar

Tarımsal biyoktle kaynakları, tarımsal atıklar, budama atıkları gibi tarım sektöründen elde edilen ürünlerdir. Tarımsal atıklar arasında mısır, buğday, arpa, avdar, pamuk, soya, şeker pancarı ve çerez fındığı gibi ürünler de yer almaktadır. Bu tür biyoktle kaynakları, yüksek ısıl değere sahip olmaları nedeniyle enerji üretiminde kullanılabilirler.

3.4.1.2 Orman ve orman ürünlerinden elde edilen biyoktle kaynakları

Ormanlarda büyüyen bitkiler ve orman ürünlerinin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan

ürünlerdir. Örnek olarak, ormanlarda büyüyen ağaçların dalları, kökleri ve yaprakları gibi atıklar biyokütle olarak kullanılabilir. Ayrıca, orman ürünlerinin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünler de biyokütle olarak kullanılabilir. Örnek olarak, kereste fabrikalarında üretilen kereste tüfleri, marangoz atölyelerinde üretilen marangoz tozu gibi ürünler orman ve orman ürünlerinden elde edilen biyokütle kaynakları olarak kabul edilebilir.

3.4.1.3 Hayvansal biyokütle kaynakları

Çiftliklerde üretilen süt, et ve yumurta atıkları, hayvan dışkısı ve gübre gibi ürünler hayvansal biyokütle olarak kullanılabilir. Ayrıca, hayvanların beslenmesine yönelik olarak üretilen ürünler de hayvansal biyokütle kaynakları olarak kabul edilebilir. Örnek olarak, tavuk, süt sığırcılığı, kümes hayvanları ve büyükbaş hayvanlar gibi çeşitli hayvanların beslenmesine yönelik olarak üretilen mısır, buğday, arpa, soya ve çavdar gibi ürünler hayvansal biyokütle kaynakları olarak kabul edilebilir.

3.4.1.4 Kentsel ve endüstriyel atıklardan elde edilen biyokütle kaynakları

Evlerde üretilen gıda artıkları, kanalizasyon ve dip çamurları, parklar ve bahçelerde oluşan bitkisel atıklar, ağaç dalları ve yapraklar gibi ürünler kentsel atıklardan elde edilebilir. Ayrıca, endüstriyel atıklardan da biyokütle üretilebilir. Örnek olarak, endüstriyel üretim süreçlerinde oluşan organik atıklar ve bitkisel atıklar, yemekhane atıkları ve evsel atıklar gibi ürünler endüstriyel atıklardan elde edilebilir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2023).

3.4.2 Biyokütlenin kullanım alanları

Enerji üretimi: Biyokütle atıklarından, gıda atıkları, evsel atıklar, tarım atıkları gibi atıklar biogaz olarak enerji üretiminde kullanılabilir.

Tarım: Hayvansal atıklar, gıda atıkları gibi maddeler tarımda gübre olarak kullanılabilir.

Endüstri: Biyokütle atıkları, endüstriyel faaliyetlerde hammadde olarak kullanılabilir.

Örneğin, kağıt endüstrisi atıkları kağıt üretiminde hammadde olarak kullanılabilir.

Enerji açısından kullanım: Biyokütle atıkları, odun, pelet gibi maddeler olarak enerji açısından kullanılabilir. Örneğin, ağaç kabukları, dalları gibi maddeler odun olarak kullanılabilir.

İnşaat: Biyokütle atıklarının inşaat sektöründe kullanımı, çevre dostu ve yenilenebilir

bir malzeme olarak kabul edilir. Bu atıklar, inşaat projelerinde, özellikle yapıların duvar kaplamaları, zemin kaplamaları gibi bölümlerinde kullanılabilir.

Biyokütle atıklarının inşaat sektöründe kullanımı, çevre açısından da birçok fayda sağlar. Örneğin, bu atıkların kullanımı ile atıkların doğada birikmesi önlenir ve doğal kaynakların tasarrufu sağlanır. Ayrıca, biyokütle atıklarının kullanımı ile inşaat projelerinde atık miktarı azaltılır ve bu da çevre kirliliğini azaltır.

3.4.3 Biyokütle atıklarının yeniden kullanımının faydaları

Biyokütle enerjisi, dünyadaki artan nüfus ve sanayileşme nedeniyle artan enerji ihtiyacını çevre dostu ve sürdürülebilir şekilde karşılamak için önemli bir kaynaktır. Biyokütle enerjisi, çeşitli üstünlükleri nedeniyle diğer kaynaklardan ayrılmaktadır. Bu üstünlükler şunlardır:

- Kolay ulaşım
- Her ölekte enerji üretimi için uygunluk
- Kolay bir şekilde düşük maliyet ile depolanması
- İşlenme kolaylığı
- Düşük NO_x ve SO₂ salımları ile çevre kirliliği oluşturmaması
- Sera etkisi oluşturmaması
- CO₂ dengesinin sağlanması
- Asit yağmurlarına yol açmaması
- Biyokütle atıklarının yeniden kullanımı, atık miktarını ve çevresel etkilerini azaltır.
- İthalat gereksinimini azaltır ve ekonomik yükü hafifletir.
- İklim değişikliğine daha az etki eder (Kaplun, 2014).

3.5. Atık Tarımsal Kül

Kül, yüksek sıcaklıklarda yakılan organik maddelerin kalıntısıdır. Örneğin, odun, yapraklar ve bitkisel atıklar gibi organik maddeler yüksek sıcaklıklarda yakıldığında, kül olarak adlandırılan bir kalıntı oluşur. Kül, biyokütle atıklarının bir çeşididir ve aşağıdaki gibi birçok alanda kullanılabilir.

Asfalt güçlendirme: Kül, asfalt güçlendirme işleminde kullanılmaktadır. Kül, asfaltın sıcaklığını düşürür ve asfaltın çatlamasını önler. Ayrıca, asfaltın su geçirmezliğini ve dayanıklılığını artırır. Bitümlü sıcak karışımların, trafik yüklerine ve sıcaklığa karşı dayanımını arttırmak için çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Kül gibi bazı katkı

maddelerinin kullanımı ile, karışımların normal sıcaklıklardaki rijitlikleri, stabiliteleri, yorulma ömürleri, nem hasarına ve kalıcı deformasyona karşı dayanımları arttığı tespit edilmiştir (Alataş ve İstek, 2019).

Beton güçlendirme: Kül, beton güçlendirme işleminde de kullanılmaktadır. Kül, betonun sertliğini ve dayanıklılığını artırır. Ayrıca, betonun su geçirmezliğini de artırır.

Tarım: Kül, tarım alanlarında toprak verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır. Kül, topraktaki fosfor ve potasyum gibi minerallerin açığa çıkmasını sağlar ve toprağın pH dengesini düzenler.

Gübre: Kül, gübre olarak da kullanılmaktadır. Kül, topraktaki minerallerin açığa çıkmasını sağlar ve toprağın pH dengesini düzenler.

İlaç: Kül, bazı bitki ilaçlarının üretiminde de kullanılmaktadır.

Kimyasal endüstri: Kül, kimyasal endüstri için yapıştırıcı olarak da kullanılmaktadır.

3.6. Atık Kızartmalık Yağ

Bitkisel yemeklik yağlar, insanların beslenmesinde önemli bir ögeyi oluşturmaktadır. Dünya genelinde insan nüfusu ve bu artan nüfusun temel besin ihtiyacı artmaktadır. İnsanların kullandıkları yağ miktarındaki artış, doğal olarak tehlikeli atık sınıfında yer alan atık bitkisel yemeklik yağlar sorununu ortaya çıkarmaktadır. Bu yağların, yönetmeliklerin öngördüğü yöntemlerle toplanması, taşınması ve bertaraf edilmesi sağlanamadığında, ciddi çevresel problemlere neden olabilmektedir (Gökalp vd. 2018).

Araştırmalar, arıtılmayan atık suların içinde bulunan ve kullanılmış bitkisel ve hayvansal atık yağların, su kirliliğinin %25'ini oluşturduğunu göstermiştir. Bu yağlar, denizlere, göllere ve akarsulara ulaştığında, suyun kirlenmesine ve oksijen düzeyinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, ortamdaki canlılar üzerinde tahribata yol açmakta ve özellikle balıkları etkilemektedir. Ayrıca, atık bitkisel yağların özgül ağırlıkları nedeniyle su yüzeyini kaplayarak oksijen transferini engellediği için, su altı canlı varlığını olumsuz yönde etkilemektedir. ÇŞB, (2023)

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1. Bitümün Modifikasyonu

Çalışmada; bitüm ve BSK'nın fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için modifiye malzemesi olarak atık kızartmalık yağ ve atık tarımsal kül karışımı kullanılmıştır. Bu nedenle öncelikle penetrasyon derecesi 70/100 olan saf bitüm ile karışım da kullanılan agreganın özellikleri tespit edilmiştir. Daha sonra modifiye bağlayıcılar elde etmek amacıyla bitüme atık kızartmalık yağ atık tarımsal kül karışımı eklenmiştir. Saf ve modifiye bitümün fiziksel ve mekanik özellikleri geleneksel (penetrasyon, yumuşama noktası, parlama ve RTFOT) ile tespit edilmiştir. Ayrıca modifiye bağlayıcıların kimyasal ve morfolojik özelliklerinin tespiti için FTIR analizleri yapılmıştır. Atık kızartmalık yağ ve atık tarımsal kül karışımının BSK'ların performans özellikleri üzerindeki etkilerini tespit etmek amacıyla saf ve modifiye bağlayıcılar ile Marshall dizayn yöntemi kullanılarak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyleri uygulanmıştır. Bitüm modifikasyonu için kullanılan katkıları, karışım sıcaklık ve süreleri Tablo 4.1. de verilmiş olup, tüm modifikasyonlar dakikada 3000 (RPM) devirde karıştırılmıştır.

Tablo 4.1. Modifiye Bitümün Parametre ve Seviyeleri

Parametre Seviye	Yağ %	Kül %	Sıcaklık °C	Süre Dk
1	0	0	170	10
2	0	3	180	20
3	0	6	190	30
4	2	0	180	30
5	2	3	190	10
6	2	6	170	20
7	4	0	190	20
8	4	3	170	30
9	4	6	180	10

4.2. Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) Üretiminde Kullanılan Katkı Maddeleri

4.2.1. Atık Kızartma Yağı

Bitümlü sıcak karışım (BSK) üretiminde birçok farklı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada ev ortamında tek seferlik kızartma işleminden alınan atık kızartma yağı katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Karışımın toplam ağırlığının %0, %2, %4 oranlarında atık kızartma yağı ilave edilerek bitüm modifiye edilmiştir. Atık kızartma yağı, bitüm karışım sıcaklığına getirildiğinde karıştırma işlemi başlamadan hemen önce bitüme eklenip High Shear Mikser ile karıştırılarak homojen dağılması sağlanmıştır.



Şekil 4.1. Atık kızartma yağı

4.2.2. Atık Tarımsal Kül Karışımı

Bu çalışmada Bitümlü sıcak karışım (BSK) üretiminde katkı maddesi olarak atık kızartma yağı ile birlikte atık tarımsal kül (çam dal, çam kapak, kavak kapak, mısır sapı) kullanılmıştır. Karışımın toplam ağırlığının %0, %3, %6 oranlarında atık tarımsal kül ilave edilerek bitüm modifiye edilmiştir. Atık tarımsal kül, bitüm karışım sıcaklığına getirildiğinde karıştırma işlemi başlamadan hemen önce belirlenen oranlara göre atık kızartma yağı ile birlikte bitüme eklenip High Shear Mikser ile karıştırılarak homojen dağılması sağlanmıştır.



Şekil 4.2. Atık tarımsal kül karışımı

Atık tarımsal küllerin XRF yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. XRF çok çeşitli malzemelerin ana bileşenlerini analiz etmek için eskiden beri kullanılagelen bir malzeme çözümleme tekniğidir.

Mısır Sapı Tanımlı Numune 20/252/1			
ANALİZLER	BİRİMİ	ANALİZ SONUÇLARI	YÖNTEM
SiO ₂	%	78,3	XRF
Na ₂ O	%	4,73	
CaO	%	3,83	
K ₂ O	%	3,30	
MgO	%	2,91	
SO ₃	%	2,41	
Al ₂ O ₃	%	1,43	
Cl	%	1,41	
P ₂ O ₅	%	0,722	
Fe ₂ O ₃	%	0,641	
MnO	%	0,122	
TiO ₂	ppm	748	
SrO	ppm	287	
BaO	ppm	164	
ZnO	ppm	134	
CeO ₂	ppm	111	
NiO	ppm	89	
WO ₃	ppm	79	
CuO	ppm	55	
CoO	ppm	50	
Br	ppm	44	
As ₂ O ₃	ppm	40	
Cr ₂ O ₃	ppm	38	
Rb ₂ O	ppm	28	
ZrO ₂	ppm	28	
PbO	ppm	24	
MoO ₃	ppm	12	

Şekil 4.3. Mısır sapı külünün XRF analiz sonuçları

Kavak Kapak (25/03/2020 – 5300 gr) Tanımlı Numune
20/110/1

ANALİZLER	BİRİMİ	ANALİZ SONUÇLARI	YÖNTEM
CaO	%	50,0	XRF
MgO	%	12,6	
K ₂ O	%	9,92	
SiO ₂	%	6,41	
P ₂ O ₅	%	5,41	
Al ₂ O ₃	%	2,00	
Fe ₂ O ₃	%	1,70	
SO ₃	%	1,05	
SrO	%	0,529	
Na ₂ O	%	0,234	
BaO	%	0,182	
TiO ₂	%	0,171	
ZnO	ppm	943	
MnO	ppm	910	
Ce ₂ O ₂	ppm	767	
Cr ₂ O ₃	ppm	400	
CuO	ppm	257	
NiO	ppm	186	
ZrO ₂	ppm	119	
Rb ₂ O	ppm	99	
Rh	ppm	38	
MoO ₃	ppm	18	
Sc	ppm	<1	
CoO	ppm	<1	
V ₂ O ₅	ppm	<1	

Şekil 4.4. Kavak kapak külünün XRF analiz sonuçları

Çam Kapak Tanımlı Numune
20/251/1

ANALİZLER	BİRİMİ	ANALİZ SONUÇLARI	YÖNTEM
CaO	%	72,7	XRF
SiO ₂	%	7,72	
K ₂ O	%	5,80	
MgO	%	4,92	
Al ₂ O ₃	%	3,00	
Fe ₂ O ₃	%	1,95	
P ₂ O ₅	%	1,66	
SO ₃	%	1,00	
Na ₂ O	%	0,335	
TiO ₂	%	0,237	
MnO	%	0,197	
BaO	%	0,164	
Cl	%	0,108	
SrO	ppm	806	
ZnO	ppm	643	
CuO	ppm	176	
Cr ₂ O ₃	ppm	155	
PbO	ppm	148	
NiO	ppm	107	
ZrO ₂	ppm	75	
Rb ₂ O	ppm	61	
Ag	ppm	44	
As ₂ O ₃	ppm	25	
CoO	ppm	19	

Şekil 4.5. Çam kapak külünün XRF analiz sonuçları

Çam Dal Tanımlı Numune
20/253/1

ANALİZLER	BİRİMİ	ANALİZ SONUÇLARI	YÖNTEM
CaO	%	72	XRF
K ₂ O	%	8,77	
MgO	%	7,68	
SiO ₂	%	4,34	
P ₂ O ₅	%	2,37	
Al ₂ O ₃	%	1,26	
SO ₃	%	1,14	
Fe ₂ O ₃	%	0,973	
Na ₂ O	%	0,416	
Cl	%	0,283	
MnO	%	0,211	
BaO	%	0,157	
TiO ₂	%	0,137	
SrO	ppm	768	
ZnO	ppm	632	
PbO	ppm	206	
CuO	ppm	157	
Cr ₂ O ₃	ppm	130	
NiO	ppm	85	
ZrO ₂	ppm	65	
Rh	ppm	56	
Ag	ppm	52	
Rb ₂ O	ppm	41	
CoO	ppm	14	
As ₂ O ₃	ppm	5	

Şekil 4.6. Çam dal külünün XRF analiz sonuçları

4.2.3. Bitümün seçimi ve özellikleri

Çalışmada kullanılan 70/100 penetrasyonlu saf bitüm Erzurum Büyükşehir Belediyesi kuruluşlarından biri olan Ertansa’ dan alınmıştır. Kullanılan bitümün fiziksel özellikleri geleneksel yöntemlerle tespit edilmiş olup sonuçlar Tablo 4.2.’de verilmiştir.

Tablo 4.2. B 70/100 Penetrasyonlu Saf Bitümün Deney Sonuçları

Deneyler	Birim	Deney Standardı	B70/100	
			Şartname Limitleri	Ölçülen Değer
Penetrasyon	0.1 mm	EN 1426	70-100	74
Yumuşama Noktası	°C	EN 1427	43-51	44
Parlama Noktası	°C	EN 22719	min 230	296
Özgül ağırlık	gr/cm ³	TS 1087	1.0-1.1	1.05

4.3. Modifiye Bitümün Karıştırılması

Katkı maddelerinden atık yağ evsel kızartmalık yağ olup ev ortamında biriktirilerek elde edilmiştir. Atık tarımsal kül ise biyokütle santrallerinden elde edilmiş ve dört çeşit külden oluşmuş bir karışımdır.



Şekil 4.7. Değişik parametre ve seviyelerde karıştırılarak hazırlanmış bitüm numuneleri

Yağ ve kül modifiyeli bitümler saf bitüm tenekesinden katı olarak çıkarılmış, katı haldeki ağırlıkları ölçülmüş ve bu ağırlıklara ve yukarıda tabloda verilen oranlara göre yağ, kül ve yağ+kül ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra bitüm kendinden ısıtıcılı High Shear Miksere (Bkz. Şekil 4.8.) konulup, karıştırma sıcaklığına getirilmiş ve katkı maddeleri eklenerek belirlenen sürelerde 3000 devir/dk hızında karıştırılmıştır. Karıştırılan numunelere daha sonra Penetrasyon deneyi, parlama noktası deneyi, yumuşama noktası deneyi ve RTFOT deneyleri yapılmış, RTFOT ile yaşlandırılmış numunelere daha sonra tekrar parlama, yumuşama ve penetrasyon deneyleri uygulanmıştır.



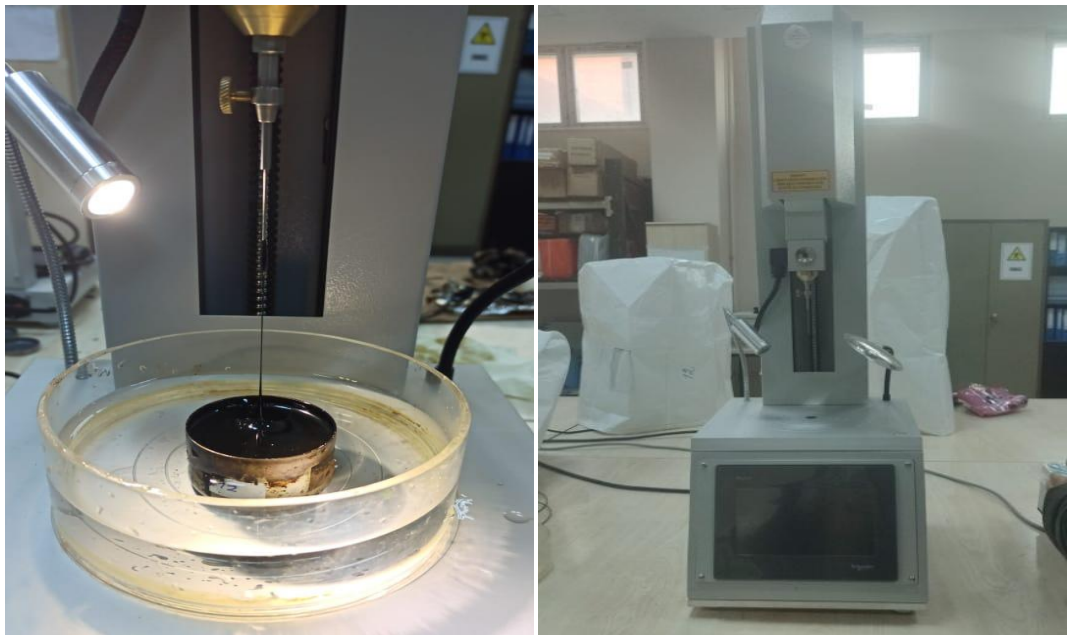
Şekil 4.8. Kendinden ısıtıcılı High Shear Mikser

4.4. Modifiye Bitüme Uygulanan Deneyler

4.4.1. Penetrasyon deneyi

Standart uçlu iğnenin, sabit 100 gr yük altında belirlenen sürede 25°C sıcaklık ile düşey doğrultuda numuneye batma miktarı ölçülerek bitümün kıvamlılığının bulunması için penetrasyon deneyi yapılır.

Deneye başlarken penetrasyon iğnesi çözücü yardımıyla temizlenir. İğne penetrasyon cihazının ucuna takılır ve vidası sıkılarak tam yerleşmesi sağlanır. Daha sonra su banyosunda 25°C sıcaklıkta 1 saat boyunca bekletilmiş numune taşıma kabıyla buradan alınır. Su banyosundan bir miktar su taşıma kabına da eklenerek numunenin sıcaklığının düşmesi engellenmeye çalışılır. Penetrometre cihazının içine numune kabı yerleştirilir. İğne yüksekliği, penetrasyon iğnesi ile numune yüzeyinin teması sıfır olarak ayarlanır ve cihaz sıfırlanır. İğne 5 saniye içerisinde serbest düşmesi için bırakılır. Kenarları ortalama 1 cm uzunluk olacak şekilde eşkenar üçgen oluşturacak şekilde iğne batırılır ve 3 adet değer not edilir ve bu değerlerin ortalaması dikkate alınır. 1 penetrasyon değeri 0,1 mm'ye eşittir. Bu deney TS EN 1426 ve ASTM D5 standartlarına göre yapılmaktadır. Penetrasyon değeri arttıkça daha yumuşak, daha akışkan bir bitüm elde edilir. Asfalt çimentoları penetrasyon değerlerine göre sınıflandırılmakta ve kullanılmaktadır.



(a) Yakın görünüm (b) Uzak görünüm Şekil 4.9. Penetrasyon deney cihazı

4.4.2. Yumuşama noktası deneyi

TS EN 1427 ve ASTM D36 standartlarına göre yapılan yumuşama noktası deneyi, bitüm numunelerinin aynı viskoziteye sahip oldukları sıcaklıkları belirlemek için kullanılır. İçerisinde bitüm bulunan pirinç halka, sehpaye bırakılarak su banyosuna konulur. Su banyosunun sıcaklığı yavaş yavaş artar. Bitümün üstünde bulunan bilyenin ve sıcaklığın etkisi ile yumuşar. Bilye tabana temas ettiği zaman cihazın üzerinde yazan sıcaklık değeri yumuşama noktası değerini verir. Önceden ısıtılarak akıcı bir duruma getirilmiş numuneler halkaların içine dökülür ve soğuması için oda sıcaklığında bekletilir. Sonra sıcaklık değeri dakikada 5 derece arttırılacak şekilde ayarlanan beherin içine konulan halkaların üstüne toplar yerleştirilir. Yumuşayan bitümler en alta temas ettiği noktada sıcaklık değerleri ölçülerek bitümlerin yumuşama noktaları bulunur. Bilye ve halka yöntemiyle yumuşama noktası yani sıcaklık değeri bulunarak servis ömründe akmadan dayanabileceği maksimum sıcaklık değeri bulunur. Sıcaklık değeri arttıkça daha yumuşak ve daha az viskoz hale geldiği anlamına gelir. Bunun için, sonuçların tekrarlanabilmesi için yumuşama noktasını tanımlanmış standart bir yöntemle belirlemek gerekir.

Yumuşama noktası, bitüm numunesinin 3,5 gram ağırlığında olan çelik bilyenin ağırlığını taşıyamayacak sıcaklık değeridir. Bu deneyde, iki tane pirinç halkanın içine dökülen bitüm numunelerinin üstüne 3,5 gram ağırlığında olan çelik bilye konularak bir su banyosunda ilk 3 dakika 5°C sabit, sonra dakikada 5°C arttırılacak şekilde kontrollü bir hızla ısıtılır. Yumuşama noktası, iki tane pirinç yüzük içindeki bitüm örnekleri üstündeki bilyenin 25 mm mesafede bitümle sarılı bir şekilde düşecek kadar yumuşadığı sıcaklık değerlerinin ortalaması olarak bulunur.



Şekil 4.10. Yumuşama noktası deney aleti

4.4.3. Parlama noktası deneyi

Parlama noktası deneyi, çalışma sırasında ısıtılırken olabilecek herhangi bir tutuşma ve alev alma riskini önlemek için önemlidir. Bitümün alev ile temas etmesi sonucunda parlacağı ama sürekli yanma işleminin olmadığı sıcaklık derecesini bulabilmek için yapılan, TS EN ISO 2592 ve TS 1171 standartlarına uygun olarak yapılan bir deneydir. Parlama noktası deneyi için kullanılacak bitümlü bağlayıcı belirli bir akıcılığa kadar (140-170°C) ısıtıldıktan sonra, kabın çentikli yerine kadar doldurularak deney numunesi hazırlanmış olur. Deneyin başlangıcında sıcaklık hızı, parlama noktasına yaklaşıncaya kadar dakikada 5 – 17 °C olmalıdır.



Şekil 4.11. Parlama noktası deney aleti

4.4.4. Dönel ince film ısıtma kaybı deneyi (RTFOT)

Modifiye edilmiş BSK' nın kısa bir sürede yaşlandırılması sonrasında fiziksel özelliklerinin ve kütle kaybının bulunması için RTFOT Deneyi (Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi) yapılır. Deneyde TS EN 12607-1 standardı kullanılır. Karıştırma süresi içinde bitümlü bağlayıcılarda ortaya çıkan yaşlanma, laboratuarda RTFOT ile simüle edilmektedir. Deneyde karıştırma esnasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi Temsil eden, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üstünde, sıcaklık ve havanın birleşik etkisi değerlendirilir. Bitüm daha akıcı bir duruma gelinceye kadar ısıtılarak 8 tane cam şişenin her birine 35 gr olacak

şekilde doldurulur. Tüm şişelerin ağırlığı deneye başlamadan önce tartılır ve daha sonrasında şişeler dönel tablaya yerleştirilir. Deney bitene kadar bitüm, her bir şişenin iç yüzeyinde 1,25 mm. kalınlığında film halinde sürekli olarak hareket etmektedir. Düşey ekseninde daire çizen raf, 15 devir/dakika hızla 85 dakika boyunca döndürülür. Dönme işlemi sırasında şişelere 4000±200 ml/dk değerinde basınçlı hava püskürtülür. Deney sıcaklığı 163±0.5°C'dir. Deney sonunda numune, etüvden çıkarılarak soğutulur ve numunenin son ağırlığı ölçülür. Bu yöntem, ısı, hava ve sürekli hareket etme sayesinde yüzeyde bir katman oluşumunu engellemekte ve böylece bitümün korunmasını sağlamaktadır.

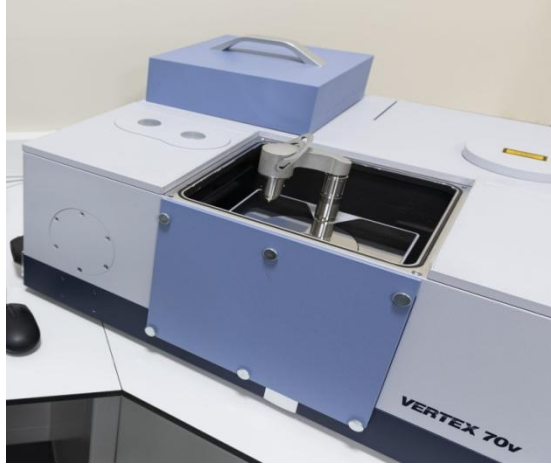
Bitüm sıcaklığın etkisi ile, şişeleri tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın ortaya çıkması kolaylaştırılmaktadır. Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını bulmak için, diğer altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini bulmak için kullanılmaktadır.



Şekil 4.12.RTFOT (Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deney) Cihazı

4.4.5. FTIR (fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi)

Bitümlü malzemelerin kimyasal bileşimlerinin nitelendirilmesinde de kullanılan analiz yöntemlerinden biri olan Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR); tarım, gıda, tıp, kimya gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu yöntemin temeli, molekül içi bağlar üzerine düşürülen kızılötesi ışınların, bağların titreşim ve dönme hareketleri ile soğurulmasına dayanır. IR Analizi ile; molekül yapısı, molekül içi bağlar, molekül içi fonksiyonel gruplar, numune içindeki bileşen miktarı gibi bazı bilgiler elde edilebilir. KİTAM, (2023)



Şekil 4.13. FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) Cihazı

Bu çalışmada saf ve katkılı modifiye bitümlerin kimyasal bağlanma yapılarının analizleri Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Bruker, Vertex 70 marka FTIR spektrofotometresi ile 6000 cm^{-1} – 50 cm^{-1} dalga boyu aralığında ve 0.4 cm^{-1} çözünürlükte yapıldı.

4.4.6. Marshall tasarım deneyi

Marshall deneyi, stabilite ve akma değerlerinin bulunması ve optimum bitüm oranının bulunması için kullanılmaktadır. Ayrıca bu deney agrega granülometresinin bulunabilmesi, agrega ve bitüm yüzdesi hesabı, briketlerle alakalı hesaplar ve boşluk incelemeleri için de kullanılmaktadır. Deformasyon ve yükleme değerlerini gösteren Marshall cihazı, numuneler başarısız olduğu an yüklemeyi durdurmaktadır. Son haldeki yükleme ve deformasyon değerleri not edilir. En son değerlere göre çizilen grafikler ile bitüm oranının optimum değeri belirlenir. Marshall deneyi, dünyada en çok kullanılan karışım tasarımı yöntemidir. Bu kadar çok kullanılmasına neden olan avantajları aşağıda gösterilmektedir:

- Deney aletinin numunenin sadece bir kısmına gerilme uygulamayıp tamamına uygulanması
- Deneyin hızlı ve kolay yapılması
- Deney aletinin küçük ve taşınabilir olması
- Laboratuvar ortamında üretilen numunelerin özelliklerinin gerçeğe çok yakın sonuçlar vermesi

Kullanılan Aletler

- Marshall test cihazı: Marshall briketlerinin stabilite ve akma değerlerini ölçer
- Etüv: Deneyde kullanılacak tüm malzemelerin, agreganın ve bitüm ısıtılması için kullanılan alet.
- Kaplar: Agreganın karışımlarının etüvde ısıtılması için kullanılan malzeme.
- Termometre: Karışım sırasında sıcaklığı ölçmek için kullanılan alet.
- Teraziler: Agreganın ve bitümü tartmak için kullanılan cihaz.
- Elektrikli karıştırıcı: Sıcaklığı koruyarak karışımın homojen olarak karıştırılması için kullanılan cihaz.
- Marshall kalıbı: Şekil verme kalıbı ve sıkıştırma işlemi sırasında sıçramayı engellemek için kullanılan koruma parçası.
- Marshall tokmağı: Malzeme üzerine serbest düşerek sıkıştırma işlemini yapmak için kullanılan cihaz.
- Kriko: Numuneleri kalıplardan çıkarmak için kullanılan düzenek.
- Su banyosu: Numuneleri 60 °C' lik su içerisinde sabit sıcaklıkta tutmak için kullanılan banyo.

4.5. Agreganın Fiziksel Özellikleri

Çalışmada Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü 164. Şube Şefliği deposundan temin edilen kalker esaslı kırmataş agregası kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre bu çalışmada kullanılan agreganın fiziksel özellikleri Tablo 4.3 de verilmiştir.

Tablo 4.3. Bu Çalışmada Kullanılan Agreganın Fiziksel Özellikleri

Deneyler	Kaba Agregası	İnce Agregası	Filler
Hacim özgül ağırlık	2,68	2,65	2,49
Zahiri özgül ağırlık	2,70	2,69	2,71
Absorpsiyon (%) (TS 3526)	0,34	0,59	3,51

4.6. Gradasyon

Taşocağından temin edilen taşların, konkasörde kırılması sonucu elde edilen 3/4''-1/2'', 1/2''-No 4, No 4-0, bu çalışmanın karışım agregasını oluşturmaktadır. Üç grup agreganın elek analizinde tüm eleklerden elendikten sonra Tablo 4.4.'deki gradasyon elde edildi.

Tablo 4.4. Bu Çalışmada Kullanılan Agrega Gradasyonu

Elek No	1.Grup	2.Grup	3.Grup	Karışım	Şartname	
İnc. mm	0,22	0,41	0,37	Gradasyonu	Sınırları	
1"	25	100	100	100	100,0	100 100
3/4"	19	100	100	100	100,0	100 100
1/2"	12,5	44,6	100	100	87,8	83 100
3/8"	9,5	2,6	91,3	100	75,0	70 90
No 4	4,75	1,3	29,5	100	49,4	40 55
No 10	2	1,2	4,8	72,3	29,0	25 38
No 40	0,42	1,1	2,4	27,5	11,4	10 20
No 80	0,18	1	2,2	17,9	7,7	6 15
No 200	0,075	0,8	1,8	11,9	5,3	4 10



Şekil 4.14. Çalışmada kullanılan agrega

4.7. Deneyin Yapılışı

Marshall deney numuneleri oda sıcaklığında minimum bir gece bekletilir. Numunelerin uzunlukları ölçüldükten sonra havada, suda ve doymuş-yüzey kuru ağırlıkları tartıldıktan sonra deney aşamasına geçilir. Numuneleri uygun sıcaklığa getirmek için 30-40 dakika su banyosunda ya da 2 saat etüvde bekletilir. Asfalt çimentolu briketlerin sıcaklıklarının sabit tutulabilmesi için banyo ve etüvün sıcaklığı 60 °C olarak ayarlanır. Numune, çelik halkanın iki segmanı içine yerleştirilir. Akma ölçer yerleştirilerek sıfırlanır. En yüksek yüke ulaşınca kadar, dakikada 50.8 mm' lik hız ile yükleme yapılır. En yüksek yük kaydedilir, akma ölçer boşaltılır ve akma değeri ölçülür.

Numune su banyosundan çıkartılır ve en yüksek yükün bulunmasına kadar geçen süre 30 saniyeden çok olmamalıdır. Numunenin yüksekliği 63.5 mm'den farklı ise Marshall Stabilite düzeltme katsayıları kullanılarak yüke düzeltme faktörü uygulanır.



Şekil 4.15. Numunelerin bekletildiği havuz

Deneyde üst segman sabitken alt segmanın yükleme hızı 50.8 mm/dk dır. Basınç değeri yükseldikçe stabilometrede görülen değer artarak maksimum değere ulaşır sonra düşmeye başlar ve numune kırılır. Stabilometrede görülen en yüksek değer yardımı ile bitümlü karışımın stabilitesi bulunur. "Marshall Stabilitesi" adı verilen bu değer toplam yük miktarıdır. Kırılma sırasında çökme veya hareket miktarı ölçülür ve bu "Akma" dır. Marshall deneyinde bununla birlikte karışımın birim ağırlığı, boşluk oranı, bitüm ve agrega karışımının agrega boşluğu oranı bulunur.(Umar ve Ağar, 1991). Marshall Stabilite test aleti ve Marshall Stabilite test tokmağı aşağıdaki fotoğraflarda gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Marshall stabilite deney aleti



Şekil 4.17. Marshall stabilite deney tokmağı

Marshall Karışım Tasarımı Yapılırken Sırasıyla Yapılan İşlemler:

- Agreg a seçilir
- Bitüm seçilir
- Numuneler hazırlanır
- Yoğunluk ve hava boşluğu değ erleri bulunur
- Marshall Stabilometresini kullanarak stabilite ve akma değ erleri bulunur
- Optimum bitüm miktarı bulunur

4.8. Agreg a Seçimi (Agreg a Granülometrisinin Belirlenmesi)

Karışımı oluştururken ilk olarak farklı boyutlardaki agregaların kullanılacak oranlarda ayarlanması ve şartname sınırlarının içerisinde kalan bir gradasyonun kullanılmasıdır. Şartnameye uyan bir gradasyon bulana kadar, farklı oran ve boyutlardaki agregalar ile çeşitli kontrol gradasyonları oluşturularak hesaplamalar yapılır. Karışım gradasyonunun ince ve kaba agreg a ile filler yüzdelерinin şartnameye uygun olması ve VMA değ erlerinin uygun değ erlerde çıkması için 0,45 üslü gradasyon grafiğine çok yakın olmamalıdır.

Karışım da kullanılacak farklı boyutlardaki agreganın elek analizi yapılır ve karışımın granülometrisi belirlenir sonra agreg a karışımının granülometri eğrisi çizilir. Tolerans sınırları, tolerans eğrileri ve şartname sınır eğrileri de çizilir.

Tablo 4.5. Her Briket İçin Dane Büyüklüklerine Göre Alınan Agrega Miktarları

Elek Açıklığı	Karışım Granülometrisi % Geçen	Her Elek Üzerinde % Kalan	Her Briket için Alınan Miktar (gr)
3/4"	100	0	$1150 \times 0.0 = 0$
1/2"	87.8	12.2	$1150 \times 0.122 = 140.3$
3/8"	75	12.8	$1150 \times 0.128 = 147.2$
No.4	49.4	25.6	$1150 \times 0.256 = 294.4$
No. 10	20.3	29.1	$1150 \times 0.291 = 334.6$
No.40	11.4	8.9	$1150 \times 0.089 = 102.3$
No. 80	7.7	3.7	$1150 \times 0.037 = 42.6$
No.200	5.3	2.4	$1150 \times 0.024 = 27.7$
Tava	0	5.3	$1150 \times 0.053 = 60.9$
Toplam:			1150

4.9. Marshall Stabilite Deney Numunelerinin Hazırlanması

Marshall deney briketleri için 1150 gram agregası kullanılmaktadır. Briketler setler halinde hazırlanır. Değişik bitüm oranlarına sahip her set için en az 3, tercihen 5 briket hazırlanır. Karışımdaki bitüm yüzdesi, agregası ağırlığına göre bitüm yüzdesi ve karışım içindeki bitümün ağırlıkça yüzdesi olmak üzere iki şekilde belirlenebilir.

Deney numuneleri için 63.5 ± 1.27 mm yüksekliğinde briket hazırlamak için 1150 gram agregası numunesi ve belli oranda bitüm hazırlanır.

Marshall numuneleri (briketleri) aşağıda verilen işlem sırasına göre şartlara uygun olarak hazırlanır:

1. Her bitüm yüzdesi için 3 numune hazırlanacak şekilde, her numune için önceden belirlenen oranda agregası granülometriye uygun bir şekilde tartılarak hazırlanır. 1150 gramlık agregası karışımları 165 °C lik etüvde 24 saat bekletilmek için ayrı ayrı kaplara konularak etüve bırakılır.



Şekil 4.18. Numunelerin dijital tartıyla tartılması

2. Kullanılacak bitüm etüvde 165 °C'ye kadar ısıtılır.
3. Deney için kullanılacak olan spatula, kürek, briket kapları, karıştırma kabı, vb. aletler 165 °C'lik etüvde ısıtılır.



Şekil 4.19. Deney malzemelerinin ısıtıldığı etüv

4. 160 °C ye kadar ısıtılan agreg a aynı sıcaklıkta ısıtılmış karıştırma kabına boşaltılır ve karıştırılır. Hazırlanan agreganın içine bir çukur açılarak agreg a ağırlığına göre ayarlanmış karışımın içerisine gereken miktarda asfalt çukura ilave edilir.
5. Asfalt çimentosunun agreg a içerisinde homojen olacak şekilde dağılması için elektrikli karıştırıcı ile karıştırılır.
6. Karışım, kalıba boşaltılır ve 45,7 cm yükseklikten düşüş yapan 4,536 kg'lık sıkıştırma tokmağı ile 75 vuruş uygulanarak sıkıştırılır ve numunenin diğer

yüzüne de 75 vuruş uygulamak için kalıp ters çevrilir.

7. Sıkıştırılmış numunelere numara verilir ve kalıptan çıkarırken herhangi bir bozulma oluşmayacak duruma gelene kadar soğuması için bırakılır.
8. Soğutma işleminden sonra krika ile kalıptan çıkartılarak düz bir yüzey üzerine konulur ve soğuması için bir gece bekletilir.



Şekil 4.20. Kalıplara yerleştirilip sıkıştırılmış numuneler

4.10. Briketlerin Yüksekliklerinin Belirlenmesi

Briket yüksekliği 63,5 mm'dir ve briketlerin dayanım değeri bu yükseklik ile değerlendirilir. Standart briket yüksekliğine denk gelen katsayı 1'dir. Yükseklik 63,5 mm den fazla ise katsayı azalır, 63.5 mm den düşük ise katsayı artar. Briketin stabilitesi ile numunenin yüksekliğine göre değişen katsayının çarpımı, 63,5 mm yüksekliğindeki standart brikete göre düzeltilmiş stabilite değerini verir.

Tüm briketlerin farklı yerlerinden 3 farklı değer okunur ve bu değerlerin ortalaması briketin yüksekliği olarak Marshall deney formuna not edilir.

4.11. Briketlerin Hacimlerinin Belirlenmesi

Bir briketin hacmi doygun yüzey - kuru ağırlığından sudaki ağırlığının çıkarılması ile bulunur. Briketler havada tartılır ve ağırlıkları not edilir. Numune yeterince su emmesi için su havuzuna konulur ve su içindeki ağırlığı kaydedilir. Sudan çıkartılan numune, sadece yüzeyindeki serbest su alınacak şekilde kurulanır ve doygun yüzey-kuru ağırlığı tartılarak not edilir. Numunenin hacmi aşağıdaki gibi hesaplanır:

Briketin hacmi = (Briketin doygun yüzey- kuru ağırlığı) – (Briketin sudaki ağırlığı)

4.12. Yoğunluk Ve Hava Boşluğu Değerlerinin Bulunması

Numuneler kalıplardan çıkartıldıktan sonra kumpas ile boyları ve çapları ölçülerek kuru ağırlıkları, doymuş yüzey kuru ağırlıkları, hacimleri tartı kullanılarak bulunur. Bulunan değerler Marshall tablosunda kullanılarak numunelerin yoğunluk ve boşluk oranları hesaplanır.



Şekil 4.21. Numunelerinin 3 boyutunun ölçülmesi

4.13. Sıkıştırılmış Numunelerin Özgül Ağırlığı ve Karışım Yoğunluğu

Sıkıştırılmış numunelerin ağırlıkları aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanır:

$$G_{mb} = \frac{A}{B-C} \quad (4.1)$$

Burada:

G_{mb} = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

A = Kuru numunenin havadaki ağırlığı (g)

B = Numunenin kuru yüzey doymuş ağırlığı (g)

C = Sudaki numunenin ağırlığı (g)

4.14. Karışımın Maksimum Özgül Ağırlığı

Maksimum özgül ağırlığı ASTM D2041/D2041M-11'a göre bulunmaktadır ve aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir:

$$G_{mm} = \frac{A}{A-(B-C)} \quad (4.2)$$

Burada:

G_{mm} = Maksimum özgül ağırlık

A = Gevşek karışımın havadaki ağırlığı (g)

B = Su doldurulmuş piknometre ve gevşek karışımın ağırlığı (g)

C = Su dolu piknometrenin ağırlığı (g)

Belirlenen bitümün yüzdesi için G_{mm} değerinin bilinmesi, değişik oranlarda bitüm içeren karışımların en yüksek özgül ağırlıklarının da bulunmasını sağlamaktadır. Agregaya yığınının efektif özgül ağırlığı sabittir ve bitüm emme potansiyeli içeriğindeki bitüm yüzdesinden bağımsızdır. Agregaların efektif özgül ağırlığı, G_{se} şu şekilde hesaplanabilir:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\left(\frac{P_{mm}}{G_{mm}}\right) - \left(\frac{P_b}{G_b}\right)} \quad (4.3)$$

Burada:

P_{mm} = Toplam gevşek karışımın yüzdesi = 100

P_b = Karışımdaki asfalt yüzdesi

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

Herhangi bir bitüm yüzdesi ile hazırlanan karışımın maksimum özgül ağırlığı ise şöyle hesaplanır:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\left(\frac{P_s}{G_{se}}\right) + \left(\frac{P_b}{G_b}\right)} \quad (4.4)$$

Burada:

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

P_{mm} = Toplam gevşek karışımın yüzdesi = 100

P_b = Karışımdaki asfalt yüzdesi

P_s = Karışımdaki agregaya yüzdesi

G_{se} = Agregaların efektif özgül ağırlığı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

4.15. Hava Boşluklarının Bulunması

Hava boşlukları, sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışım içerisinde asfaltla kaplanmış agregaya parçaları arasında oluşan hava kabarcıklarıdır. Asfalt kaplamanın durabilite özelliği,

içindeki hava boşluğu ile doğrudan ilişkilidir.

Yoğunluk ile hava boşluğu doğrudan ilişkilidir. Bitümlü sıcak karışımlarda yoğunluk arttıkça, hava boşluğu azalır.

Karışımındaki toplam hava boşluğu oranı (VTM) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$VTM = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (4.5)$$

Burada:

VTM = Karışımındaki toplam hava boşluğu oranı

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

G_{mb} = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

4.16. Mineral Agregalar Arasındaki Boşluk Yüzdesi (VMA)

Mineral agregalar arasındaki boşluk, sıkıştırılmış karışımın agregalarının tanecikleri arasındaki boşluk alanı hacmidir. VMA bitümlü sıcak karışımın durabilitesini etkileyen çok önemli bir parametredir. VMA, bitüm ve hava boşluğu ile dolu olan alanların tümünü kapsamaktadır ve karışımın toplam hacminin bir yüzdesi olarak ifade edilmektedir. VMA aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$VMA = 100 \left[1 - \frac{G_{mb} (1 - P_b)}{G_{sb}} \right] \quad (4.6)$$

Burada:

VMA = Mineral agregalar arasındaki boşluk yüzdesi

G_{sb} = Agregalar karışımının özgül ağırlığı

G_{mb} = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

P_b = Karışımındaki asfalt yüzdesi

4.17. Bitüm İle Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA)

VFA, sıkıştırılmış karışımındaki agregalar parçacıkları arasındaki bitümle dolu boşluğunu ifade etmektedir. Karışımın içindeki VFA ihtiyacının amacı, mineral agregalar arasındaki en yüksek boşluğu ve buna bağlı olarak asfalt içeriğini sınırlamaktır. VFA yüzdesi şöyle hesaplanır:

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} \times 100 \quad (4.7)$$

Burada:

VFA = Karışımdaki bitüm ile dolu boşluk (%)

VMA= Mineral agregalar arasındaki boşluk (%)

VTM = Toplam karışımın boşluk oranı

4.18. Marshall Stabilometresini Kullanarak Stabilite Ve Akma Değerlerinin Bulunması

Stabilite ve akma değerleri, Marshall stabilometresi ile bulunmaktadır. Akma değeri, numunenin düşey deformasyon değeri ile eşittir. Cihazın kaydettiği değerler not edilir. Stabilite okuması 63,5mm'lik numuneler için doğru sonuç vermektedir. Bu yüzden, farklı boyutlardaki numuneler için düzeltme faktörleri kullanılmaktadır. Düzeltilmiş akma ve stabilite değerleri şartnameye uygunluğu kontrol edilir.

4.19. Optimum Bitüm Miktarı Tayini

Optimum bitüm miktarı tayini için ilk olarak tüm hacimsel parametrelerin, stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir ve bu parametreler şartnameye uygun olacak şekilde %4 hava boşluğu sağlayan bitüm miktarı optimum bitüm miktarı olarak kaydedilir. Bundan dolayı asfalt yüzdesi ve boşluk oranı grafiğinde %4 boşluk sağlayan bitüm yüzdesinin sebep olduğu VMA, VFA, stabilite ve akma değerlerinin şartnameye uygunluğuna bakılır. Tüm parametreler sınırlar içerisinde ise, optimum bitüm miktarı bulunmuş olur. Tablo 4.6.'de Aşınma Tip-1 gradasyonu için Karayolları Teknik Şartnamesinde yer alan Marshall tasarım yöntemi kriterleri verilmiştir.

Tablo 4.6.Marshall Tasarım Yöntemi Kriterleri

Tasarım Kriteri	Deney Standartı	Aşınma Tip-1
Sıkıştırma, her bir yüzey için darbe sayısı	TS EN 12697-30	75
Stabilite (kg)	TS EN 12697-34	900
Boşluk (%)	TS EN 12697-8	3-5
VFA (%)	TS EN 12697-8	65-75
VMA (%)	TS EN 12697-8	14-16
Akma (mm)	TS EN 12697-34	2-4

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, bitümlü sıcak karışım üretiminde kullanılan atık kızartma yağı ve atık tarımsal kül farklı sıcaklıklarda, farklı sürelerde ve farklı kullanım oranlarında ve sabit karıştırma hızında modifiye edilen bitümün kimyasal ve fiziksel özellikleri, yapılan penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve RTFOT deneyleri ile araştırılmıştır.

5.1. Penetrasyon Deneyleri Sonuçları

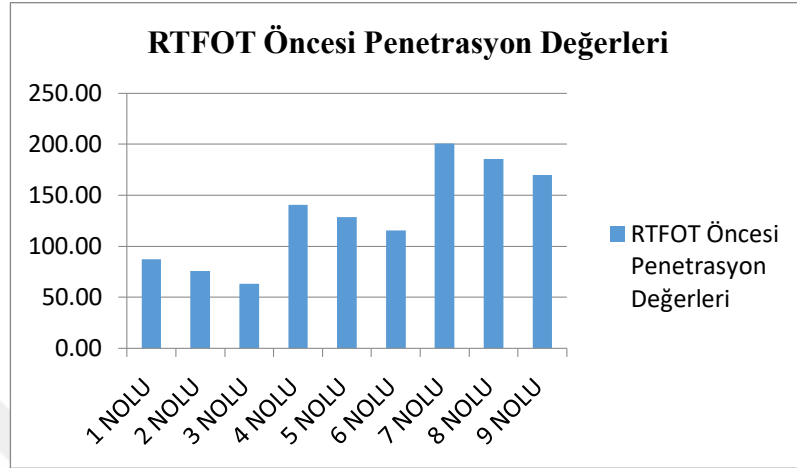
Farklı oranlarda Atık Kızartma Yağı ve Atık Tarımsal Kül katkı maddeleri eklenen modifiye bitümün penetrasyon değerlerinin artan yağ oranıyla arttığı ve artan kül oranıyla ters orantılı olarak azaldığı Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Penetrasyon Değerleri Tablosu

DENEY GRUP NO	RTFOT ÖNCESİ (0.1 mm)	RTFOT SONRASI (0.1 mm)
1	87.30	56.75
2	75.60	49.14
3	63.40	41.21
4	140.50	91.33
5	128.40	83.46
6	115.60	75.14
7	200.50	130.33
8	185.40	120.51
9	169.60	110.24

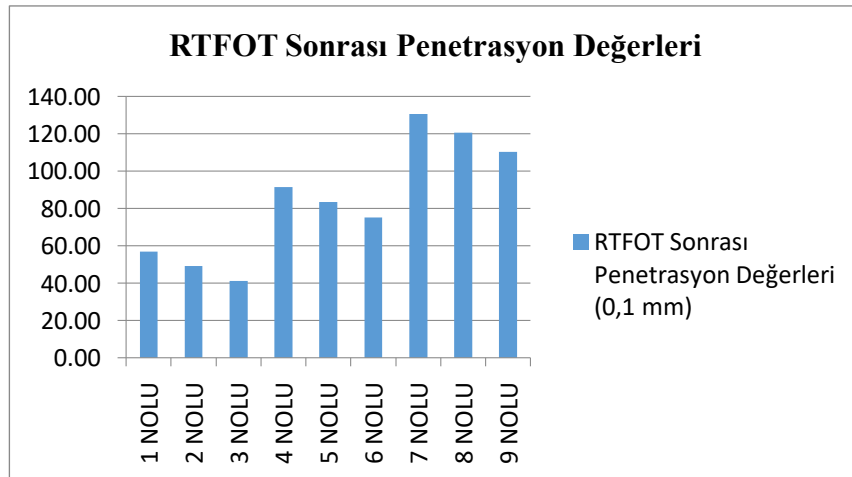
Tablo 5.1.'den de görüleceği üzere saf bitümün penetrasyon değerlerine göre yağ ve kül ile modifiye edilmiş bitümün penetrasyon değerleri yağ ilavesi ilavesi arttıkça artmış, kül ilavesi arttıkça azalmıştır. Benzer şekilde E. Eriskin, S. Karahancer, S. Terzi ve M. Saltan (2017) çalışmalarında yağ ilavesinin bitümün penetrasyon değerini %240 a kadar artırdığı sonucuna varmışlardır. RTFOT Deneyi Öncesi yapılan deneylerde; Penetrasyon değerinin artan yağ oranıyla yüksek oranlarda arttığı, artan kül oranıyla nispeten daha az oranlarda azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Yağ katkısının olmadığı 1-2 ve 3 nolu deney gruplarında kül oranı %0 ve %3 oranlarındayken bitümün penetrasyon sınıfı değişmezken % 6 lik kül katkısıyla penetrasyon sınıfı 50/70 olmaktadır. Yağın %2

oranında eklenmesi durumlarında ise penetrasyon kül katkısıyla azalmakla birlikte penetrasyon sınıfı 100/150 olmaktadır. Yağın %4 oranında eklenmesi durumlarında ise penetrasyon kül katkısıyla azalmakla birlikte penetrasyon sınıfı 160/220 olmaktadır.



Şekil 5.1. RTFOT öncesi penetrasyon deneyi sonuçları

Karıştırma hızını 3000 devir/dak olarak sabit tutulduğu deneylerde sıcaklığın 170°C den 190°C ye doğru gidildikçe ve karıştırma süresinin de 10 dakikadan 30 dakikaya gidildikçe azaldığı gözlemlenmiştir. Penetrasyon değerinde her deney grubu için penetrasyon değerinin en fazla 170 °C sıcaklıkta 10 dakika süreyle karıştırılan bağlayıcıda olduğu gözlemlenmiştir. RTFOT Deneyi Sonrası yapılan deneylerde; Penetrasyon değerinin artan yağ oranıyla yüksek oranlarda arttığı, artan kül oranıyla nispeten daha az oranlarda azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Penetrasyon değerlerin yaşlandırma öncesi duruma göre yaklaşık olarak %35 oranında düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 5.2. RTFOT sonrası penetrasyon deneyi sonuçları

Yağ katkısının olmadığı 1-2 ve 3 nolu deney kül katkısıyla penetrasyon sınıfı 40/60 olmaktadır. Yağın %2 oranında eklenmesi durumlarında ise penetrasyon kül katkısıyla azalmakla birlikte penetrasyon sınıfı 70/100 olarak kalmaktadır. Yağın %4 oranında eklenmesi durumlarında ise penetrasyon kül katkısıyla azalmakla birlikte penetrasyon sınıfı 100/150 olmaktadır. Karıştırma hızını 3000 devir/dak olarak sabit tutulduğu deneylerde sıcaklığın 170°C den 190°C ye doğru gidildikçe ve karıştırma süresinin de 10 dakikadan 30 dakikaya gidildikçe azaldığı gözlemlenmiştir. Penetrasyon değerinde her deney grubu için penetrasyon değerinin en fazla 170 °C sıcaklıkta 10 dakika süreyle karıştırılan bağlayıcıda olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak penetrasyon değerinin yağ oranıyla yüksek oranlarda arttığı, eklenen kül oranıyla nispeten daha az oranlarda azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Tablodaki değerler; ortam ısısı, deneyi yapan kişinin okuması, deney aletinin özellikleri gibi sebeplerin yanı sıra numune hazırlanırken karıştırma sıcaklığı ve süresinden de etkilenmektedir.

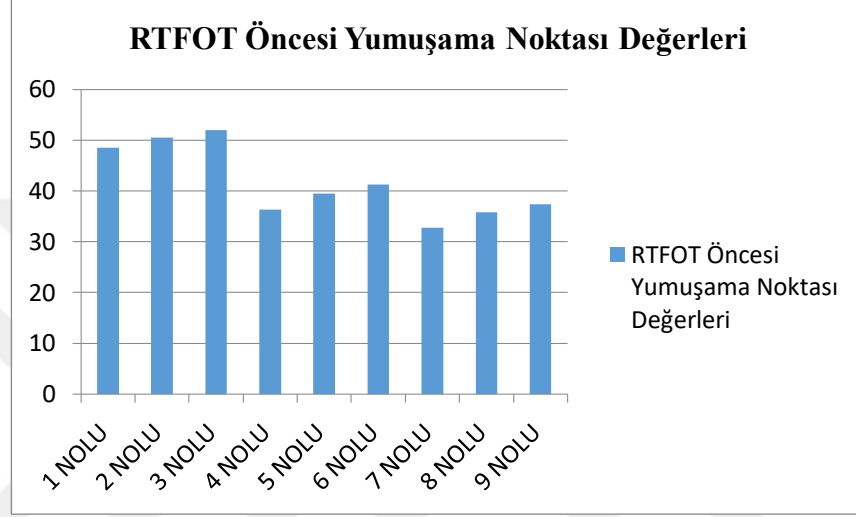
5.2. Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Bitümlü bağlayıcının işlenmesinden sonrasındaki servis ömrü süresince akmadan hemen önceki sıcaklık değerinin belirlenmesi amacıyla yapılan Yumuşama noktası deneyi bitümün hangi sıcaklıkta akmaya başladığını ölçen bir deneydir. Farklı oranlarda Atık Kızartma Yağı ve Atık Tarımsal Kül katkı maddeleri eklenen modifiye bitümün Yumuşama Noktası sıcaklık değerlerinin artan yağ oranıyla azaldığı ve artan kül oranıyla doğru orantılı olarak arttığı Tablo 5. 2.' de gösterilmiştir.

Tablo 5. 2.Yumuşama Noktası Değerleri Tablosu

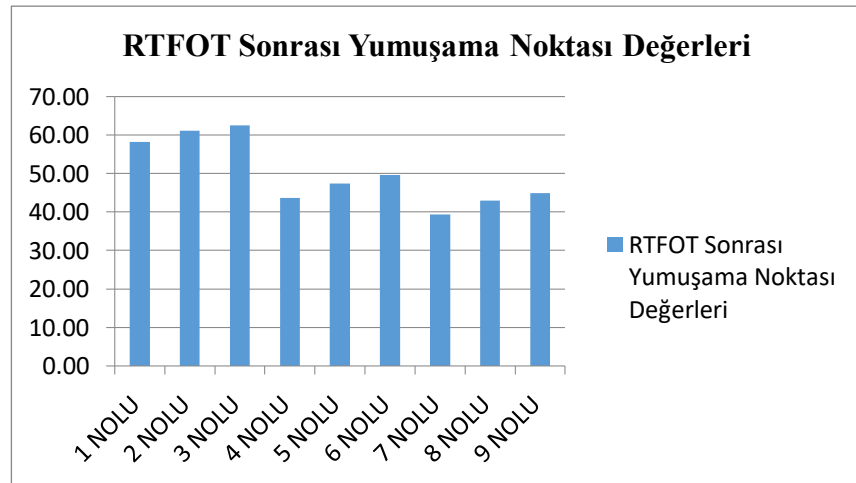
DENEY GRUP NO	RTFOT ÖNCESİ (°C)	RTFOT SONRASI (°C)
1	48.5	58.20
2	50.5	61.00
3	52	62.40
4	36.3	43.56
5	39.5	47.40
6	41.3	49.56
7	32.8	39.36
8	35.8	42.96
9	37.4	44.88

Tablo 5.2.'den de görüleceği üzere saf bitümün yumuşama noktası değerlerine göre yağ ve kül ile modifiye edilmiş bitümün yumuşama noktası değerleri yağ ilavesi ilavesi arttıkça azalmış, kül ilavesi arttıkça artmıştır. Benzer şekilde İslam, Özinal, ve Uz (2018) çalışmalarında yağ ilavesinin bitümün yumuşama noktası değerini düşürdüğü sonucuna varmışlardır.



Şekil 5.3. RTFOT öncesi yumuşama noktası deneyi sonuçlarını gösteren grafik

Bitümün kısa süreli yaşlandırılması (RTFOT) sonrası yumuşama noktası değerlerinin RTFOT öncesi duruma göre ortalama %20 oranında arttığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5.4. RTFOT sonrası yumuşama noktası deneyi sonuçlarını gösteren grafik

5.3. Parlama Noktası Sonuçları

Bitümlü bağlayıcılar, bazı yüksek sıcaklıklarda içeriklerinde bulunan uçucuları serbest bırakırlar. Bu uçucular, alev alarak çok tehlikeli bir duruma sebep olurlar. Bu yüzden bitümlerin derecesine göre parlamaya başladıkları sıcaklıkların belirlenmesi önem taşımaktadır (Yüknü, 2021). Parlama Noktası Deneyi, bitümün işlendiği, serildiği ya da imalatının herhangi bir aşamasında meydana gelebilecek olası tutuşma, parlama riskiyle ilgili bilgi vermesi açısından önem arz eden bir deneydir. Bitümün işlenmesi sırasında güvenli sıcaklık şartları Karayolları Genel Müdürlüğü'nün Bitümlü karışımlar Laboratuvar çalışmaları Tablo 412-2 Modifiye Bitümün Fiziksel Özelliklerine göre en az 220 °C olarak belirlenmiştir. Elde edilen bütün sonuçlar, güvenlik sınırları içerisinde kalmıştır.

Tablo 5.3. Parlama Noktası Sonuçları

DENEY	1	2	3	4	5	6	7	8	9
GRUP NO	NOLU	NOLU	NOLU	NOLU	NOLU	NOLU	NOLU	NOLU	NOLU
PARLAMA (°C)	274	286	294	254	262	268	252	255	256

5.4. Penetrasyon İndeksi (PI) Sonuçları

Bitümün Sıcaklığa Duyarlılığının Değerlendirilmesi için Penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçların aşağıda gösterilen formüllerin kullanılarak Penetrasyon İndeksinin (PI) bulunması gerekmektedir.

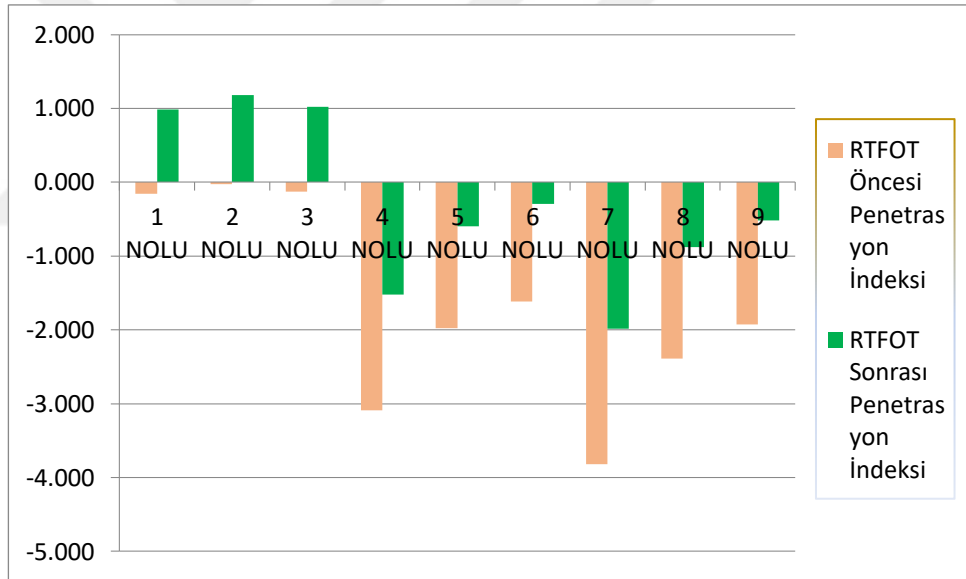
$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (5.1)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (5.2)$$

Formülasyondaki P_{25} , bitümün 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktası değerini belirtmektedir. PI değerinin -2'den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir (Geçkil, 2019).

Tablo 5.4. Penetrasyon İndeksi Sonuçları

DENEY GRUP NO	RTFOT ÖNCESİ PI İNDEKSİ	RTFOT SONRASI PI İNDEKSİ
1 NOLU	-0.154	0.986
2 NOLU	-0.030	1.182
3 NOLU	-0.128	1.021
4 NOLU	-3.092	-1.523
5 NOLU	-1.978	-0.599
6 NOLU	-1.613	-0.295
7 NOLU	-3.818	-1.987
8 NOLU	-2.385	-0.878
9 NOLU	-1.928	-0.521

**Şekil 5.5.** Penetrasyon İndeksinin parametrelere göre değişimi

Şekil 5.5’da görüldüğü üzere B 70/100 saf bitüme atık kızartma yağı ve atık tarımsal kül karışımı ilavesi ile PI değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir.

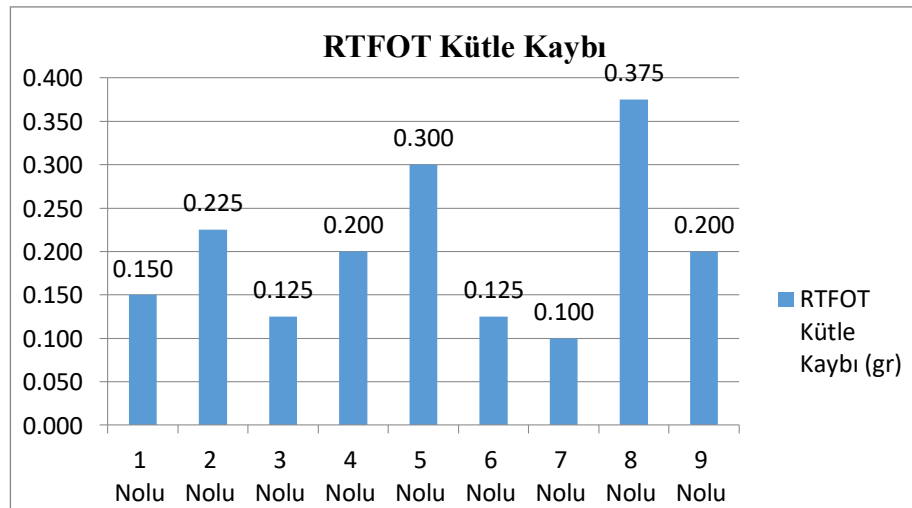
Saf bitüme %2 oranında atık kızartmalık yağ eklenmesi durumunda (4 nolu deney grubu) PI değeri -3.092; %4 oranında atık kızartmalık yağ eklenmesi durumunda (7 nolu deney grubu) ise PI değeri -3.818 olduğu görülmüştür. Yağ katkısının bitümü ısıya karşı çok duyarlı yaptığı sonucuna ulaşılmıştır.

Saf bitüme %3 oranında atık tarımsal kül karışımı eklenmesi durumunda (2 nolu deney grubu) PI değeri -0.030; %6 oranında atık tarımsal kül karışımı eklenmesi durumunda (3 nolu deney grubu) ise PI değeri -0.128 olduğu görülmüştür. Kül katkısının bitümün ısıya karşı duyarlılığına çok büyük bir etki yapmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Sıcaklık hassasiyeti bakımından en uygun deney grubunun yağ katkısının olmadığı, %3 kül katkısının olduğu bitümlü bağlayıcının 180°C de 20 dakika karıştırılarak hazırlanan 2 nolu deney grubu olduğu gözlemlenmiştir.

5.5. RTFOT (Dönel İnce Film Isıtma Kaybı) Deneyi Sonuçları

9 deney grubu olarak hazırlanan modifiye bitümlerimiz dönel ince film etüvü deneyi ile kısa süreli olarak yaşlandırılmıştır. Bitüm akıcı bir duruma gelinceye kadar ısıtılarak 8 tane cam şişenin her birine 35 gr olacak şekilde dolduruldu. Tüm şişelerin ağırlığı deneye başlamadan önce tartıldı, daraları not edildi ve şişeler etiketlendi ve daha sonrasında şişeler dönel tabladaki etiketlendikleri yerlere yerleştirildiler. Dakikada 15 devir hızla 85 dakika boyunca döndürüldüler. Dönme işlemi sırasında şişelere komprasör marifetiyle 4000±200 ml/dk değerinde basınçlı hava püskürtüldü. Cihaz sıcaklığı 163°C olarak ayarlandı. Süre bitiminde cihazdan çıkarılan numunelerin 4 tanesi tartılarak ağırlıkları ölçüldü ve daha önce daralarını ve bitüm bağlayıcılı ağırlıklarının yazıldığı listeye not edildi ve kütle kayıpları hesaplandı. Geriye kalan 4 şişe ise penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinde kullanılmak üzere saklandı. Alınan ve hesaplanan değerler ile yapılan hesaplamalar ve sonuçların ortalaması Tablo 5.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6. RTFOT Kütle Kayıpları Grafiği

Tablo 5.5. RTFOT Deneyi sonrası deney gruplarının kütle kayıpları

Deney Grup No	Şartname Sınırları	M1	M2	Kütle Kaybı	Ortalama Kütle Kaybı
1 Nolu Deney Grubu	max. 0.8	152.20	152.10	0.10	0.150
		146.90	146.70	0.20	
		148.10	147.90	0.20	
		157.10	157.00	0.10	
2 Nolu Deney Grubu	max. 0.8	151.60	151.50	0.10	0.225
		155.60	155.40	0.20	
		147.90	147.80	0.10	
		157.10	156.60	0.50	
3 Nolu Deney Grubu	max. 0.8	152.20	152.10	0.10	0.125
		147.00	146.80	0.20	
		147.90	147.80	0.10	
		157.00	156.90	0.10	
4 Nolu Deney Grubu	max. 0.8	162.00	161.80	0.20	0.200
		155.40	155.20	0.20	
		148.10	147.90	0.20	
		147.20	147.00	0.20	
5 Nolu Deney Grubu	max. 0.8	152.30	152.00	0.30	0.300
		147.00	146.80	0.20	
		148.50	148.10	0.40	
		157.30	157.00	0.30	
6 Nolu Deney Grubu	max. 0.8	152.20	152.10	0.10	0.125
		146.70	146.60	0.10	
		148.50	148.40	0.10	
		157.10	156.90	0.20	
7 Nolu Deney Grubu	max. 0.8	152.90	152.90	0.00	0.100
		146.90	146.70	0.20	
		148.20	148.10	0.10	
		157.00	156.90	0.10	
8 Nolu Deney Grubu	max. 0.8	151.80	151.60	0.20	0.375
		155.50	155.20	0.30	
		148.00	147.80	0.20	
		157.10	156.30	0.80	
9 Nolu Deney Grubu	max. 0.8	152.00	151.70	0.30	0.200
		155.40	155.30	0.10	
		148.00	147.80	0.20	
		157.10	156.90	0.20	

Tablo 5.5.'de görüldüğü gibi B 70/100 saf bitüme etiketlen yağ, kül, sıcaklık ve süre parametreleriyle birlikte kütle kaybında bazı değişimler meydana gelmiştir. En fazla kütle kaybının yağ oranının sabit olduğu deney grupları içinde %3 kül katkısının olduğu 2, 5 ve 8 nolu deney gruplarında olduğu gözlemlenmiştir.

En az kütle kaybının ise yağ ve kül katkısının olmadığı 1 nolu deney grubunda olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan değişkenler sadece yağ ve kül katkısı olmadığından, sıcaklık ve sürenin de değişkenlik göstermesinden kaynaklı olarak doğrusal bir sonuç elde edilmediği düşünülmektedir. Bununla birlikte bulunan bütün kütle kayıplarının Karayolları Teknik şartnamesi üst sınırı olan % 0,8 i aşmadığı görülmektedir.

5.6. Marshall Stabilite Deneyi Sonuçları

Tablo 4.3 de verilen gradasyona göre ve Tablo 4.4. deki ağırlıklara göre hazırlanan kuru agregalar, tartımları yapıldıktan sonra şekil 5.7. de görüldüğü gibi, ısıtılması ve karıştırma cihazına dökülmesi kolay olacak şekilde alüminyum kaplara konuldu. %4, %4.5, %5.0, %5.5, %6.0 oranları için üçer adet bitüm numunesi tartılarak hazırlandı. Tartımı yapılan bitüm numuneleri, agregalar, karıştırma kabı, karıştırma bıçağı, kullanılan kürek ve marshall briket kalıpları 165 °C de ısıtıldı.



Şekil 5.7. 1150'şer gram olarak tartımı yapılmış kuru agregalar

Etüvden çıkarılan agregalar karıştırma kabına konularak tartıya konuldu, üzerine bitüm yüzdesine göre bitüm tartılarak eklendi, daha sonra Şekil 5.12. de gösterilen karıştırma cihazında 1,5 dakika karıştırıldı. Karıştırma işleminin sonlarına doğru daha önceden briket kalıbı ölçülerinde daire şeklinde kesilerek hazırlanmış olan yağlı kağıtlar, etüvde ısıtılmış olan briket kalıbının alt kısmına serildi. Karıştırma işlemi biter bitmez hızlıca kalıplara alınan karışımlar iyice yerleştirildikten sonra üzerlerine tekrar yağlı kağıt serilerek Marshall Tokmağı cihazına götürüldüler. Marshall tokmağına yerleştirildikten

sonra 457 mm. yüksekten serbest olarak düşen tokmak ile 75 defa vuruş yapıldıktan sonra tokmağın içinden çıkarılarak hızlıca arka yüzleri çevrilen briketlere 75 vuruş daha yapıldı.



Şekil 5.8. Karıştırma Cihazı

Yaklaşık bir gün kalıpta bekleyen briketler kriko ile kalıplarından çıkarıldıktan sonra üzerindeki çapaklar temizlenerek yüzey pürüzleri azaltıldı. Briket yükseklikleri üç ayrı yerden ölçülerek not edildi ve havadaki kuru ağırlıklarının bulunması için tartıldılar.



Şekil 5.9. Kuru ağırlıkları alınmış, isimlendirilmiş briketler

Daha sonra numuneler sırayla Şekil 5.10. daki Arşimet terazisinde hassas bir şekilde tartılarak sudaki ağırlıkları ölçüldü ve not edildi. Daha sonra briketlerin suya doymun ağırlıklarının belirlenmesi için yaklaşık 4 dakika su seviyesi üzerlerini geçecek şekilde

su banyosunda bekletildi ve çıkarıldıktan sonra yüzeyi kurutulup tekrar tartıldılar.



Şekil 5.10. Sudaki ağırlıkların tartıldığı Arşimet terazisi

Tartım ve ölçümleri yapılan briketler Marshall Stabilite ve akma deneyleri yapılmak üzere; 60 °C sıcaklığındaki su banyosunda yaklaşık 35 dakika bekletildiler. Sudan çıkarılan numunelerin üzerindeki su hafifçe kurulandıktan sonra Şekil 5.11. de gösterilen cihaza yerleştirildi ve deneyleri yapılarak sonuçlar not edildi.



Şekil 5.11. Marshall stabilite ve akma deney cihazı

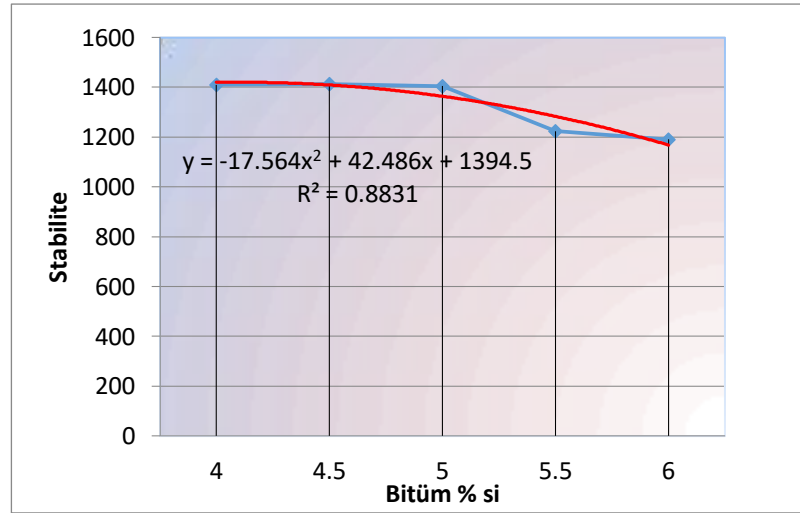
Optimum bitüm oranının bulunması için karışımda kullanılacak olan agrega miktarı sabit tutularak, agrega ağırlığının %4 - %4,5 - %5 - %5,5 - %6 oranlarında bitüm eklenerek her bir yüzde için 3'er adet numune, toplamda ise 15 adet numune hazırlanmıştır. Tüm numunelerin ölçüm ve tartımları yapılarak Tablo 5.6. da görülen formüller yardımıyla gerekli hesaplamalar yapılmış ve Tablo 5.7. de bulunan

B 70/100 saf bitümün optimum bitüm yüzdesinin Marshall Dizayn yöntemiyle belirlenmesi için yapılan deney sonuçları kısmına işlenmiştir.

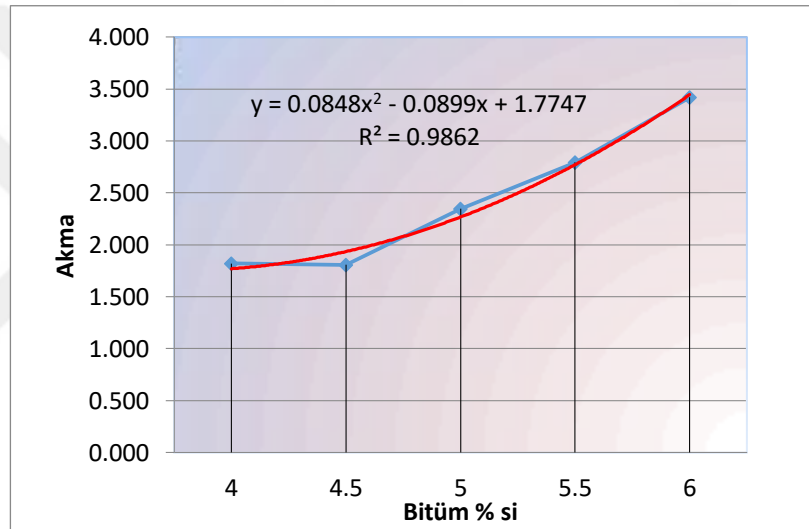
Tablo 5. 6. Optimum Bitüm % sinin bulunması için kullanılan hesaplamalar

Kısaltma	Açıklama	Formül
<u>Wa</u>	Agregaya göre seçilen bitüm %'si	$Wa = (WB/WA) \times 100$
<u>Wb</u>	Karışıma göre seçilen bitüm %'si	$Wb = [(WB/WA + WB)] \times 100$
<u>WA</u>	Toplam agregaya ağırlığı (1150gr)	
<u>WB</u>	Bitüm ağırlığı (agregaya göre)	
<u>Whava</u>	Havadaki kuru ağırlık	Tartımlar sonucu elde edilen değerler
<u>Wsu</u>	Sudaki ağırlık	Tartımlar sonucu elde edilen değerler
<u>Wdoygun</u>	Doygun-yüzey kuru ağırlık	Tartımlar sonucu elde edilen değerler
<u>V</u>	Numunenin hacmi	$V = W_{doygun} - W_{su}$
<u>Dp</u>	Numunenin pratik hacim özgül ağırlığı	$Dp = Whava / V$
<u>Dport</u>	Numunelerin ort. pratik hacim özgül ağırlığı	$Dport = (Dp1 + Dp2 + Dp3) / 3$
<u>Dt</u>	Numunenin Teorik Max. özgül ağırlığı	$Dt = 100 / [(100 - Wb/Gse) + (Wb/Gb)]$
<u>Vh</u>	Numunedeki boşluk yüzdesi	$Vh = [(Dt - Dport) / Dt] \times 100$
<u>Vb</u>	Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si	$Vb = (Pbe \times Dport) / Gb$
<u>Va</u>	Numunedeki agregaya hacmi %'si	$Va = 100 - (Vh + Vb)$
<u>Vma</u>	Agregalar arasındaki boşluk %'si	$Vma = 100 - Va = (Vh + Vb)$
<u>Vfa</u>	Vma'nın bitümle dolu boşluk %'si	$Vfa = (Vb / Vma) \times 100$
<u>Pbe</u>	Agregaya ağırlığına göre efektif bitüm %'si	
<u>Gsb</u>	Agregaya hacim özgül ağırlığı	$Gsb = 100 / [(\%K / Gk - h) + (\%I / Gi - h) + (\%F / Gf - z)]$
<u>Gsa</u>	Agregaya zahiri özgül ağırlığı	$Gsa = 100 / [(\%K / Gk - z) + (\%I / Gi - z) + (\%F / Gf - z)]$
<u>Gse</u>	Agregaya efektif özgül ağırlığı	$Gse = (Gsb + Gsa) / 2$
<u>%K</u>	Karışımındaki kaba agregaya %'si	
<u>%I</u>	Karışımındaki ince agregaya %'si	
<u>%F</u>	Karışımındaki filler %'si	

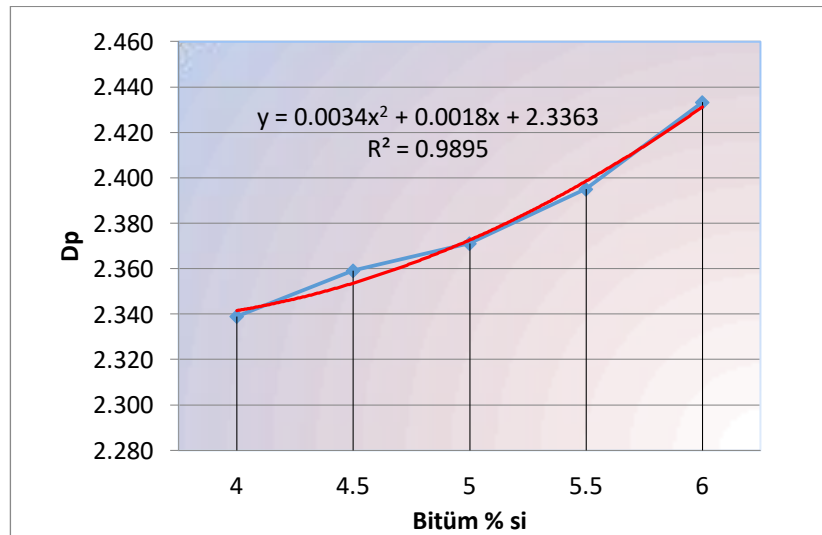
Daha sonra numuneler Marshall stabilite aletinde stabilite ve akma deneyine tabii tutularak stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Bulunan bu değerler yardımıyla Şekil 5.16,17,18,19,20,21 de gösterilen stabilite, Dp, Vh, Vf, Vma, stabilite ve akma - % bitüm grafikleri elde edilmiştir. Çizilen grafiklerden ve hesaplanan değerlerden boşluk oranının %4'e, asfaltla dolu boşluk oranının %70'e, stabilite ve hacim özgül ağırlığın ise en yüksek değere karşılık geldiği yüzdelere alınmıştır. Bulunan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak karışımın optimum bitüm yüzdesi %5.20 olarak belirlenmiştir. Optimum bitüm yüzdesine göre yapılan deney sonuçları ve hesaplanmış değerler ise Tablo 5.8. de gösterilmiştir.



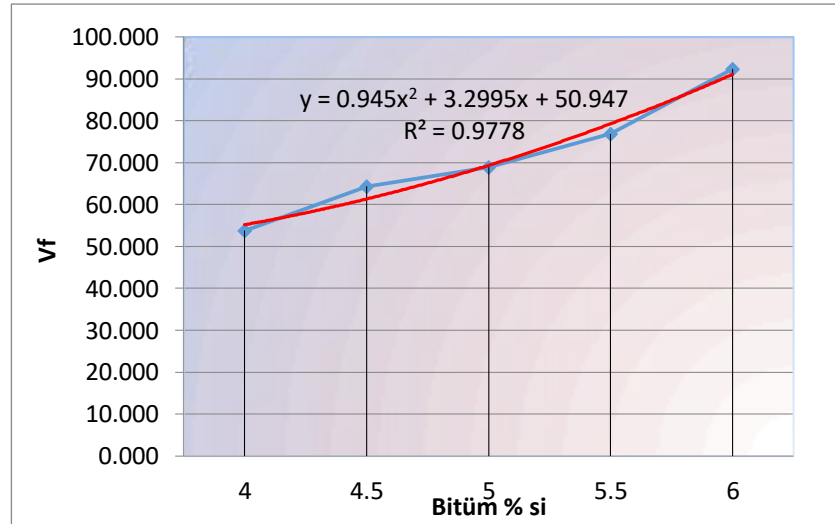
Şekil 5.12. Stabilité- Bitüm %'si



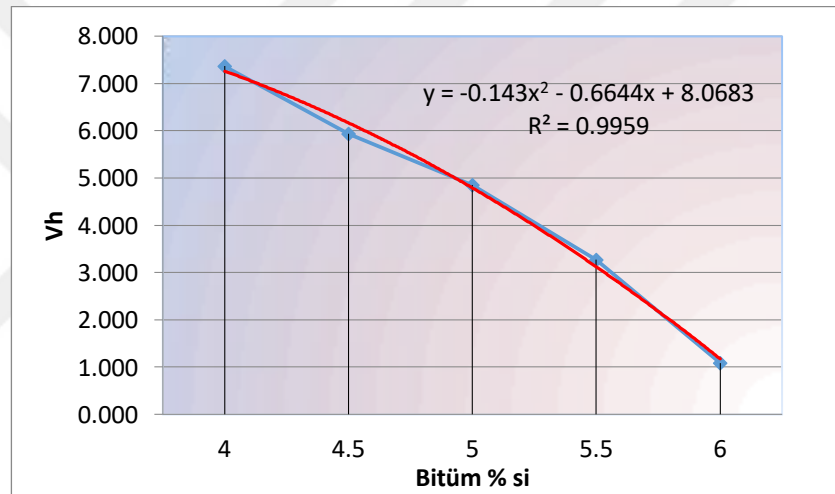
Şekil 5.13. Akma- Bitüm %'si



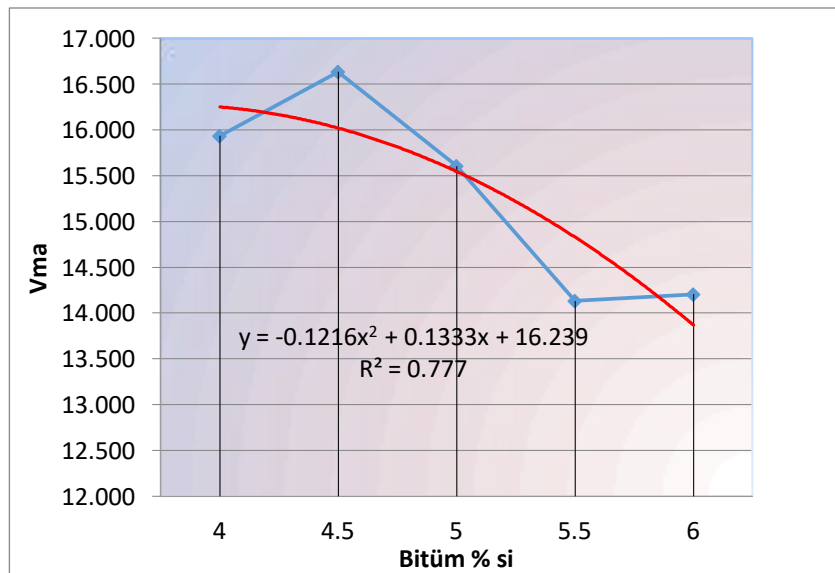
Şekil 5.14.Dp- Bitüm %'si



Şekil 5.15. V_f - Bitüm %'si



Şekil 5.16. V_h - Bitüm %'si



Şekil 5.17. V_{ma} - Bitüm %'si

Tablo 5. 7. B 70/100 saf bitümün optimum bitüm yüzdesinin Marshall Dizayn yöntemiyle belirlenmesi için yapılan deney sonuçları tablosu

No	Wa (%)	Wb (%)	WB (gr)	Numune Yükseklikleri (mm)			Numune Ağırlıkları (gr)			Numune nin Hacmi (cm ³)	Pratik hacim özgül ağırlığı	Teorik Max. özgül ağırlığı	Numune deki boşluk yüzdesi	Etketif bitüm hacmi %'si	Agrega hacmi %'si	Agregalar arasındaki boşluk %'si	Vma'nın bitümle dolu boşluk %'si	Akma Stabilitte (mm)	Stabilitte Faktörü (KN)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilitte (N)	MQ	
				h ₁	h ₂	h ₃	Ortalama	whava	wsu														w doygün
1				70	69	69	69.07	1193.9	689.7	1199.8	510.1	2.341						1.330	14.75	0.959	1415	1063.64	
2	4%	3.846	46.00	68	68	68	67.53	1195.6	693.1	1199.9	506.8	2.359						2.240	14.39	0.979	1436	641.02	
3				68	68	68	68.23	1204.8	688.4	1208.3	519.9	2.317						1.890	14.02	0.949	1357	717.98	
				Ortalamalar				1198.1	690.4	1202.7	512.3	2.339	2.525	7.366	8.567	84.066	15.934	53.769	1.820	14.39	0.961	1410	774.89
1				67	68	68	67.70	1195.4	696.3	1199.2	502.9	2.377						1.780	14.44	0.983	1447	813.07	
2	4.5%	4.306	51.75	68	68	68	68.23	1205.7	693.4	1210.9	517.5	2.330						1.690	14.76	0.941	1416	837.66	
3				68	67	67	67.30	1191.2	694.8	1197.3	502.5	2.371						1.950	14.11	0.962	1384	709.83	
				Ortalamalar				1197.4	694.8	1202.5	507.6	2.359	2.508	5.935	10.699	83.365	16.635	64.319	1.807	14.44	0.960	1414	782.46
1				68.0	68	68	68.17	1208.0	701.8	1210.7	508.9	2.374						2.210	14.35	0.933	1365	617.74	
2	5.0%	4.762	57.50	68	67	67	67.17	1221.8	703.7	1223.5	519.8	2.351						2.540	15.09	0.955	1469	578.37	
3				68	68	68	67.83	1211.0	706.9	1213.8	506.9	2.389						2.290	14.01	0.966	1380	602.81	
				Ortalamalar				1213.6	704.1	1216.0	511.9	2.371	2.492	4.852	10.754	84.395	15.605	68.910	2.347	14.48	0.951	1405	598.67
1				67.1	67	67.8	67.40	1211.4	709.8	1213.1	503.3	2.407						2.880	12.32	0.967	1214	421.62	
2	5.5%	5.213	63.25	68	69	69	68.60	1209.6	706.4	1210.8	504.4	2.398						2.560	12.54	0.937	1198	467.86	
3				69	69	69	68.87	1214.8	704.9	1215.3	510.4	2.380						2.940	12.85	0.964	1263	429.65	
				Ortalamalar				1211.9	707.0	1213.1	506.0	2.395	2.476	3.270	10.862	85.868	14.132	76.861	2.793	12.57	0.955	1224	438.26
1				67	66	66	66.50	1196.2	707.8	1201.3	493.5	2.424						3.330	12.65	0.980	1264	379.50	
2	6.0%	5.660	69.00	67	68	68	67.47	1194.7	710.1	1197.8	487.7	2.450						3.510	11.25	0.956	1097	312.55	
3				67	67	67	67.10	1198.3	709.5	1203.4	493.9	2.426						3.420	12.28	0.969	1214	354.85	
				Ortalamalar				1196.4	709.1	1200.8	491.7	2.433	2.460	1.087	13.116	85.796	14.204	92.346	3.420	12.06	0.968	1191	348.12
														3-5	Şartname Sınırları			>14	65-75	24	>900		

Tablo 5. 8. B 70/100 saf bitümün optimum bitüm yüzdesinin deney sonuçları tablosu

Numune No	Bitüm Oranı (%)	Numune Yükseklikleri (mm)				Numune Ağırlıkları (gr)				Numunenin Hacmi (cm ³)	Pratik hacim özgül ağırlığı (gr/cm ³)	Teorik Max. özgül ağırlığı (gr/cm ³)	Boşluk yüzdesi (%)	Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si	Numunedeki agrega hacmi %'si	Agregalar arasındaki boşluk %'si	Vma'nın bitümle dolu boşluk %'si	Alma (mm)	Stabilite (kN)	Düzeltilme Faktörü katsayısı	Düzeltilmiş Stabilite (N)	MQ
		h ₁	h ₂	h ₃	Ortalama	whava	wsu	w dogun	V		Dp	Dt	Vh	Vb	Va	Vma	Vfa					
1A	5.20	65.3	65.7	64.6	65.20	1150.1	671.4	1151.8	480.4	2.394								2.39	14.18	0.95700	1357	568.62
1B	5.20	67.8	67.6	67.4	67.60	1193.6	693.2	1195.2	502.0	2.378								2.53	12.35	0.90400	1116	441.07
1C	5.20	66.8	66.9	67.0	66.90	1203.5	700.2	1204.9	504.7	2.385								2.66	14.13	0.92000	1300	488.36
					Ortalama					2.385	2.486	2.486	4.045	11.223	84.73	15.268	73.506	2.53	13.55	0.92700	1256	497.28
2A	5.20	67.5	67.6	67.6	67.57	1178.2	685.4	1180.3	494.9	2.381								3.83	14.82	0.90587	1343	350.56
2B	5.20	64.7	64.6	64.5	64.60	1183.2	689.2	1184.9	495.7	2.387								3.42	14.66	0.97200	1425	417.14
2C	5.20	67.9	68.1	68.0	68.00	1191.5	693.7	1193.4	499.7	2.384								5.32	12.90	0.89400	1154	216.90
					Ortalama					2.384	2.486	2.486	4.102	11.216	84.68	15.319	73.219	4.19	14.13	0.96029	1357	323.94
3A	5.20	66.1	67.5	67.8	67.13	1199.2	697.5	1201.5	504.0	2.379								2.84	13.94	0.91410	1274	448.92
3B	5.20	68.0	67.7	68.1	67.93	1200.4	698.1	1202.8	504.7	2.378								3.35	14.92	0.89610	1337	399.47
3C	5.20	67.5	67.7	67.9	67.70	1201.9	701.3	1203.7	502.4	2.392								4.01	15.19	0.90100	1369	341.66
					Ortalama					2.393	2.486	2.486	4.128	11.213	84.66	15.341	73.092	3.40	14.69	0.95126	1397	411.17
4A	5.20	67.3	67.0	67.3	67.20	1193	694.7	1195.4	500.7	2.383								2.39	12.64	0.91300	1154	483.57
4B	5.20	67.8	68.3	67.7	67.93	1188.2	691.7	1190.2	498.5	2.384								2.53	12.35	0.89610	1107	437.22
4C	5.20	67.7	67.3	67.4	67.47	1194.4	697.0	1196.7	499.7	2.390								2.66	12.85	0.90660	1165	437.52
					Ortalama					2.395	2.486	2.486	4.043	11.223	84.73	15.266	73.515	2.53	11.96	0.95509	1142	451.92
5A	5.20	66.3	65.9	66.1	66.10	1198.2	697.5	1200.6	503.1	2.382								3.83	12.94	0.93800	1214	316.91
5B	5.20	67.3	67.8	67.5	67.53	1194.3	694.6	1195.9	501.3	2.382								2.75	11.80	0.90540	1068	388.30
5C	5.20	66.1	66.4	66.5	66.33	1179.6	685.9	1181.3	495.4	2.381								1.95	12.97	0.93340	1211	621.81
					Ortalama					2.382	2.486	2.486	4.195	11.205	84.60	15.400	72.761	2.84	12.03	0.96812	1164	409.53
6S	5.20	67.4	67.5	67.1	67.33	1205.6	702.5	1207.3	504.8	2.388								3.42	13.11	0.91010	1193	349.21
6B	5.20	66.6	66.5	66.6	66.57	1190.2	693.7	1192.1	498.4	2.388								2.96	12.47	0.90587	1130	381.22
6C	5.20	67.3	67.4	67.6	67.43	1199.3	698.5	1201.4	502.9	2.385								1.46	13.40	0.90740	1216	831.03
					Ortalama					2.387	2.486	2.486	3.981	11.230	84.79	15.212	73.828	2.61	12.99	0.90779	1180	451.19
7A	5.20	66.6	67.0	67.1	66.90	1197.5	697.5	1199.4	501.9	2.386								2.10	11.86	0.92000	1092	520.38
7B	5.20	66.5	66.3	66.7	66.50	1199.3	699.1	1201.4	502.3	2.388								2.36	11.10	0.93000	1032	438.26
7C	5.20	66.7	66.8	66.4	66.63	1188.5	694.2	1190.4	496.2	2.395								2.02	11.15	0.92640	1033	512.34
					Ortalama					2.390	2.486	2.486	3.878	11.242	84.88	15.121	74.351	2.16	11.37	0.92547	1052	488.04
8A	5.20	66.6	66.5	66.4	66.50	1187.9	692.6	1189.8	497.2	2.389								2.75	11.80	0.93000	1097	398.85
8B	5.20	66.4	66.0	66.3	66.23	1197.6	697.6	1199.4	501.8	2.387								1.95	12.97	0.93540	1213	623.14
8C	5.20	66.5	66.9	66.7	66.70	1195.8	696.4	1197.3	500.9	2.387								3.42	12.01	0.92500	1111	325.08
					Ortalama					2.388	2.486	2.486	3.954	11.234	84.81	15.188	73.964	2.70	12.26	0.93013	1140	421.54
9A	5.20	63.1	63.5	63.4	63.33	1189.4	692.8	1190.7	497.9	2.389								2.96	11.37	1.00510	1143	385.62
9B	5.20	65.9	66.2	66.1	66.07	1192.4	694.6	1194.3	499.7	2.386								1.46	12.15	0.93860	1141	779.56
9C	5.20	66.2	66.5	66.9	66.53	1184.8	692.0	1186.9	494.9	2.394								2.10	12.44	0.92910	1156	551.13
										2.390	2.486	2.486	3.874	11.243	84.88	15.117	74.374	2.17	11.97	0.95760	1147	527.16
													3-5			>14	65-75	2-4				>900

5.7. Marshall Tasarım Deneyine Göre Stabilite Değerleri

Tablo 5. 9. Yapılan Deneyler Sonucu Elde Edilen Stabilite Değerleri

DENEY GRUP NO	STABİLİTE (kN)
1	12.56
2	13.57
3	13.97
4	11.42
5	11.64
6	11.80
7	10.52
8	11.40
9	11.47

Tablo 5.9. incelendiğinde, en yüksek stabilite değerinin yağ katkısının olmadığı, kül katkısının en yüksek oranda %6 oranında olduğu, karıştırma sıcaklığının 190 °C ve karıştırma süresinin 30 dakika olduğu 3 nolu deney grubunda elde edildiği görülmüştür.

En düşük stabilite değerinin kül katkısının olmadığı, yağ katkısının en yüksek oranda %4 oranında olduğu, karıştırma sıcaklığının 190 °C ve karıştırma süresinin 20 dakika olduğu 7 nolu deney grubunda elde edildiği görülmüştür.

5.8. Marshall Tasarım Deneyine Göre Akma Değerleri

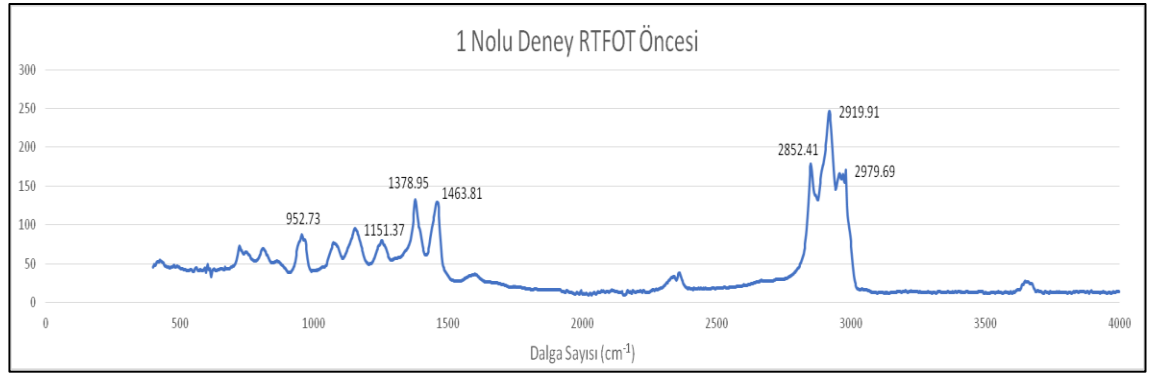
Tablo 5.10. incelendiğinde, akma eğrileri genel olarak şartname sınırları içinde kalmış olmakla birlikte yağ katkısının %0, kül katkısının %3, sıcaklığın 180 °C ve karıştırma süresinin 20 dakika olduğu 2 nolu deney grubunda akma üst sınırını aştığı görülmektedir. Genel olarak birbirine yakın değerlerin görüldüğü akma değerlerinin aynı yağ oranlarına sahip grupların içindeki en yüksek akma değerlerinin %3 lük kül katkısının olduğu deney gruplarında olduğu görülmüştür. Yağ ve kül katkısıyla akma değerleri düzeyinde ani artış ya da düşüş olmaması esnek üst kaplamanın kırılma anındaki davranışının büyük bir değişime uğramadığını göstermektedir.

Tablo 5. 10. Yapılan Deneyler Sonucu Elde Edilen Akma Değerleri

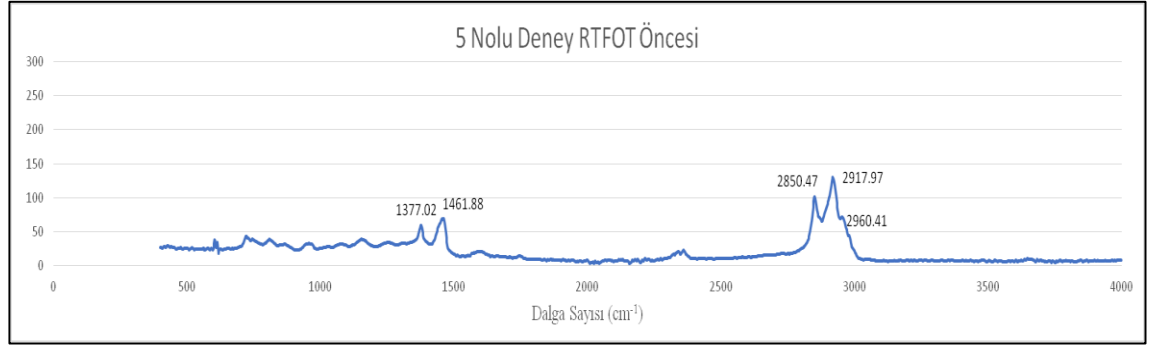
DENEY GRUP NO	AKMA mm
1	2.53
2	4.19
3	3.40
4	2.53
5	2.84
6	2.61
7	2.16
8	2.70
9	2.17

5.9. FTIR (Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi)

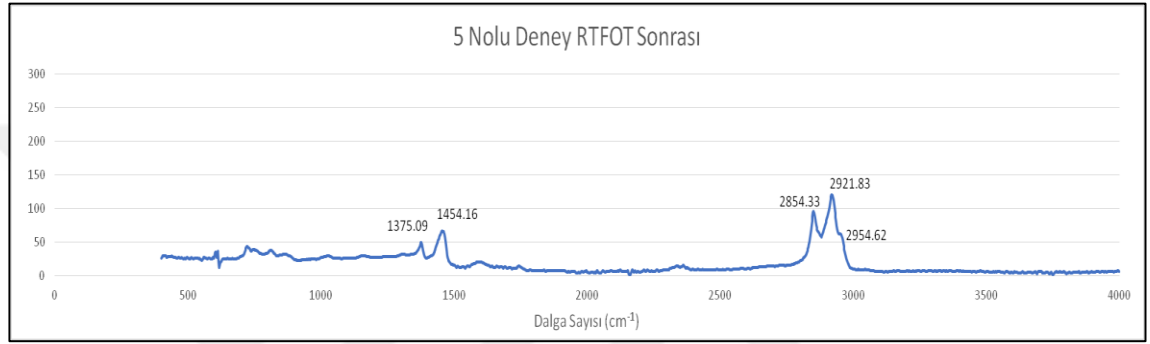
FTIR analizlerinde numunelerin kimyasal yapıları; 1 nolu deney grubunda bulunan 170°C de 10 dakika High Share Mixerde 3000 RPM hızla karıştırılmış saf bitümün RTFOT öncesi durumu için ve 5 nolu deney grubunda bulunan %2 yağ, %3 kül katkılı bitümün 190°C de 10 dakika High Share Mixerde 3000 RPM hızla karıştırılmış bitümün RTFOT öncesi ve sonrası durumları için belirlenmiştir.



Şekil 5.18. 1 Nolu Deney RTFOT Öncesi - FTIR



Şekil 5.19. 5 Nolu Deney RTFOT Öncesi - FTIR



Şekil 5.20. 5 Nolu Deney RTFOT Sonrası - FTIR

Tablo 5. 11. FTIR Spektrumuna Göre Numunelerin Frekans Aralıkları

Bileşik tipi	Bağ	Dalga sayısı	1 Nolu RTFOT Öncesi	5 Nolu RTFOT Öncesi	5 Nolu RTFOT Sonrası
ALKANLAR	Metilen Grup	Sikloheksan Halka	1055-1000, 1005-925 cm-1	952.73	
ALKİNLER		C – C Gerilme	1350-1000 cm-1	1151.37	
ALKANLAR	Metil Grup	C – H Eğilme	Simetrik 1380-1370 cm-1	1378.95	1375.09 1377.02
	Metil Grup	C – H Eğilme	Asimetrik 1470-1430 cm-1	1463.81	1454.16 1461.88
	Metilen Grup	C – H Gerilme	Simetrik 2865-2845 cm-1	2852.41	2854.33 2850.47
	Metilen Grup	C – H Gerilme	Asimetrik 2935-2915 cm-1	2919.91	2921.83 2917.97
		C – H Gerilme	2850-2970		2954.62 2960.41

Şekil 5.18-19 ve 20 deki FTIR spektrumları incelendiğinde; pik noktalarının aynı dalga sayısı aralıklarında olduğu ve birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür. Katkısız bitüme %2 yağ ve %3 kül katkısı eklendiğinde ve bitüm yaşlandırıldığında dahi bitüm numunelerinin temel yapısında büyük değişimler gözlenmemiştir. Katkı maddelerinin ya da 190°C lik karışım sıcaklığının bitüm numunesinin kimyasal yapısını değiştirmedeği görülmüştür. Atık yemeklik yağın ve atık tarımsal kül katkısının bitümün yapısını bozmadan modifiyer olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.



6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, biyokütle ürünlerinden atık kızartma yağı ve atık tarımsal külün (çam dal, çam kapak, kavak kapak, mısır sapı) bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 70/100 penetrasyonlu saf bitüme, ağırlıkça %0, %2, %4 oranlarında atık kızartma yağı; ağırlıkça %0, %3, %6 oranlarında atık tarımsal kül eklenmiştir. Modifiye bitümlerden 170°C, 180°C, 190°C sıcaklıklarda ve 10, 20, 30 dakikalık sürelerde, sabit 3000 RPM karıştırma hızında olmak üzere toplamda 9 grup numune oluşturulmuş ve yapılan deneylerden ulaşılan sonuç ve değerlendirmeler aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- RTFOT Deneyi Öncesi yapılan deneylerde; Penetrasyon değerinin artan yağ oranıyla yüksek oranlarda arttığı, artan kül oranıyla nispeten daha az oranlarda azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Yağ katkısının olmadığı 1-2 ve 3 nolu deney gruplarında kül oranı %0 ve %3 oranlarındayken bitümün penetrasyon sınıfı değişmezken % 6 lik kül katkısıyla penetrasyon sınıfı 50/70 olmaktadır. Yağın %2 oranında eklenmesi durumlarında ise penetrasyon kül katkısıyla azalmakla birlikte penetrasyon sınıfı 100/150 olmaktadır. Yağın %4 oranında eklenmesi durumlarında ise penetrasyon kül katkısıyla azalmakla birlikte penetrasyon sınıfı 160/220 olmaktadır. Karıştırma hızını 3000 RPM olarak sabit tutulduğu deneylerde sıcaklığın 170°C den 190°C ye doğru gidildikçe ve karıştırma süresinin de 10 dakikadan 30 dakikaya gidildikçe azaldığı gözlemlenmiştir. Penetrasyon değerinde her deney grubu için penetrasyon değerinin en fazla 170 °C sıcaklıkta 10 dakika süreyle karıştırılan bağlayıcıda olduğu gözlemlenmiştir.
- RTFOT Deneyi Sonrası yapılan deneylerde; Penetrasyon değerinin artan yağ oranıyla yüksek oranlarda arttığı, artan kül oranıyla nispeten daha az oranlarda azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Yağ katkısının olmadığı 1-2 ve 3 nolu deney kül katkısıyla penetrasyon sınıfı 40/60 olmaktadır. Yağın %2 oranında eklenmesi durumlarında ise penetrasyon kül katkısıyla azalmakla birlikte penetrasyon sınıfı 70/100 olarak kalmaktadır. Yağın %4 oranında eklenmesi durumlarında ise penetrasyon kül katkısıyla azalmakla birlikte penetrasyon sınıfı 100/150 olmaktadır. Karıştırma hızını 3000 RPM olarak sabit tutulduğu deneylerde

sıcaklığın 170°C den 190°C ye doğru gidildikçe ve karıştırma süresinin de 10 dakikadan 30 dakikaya gidildikçe azaldığı gözlemlenmiştir. Penetrasyon değerinde her deney grubu için penetrasyon değerinin en fazla 170 °C sıcaklıkta 10 dakika süreyle karıştırılan bağlayıcıda olduğu gözlemlenmiştir.

- Saf bitüme eklenen atık kızartmalık yağ katkısının bitümün penetrasyon değerini artırdığı görülmüştür. Yüksek penetrasyon değeri kaplamanın yeterince sıkıştırılamamasından kaynaklı olarak kalıcı tekerlek izi deformasyonu, ondülasyon ya da ayrışma deformasyonu olmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte yağ katkısının penetrasyon değerini artırması, işlenebilirliği artırdığı için asfaltın üretimi sırasında karıştırma ve sıkıştırmada kolaylık sağlayacağından enerji tasarrufuna katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda artan atık yağ katkısının bitümün yumuşama noktası sıcaklık değerini düşürdüğü, bitüm kıvamlılığının azaldığı, sıcaklık hassasiyetinin ise arttığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Kıvamlılığın azalması yüksek penetrasyon değerleriyle aynı deformasyonlara sebebiyet verirken, düşük yumuşama noktası değerine sahip bitümün, yüksek sıcaklığa karşı yüksek hassasiyetli olması sebebiyle soğuk iklimlerde kullanılmasının daha uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Saf bitüme eklenen atık tarımsal kül katkısının bitümün penetrasyon değerini azalttığı, yumuşama noktası değerini artırdığı, dolayısıyla kıvamlılığını artırdığı görülmüştür. Yüksek yumuşama noktası değerine sahip bitümün sıcaklığa karşı hassasiyeti azaldığından; kül katkılı modifikasyon yapılmış bitümlerin sıcak iklimlerde kullanılmasının tercih edilmesinin doğru olacağı sonucuna ulaşılmıştır.
- RTFOT Deneyi Öncesi ve sonrası yapılan deneylerde; Yumuşama noktası değerinin artan yağ oranıyla azaldığı, artan kül oranıyla arttığı sonucuna ulaşılmıştır Bitümün kısa süreli yaşlandırılması (RTFOT) sonrası yumuşama noktası değerlerinin RTFOT öncesi duruma göre arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Parlama Noktası Deneyi, bitümün işlendiği, serildiği ya da imalatının herhangi bir aşamasında meydana gelebilecek olası tutuşma, parlama riskiyle ilgili bilgi vermesi açısından önem arz eden bir deneydir. Elde edilen bütün sonuçlar en az 220 °C şartını sağlayarak, güvenlik sınırları içerisinde kalmıştır.
- Bitümün Sıcaklığa Duyarlılığının Değerlendirilmesi için Penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlarla Penetrasyon İndeksleri hesaplanmıştır. Saf bitüme %2 oranında atık kızartmalık yağ eklenmesi

durumunda (4 nolu deney grubu) PI değeri -3.092; %4 oranında atık kızartmalık yağ eklenmesi durumunda (7 nolu deney grubu) ise PI değeri -3.818 olduğu görülmüştür. Yağ katkısının bitümü ısıya karşı çok duyarlı yaptığı sonucuna ulaşılmıştır. Saf bitüme %3 oranında atık tarımsal kül karışımı eklenmesi durumunda (2 nolu deney grubu) PI değeri -0.030; %6 oranında atık tarımsal kül karışımı eklenmesi durumunda (3 nolu deney grubu) ise PI değeri -0.128 olduğu görülmüştür. Kül katkısının bitümün ısıya karşı duyarlılığına çok büyük bir etki yapmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Sıcaklık hassasiyeti bakımından en uygun deney grubunun yağ katkısının olmadığı, %3 kül katkısının olduğu bitümlü bağlayıcının 180°C de 20 dakika karıştırılarak hazırlanan 2 nolu deney grubu olduğu gözlemlenmiştir.

- RTFOT (Dönel İnce Film Isıtma Kaybı) Deneyi Sonuçları incelendiğinde; en fazla kütle kaybının yağ oranının sabit olduğu deney grupları içinde %3 kül katkısının olduğu 2, 5, ve 8 nolu deney gruplarında olduğu gözlemlenmiştir. En az kütle kaybının ise yağ ve kül katkısının olmadığı 1 nolu deney grubunda olduğu tespit edilmiştir. Deney sonucu bulunan kütle kayıplarının Karayolları Teknik şartnamesi üst sınırı olan % 0,8 i aşmadığı görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan değişkenler sadece yağ ve kül katkısı olmadığından, sıcaklık ve sürenin de değişkenlik göstermesinden kaynaklı olarak doğrusal bir sonuç elde etmek için değişken parametrelerden bir kısmının sabit parametre olarak kullanıldığı farklı modifikasyonların da yapılması önerilmektedir.
- Artan yağ katkısı stabiliteyi yüksek oranda etkilerken stabilite değerlerini düşürmekte olup, artan kül katkısı ise daha düşük bir şiddetle etkilemekte fakat stabiliteyi artırmaktadır.
- Akma deney sonuçlarına göre akma değerleri genel olarak şartname sınırları içinde kalmış olmakla birlikte yağ katkısının %0, kül katkısının %3, sıcaklığın 180 °C ve karıştırma süresinin 20 dakika olduğu 2 nolu deney grubunda akma üst sınırını aştığı görülmektedir. Genel olarak birbirine yakın değerlerin görüldüğü akma değerlerinin aynı yağ oranlarına sahip grupların içindeki en yüksek akma değerlerinin %3 lük kül katkısının olduğu deney gruplarında olduğu görülmüştür. Yağ ve kül katkısıyla akma değerleri düzeyinde ani artış ya da düşüş olmaması esnek üst kaplamanın kırılma anındaki davranışının büyük bir değişime uğramadığını göstermektedir.

- FTIR spektrumları incelendiğinde; pik noktalarının aynı dalga sayısı aralıklarında olduğu ve birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür. Katkısız bitüme %2 yağ ve %3 kül katkısı eklendiğinde ve bitüm yaşlandırıldığında dahi bitüm numunelerinin temel yapısında büyük değişimler gözlenmemiştir. Katkı maddelerinin ya da 190°C lik karışım sıcaklığının bitüm numunesinin kimyasal yapısını değiştirmedeği görülmüştür. Atık yemeklik yağın ve atık tarımsal kül katkısının bitümün yapısını bozmadan modifiyer olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
- Penetrasyon, yumuşama noktası, penetrasyon indeksi ortak değerlendirildiğinde; 2 nolu deney grubundaki parametrelerin optimum değerleri verdiği görülürken, stabilite için en yüksek değer 3 nolu deney grubunda olduğu, akma için optimum değer 2 nolu deney grubu dışındaki deney gruplarında olduğu, yaşlandırılmış numunelerdeki kütle kaybının ise en az 1 nolu deney grubunda olduğu anlaşılmaktadır. Daha sonraki çalışmalarda, 1, 2, ve 3 nolu deney grupları için parametre değerleri değiştirilerek tüm deneyler için optimum değerlerin elde edilebileceği farklı karıştırma sıcaklıkları, farklı karıştırma süreleri, farklı karıştırma hızları ve farklı katkı oranlarının modifiye edildiği karışımlar kullanılarak performans değerleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abo-Shanab, Z. L., Ragab, A. A., & Naguib, H. M. (2021). "Improved dynamic mechanical properties of sustainable bio-modified asphalt using agriculture waste". *International Journal of Pavement Engineering*, 22(7), 905-911.
- Abuawad, I. M., Al-Qadi, I. L., & Trepanier, 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. & Özen, H. (2012). "SBS Polimeri ve Su Hasarı Önleyici Katkıların Asfalt Kaplamalarda Performans Karşılaştırması". *Teknik Dergi*, 23 (113) , 5967-5986.
- Alataş, T. İstek, A. (2019), "Farklı Ilık Karışım Asfaltların Nem Hasarına Karşı Dayanımlarının İncelenmesi", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 8 (3), 985-998.
- Arabani, M., and Esmaaeli, N. (2020) "Laboratory evaluation on effect of groundnut shell ash on performance parameters of asphalt binder and mixes", *Road Materials and Pavement Design*, 21(6), 1565-1587.
- Bağdatlı, M. E. C. ve Yıldırım, M. Ş. (2017). "Karayolu Üstyapılarındaki Bozulmaların Bakım Maliyetlerine Etkisi" . *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi* , 6 (1) , 102-111 .
- Bayrak O.Ü, 2007. "Rijit üstyapı tasarımına yeni bir yaklaşım", Doktora tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum
- Behnood, A. and 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.
- Boura, S. A. and Hesami, S. (2020) "Laboratory evaluation of the performance of asphalt mixtures containing biomass fillers", *Road Materials and Pavement Design*, 21(7), 2040-2053.
- Chen, C., Podolsky, J.H., Williams, R.C. and 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. and Huang, C.C. (2007) "Fundamental Characterization of SBS-Modified Asphalt Mixed with Sulfur", *Journal of Applied Polymer Science*, 103, 2817-2825.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. "Bitkisel Atık Yağların Çevresel Etkileri",
<https://bartin.csb.gov.tr/bitkisel-atik-yaglarin-cevresel-etkileri-haber-42361>
Son erişim tarihi, 01.02.2023

- Dong, Z., Yang, C., Luan, H., Zhou, T. and Wang, P. (2019) “Chemical characteristics of bioasphalt and its rheological properties after CR/SBS composite modification”, **Construction and Building Materials**, 200, 46-54.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. “Biyokütle”, <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle>
Son erişim tarihi, 01.02.2023
- Eren, Ü. (2008) “Asfaltitin Asfalt Betonunda Mineral Filler Olarak Kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**. Trabzon.
- E. Eriskin, S. Karahancer, S. Terzi and M. Saltan (2017) “Waste frying oil modified bitumen usage for sustainable hot mix asphalt pavement”. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, 17(4), 863-870.
- Fernandes, S.R.M., Silva, H.M.R.D. and Oliveira, J.R.M. (2018) “Developing enhanced modified bitumens with waste engine oil products combined with polymers”, **Construction and Building Materials**, 160, 714-724.
- Geçkil, T. (2019) “Physical, Chemical, Microstructural and Rheological Properties of Reactive Terpolymer- Modified Bitumen”, **Materials**, 12(6), 921.
- Gezer, B. B. (2009) “Mersin İli Çelebili Köyü İçmeler Mevkiinde Yüzeyleyen Kireçtaşlarının Beton Ve Asfalt Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**. Adana.
- Gökalp, İ., Özinal, Y. ve Uz, V. E. (2018). “Atık Bitkisel Yemeklik Yağların Saf Bitüm Özelliklerine Etkisinin Araştırılması”. **Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**, 6(4), 570-578.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K. (2001). “Asfalt ve Uygulamaları” **Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, İsfalt Bilimsel Yayını No:1**, İstanbul.
- Kapluhan, E. (2014). “Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Biyokütle Enerjisinin Dünyadaki Ve Türkiye’deki Kullanım Durumu”. **Marmara Coğrafya Dergisi**, 0 (30), 97-125
- Karaçor, F. (2018) “Bitümlü Sıcak Karışımlarının Üç Eksenli Basınç Testi Altında Deformasyon Direncinin Belirlenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**, Konya.
- Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, “FTIR (Spektrometre Cihazı)”, <https://kitam.omu.edu.tr/2020/04/30/ftir-spektrometre-cihazı>
Son erişim tarihi, 02.02.2023

- KGM, “Devlet ve İl Yolları Envanteri”,
<https://www.kgm.gov.tr/sayfalar/kgm/sitetr/kurumsal/yolagi.aspx>
Son erişim tarihi, 01.01.2022
- Kutluhan, S. (2008) “Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunun Modellenmesi”. Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Kutluhan, S. ve Ağar, 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. and 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.
- Li, J., Zhang, F., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F. and 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. and 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. and 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.
- Kumar, P., and Gupta, A. (2010). “Case Studies on Failure of Bituminous Pavements”, *In Proceedings of the 1st International Conference on Pavement Preservation*, 505-518
- Orhan, F., (2012) “Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları”, *T.C Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma Ve 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. and 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. and 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.
- Sengoz, B. and 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. and Isikyakar, G. (2009) “Morphology and image analysis of polymer modified bitumens”, *Construction and Building Materials*, 23, 1986-1992.

- Su, N., Xiao, F., Wang, J. and Amirkhanian, 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. and 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. and 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. and 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.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. “Biyokütle Enerji Tesisi (Fizibilite)- Tedarik Tesisi (İş Planı) Teknik Destek Çağrısı”,
<https://www.tarimorman.gov.tr/TAGEM/Duyuru/207/Biyokutle-Enerji-Tesisi-Son> erişim tarihi, 01.02.2023
- 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.
- Uysal, F. (2016) “Vermikülitin Karayolu Esnek Üstyapıları Bitümlü Sıcak Karışımlarında Kullanılabilirliğinin Araştırılması”. Yüksek Lisans Tezi. **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**, Isparta.
- Xiang, L., Tu, J., Chen, J. and Que, G. (2010) “Outdoor aging of road asphalt and SBS modified asphalt”, **Chemical Science Engineering**, 5, 35-42.
- Xue, Y., Wu, S., Cai, J., Zhou, M., and Zha, J. (2014) “Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis”, **Construction and Building Materials**, 56, 7-15.
- Yang, X. and 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.
- Yıldırım, Z. B., Eren, E., Katanalp, B. Y., and Karacasu, M. (2018) “Deneyisel Tasarım Yöntemlerinin Yol Üstyapı Uygulamalarında Kullanılabilirliğinin İncelenmesi”, **2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies**, Samsun, 3, 1514-1519

Yüknü, K., Öztürk, T., Komut, M., (2021) Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı, **T.C Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma Ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü**, Ankara

Zargar, M., Ahmadinia, E., Asli, H. and 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, 254-258.

Zhang, R., Wang, H., Gao, J., You, Z. and Yang, X. (2017) “High temperature Performance of SBS modified bio-asphalt”, **Construction and Building Materials**, 144, 99- 105.

Zulfikri, M., Zainudin, M., Khairuddin, F. H., Ng, C., Che Osmi, S. K., Misnon, N. A., and Murniati, S. (2016) “Effect of sugarcane bagasse ash as filler in hot mix asphalt”, **Materials Science Forum**, 846, 683–689.