

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ULAŞTIRMA BİLİM DALI**

**BİTKİSEL KATKI KULLANIMININ BİTÜMLÜ
BAĞLAYICILARIN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Buse ÇALIŞKAN

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Dilay YILDIRIM UNCU**

MANİSA–2025

**BUSE
ÇALIŞKAN**

**BİTKİSEL KATKI KULLANIMININ BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zekâ ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Buse ÇALIŞKAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Buse ÇALIŞKAN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:
Dr. Öğr. Üyesi Dilay YILDIRIM UNCÜ

Günümüzde yük ve yolcu taşımacılığı çoğunlukla karayolları ile gerçekleşmektedir. Karayollarının %80'ini petrol alt ürünü olan bitüm malzemesi oluşturmaktadır. Zamanla kullanıma bağlı olarak yollarda oluşan bozulmalara karşı bitümünün özelliklerini iyileştirmek için farklı katkı malzemeleri kullanılarak bitümün özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Kullanılan katkı malzemelerinin bitkisel olması hem maddi hem de ekolojik açıdan önem arz etmektedir.

Bu çalışmada 50/70 penetrasyon değerine sahip saf bitüme bitkisel katkı malzemeleri eklenerek modifiye bitüm numuneleri üretilmiştir. Üretilen modifiye bitümlü bağlayıcılara yapılan deneylerin sonuçlarına bakılarak, bitüm modifiyeri olarak kullanılan bitkisel katkı malzemelerinin bitümün özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Yapılan tez çalışmasında, literatür çalışmaları incelenmiş ve daha önce yapılan çalışmaların sonuçları göz önüne alınarak karıştırma koşulları belirlenmiştir. Bitüme ağırlığınca %2-4-6-8-10 oranlarında, ayrı ayrı pirina ve Aloe vera jeli eklenerek, 160°C'de ve 1000 rpm hızda 60 dakika boyunca karıştırılarak modifiye bitüm numuneleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modifiye bitüm numunelerine penetrasyon deneyi, yumuşama noktası tayin deneyi, Brookfield viskozite deneyi, ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ve Marshall tasarım deneyi yapılmış ve deney sonuçlarına bakılarak, bitümü modifiye etmek için kullanılan bitkisel katkı malzemelerinin, bitüm modifikasyonu sonrasında saf bitüme kıyasla bitümlü bağlayıcının özellikleri üzerinde oluşturduğu etkiler tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitüm, Modifikasyon, Bitkisel Katkı, Pirina, Aloe Vera, Marshall Stabilitesi

2025, 81 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Buse ÇALIŞKAN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Civil Engineering**

**Supervisor
Asst. Prof. Dr. Dilay YILDIRIM UNCU**

Today, freight and passenger transportation is mostly carried out by highways. 80% of highways are made up of bitumen, a byproduct of petroleum. Studies have been carried out to improve the properties of bitumen by using different additives, in order to improve the properties of bitumen against deterioration that occurs on highways over time. The fact that the additives used are plant-based is important both financially and ecologically.

In this study, modified bitumen was produced by mixing plant-based additives to pure bitumen with a penetration grade of 50/70. The effect of the produced modified bitumen binders on the properties of bitumen has been investigated.

In the thesis study, a literature review was conducted and mixing conditions were determined based on the results of previous research. Modified bitumen samples were prepared by adding olive pomace and Aloe vera gel separately at rates of 2%, 4%, 6%, 8%, and 10% by weight of bitumen, and mixing them at 160°C and 1000 rpm for 60 minutes. The prepared modified bitumen samples were subjected to penetration tests, softening point determination tests, Brookfield viscosity tests, Rolling Thin Film Oven Tests (RTFOT), and Marshall design stability tests. Based on the test results, the effects of the plant-based additives used for bitumen modification on the properties of the bituminous binder were identified by comparing them to those of the unmodified bitumen after modification.

Keywords: Bitumen, Modification, Herbal Additive, Pomace, Aloe Vera, Marshall Stability

2025, 81 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmanın konusu, bitkisel katkı kullanımının bitümlü bağlayıcıların özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Bitümün modifiye edilmesi için bitkisel katkı malzemesi olarak pirina ve aloe vera malzemeleri kullanılmıştır. Literatür kısmında bitkisel malzemeler ile daha önce yapılan bitüm modifikasyonu çalışmalarından bahsedilmiştir. Materyal ve yöntem bölümünde, çalışmada kullanılan malzemeler ve yapılan deneyler hakkında bilgi verilmiştir. Deneysel çalışmalar bölümünde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir.

Çalışma sürecim boyunca, karşılaştığım her zorlukta, bana destek olup ilerleyebilmemi sağlayan ve bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Dilay YILDIRIM UNCU' ya, laboratuvar çalışmalarında yardım ve desteğini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Taylan GÜNAY hocama ve Sayın Arş. Gör. Adem ÖZER'e, tavsiyeleriyle yol gösteren hocam Sayın Arş. Gör. Dr. Yalçın KARAKAYA'ya, hayatımın tüm aşamalarında yanımda durup bana destek olan aileme ve bu süreçte yorgunluk ve stresimi alan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Buse ÇALIŞKAN
Manisa, 2025

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	Yüzde
°C	Santigrat Derece
AB	Aloe Vera Katkılı Bitüm
ABYY	Atık Bitkisel Yemeklik Yağ
ASTM	American Society for Testing and Material (Amerikan Malzeme ve Test Derneği)
B	Saf Bitüm
BSK	Bitümlü Sıcak Karışımlar
Cm³	Santimetre Küp
cP	Centipoise
D_p	Hacim Özgöl Ağırlık
D_t	Kaplama Karışımının Boşluksuz Maksimum Özgöl Ağırlığı
Dev/dk	Devir/Dakika
Dk	Dakika
Gr	Gram
Kg	Kilo Gram
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi
ml/dk	Mililitre/Dakika
PB	Pirina Katkılı Bitüm
rpm	Revolutions Per Minute (1 dakika içerisinde gerçekleşen dönüş ya da devir)
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test (Dönel İnce Film Etüvü Deneyi)
Sn	Saniye
TS EN	Türk Standardı European Norm
V_{FA}	Bitüm Dolu Boşluk Oranı
V_H	Hava Boşluk Oranı
V_{MA}	Agregalar Arası Boşluk Oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Bitümün Farklı Sıcaklık ve Zamana Göre Değişimi	12
Şekil 2.2. Bitümün Sıcaklıkla Değişimi.....	13
Şekil 2.3. Bitümlü Bağlayıcıda Zamana Bağlı Oluşan Gerilme ve Deformasyon	13
Şekil 3.1. Bitüm	16
Şekil 3.2. Pirina Gösterimi.....	17
Şekil 3.3. Aloe Vera Görünümü	18
Şekil 3.4. Aloe Vera Bitkisinin Katmanlarının Gösterimi	19
Şekil 3.5. Elek Analizi	21
Şekil 3.6. Tane Boyutlarına Göre Ayrılmış Agrega	22
Şekil 3.7. No 200 Elekten Geçirilmiş Pirina.....	24
Şekil 3.8. Aloe Vera Jeli	25
Şekil 3.9. Karıştırma Cihazı ve Ekipmanları	26
Şekil 3.10 Penetrasyon Cihazı ve Ekipmanları.....	27
Şekil 3.11. Penetrasyon Deneyi Aşamaları.....	28
Şekil 3.12. Yumuşama Noktası Deneyi Cihaz ve Ekipmanları	29
Şekil 3.13. Yumuşama Noktası Deney Aşamaları.....	31
Şekil 3.14. RTFOT Deney Cihazı ve Ekipmanları	32
Şekil 3.15. RTFOT Deney Aşamaları.....	33
Şekil 3.16. Brookfield Viskozite Deney Cihazı ve Ekipmanları	35
Şekil 3.17. Brookfield Dönel Viskozite Deney Aşamaları	36
Şekil 3.18. Bitüm Etüvü.....	37
Şekil 3.19. Agrega Etüvü	37
Şekil 3.20. Hassas Terazî	38
Şekil 3.21. Arşimet Terazisi	38
Şekil 3.22. Kumpas	38
Şekil 3.23. Kriko	39
Şekil 3.24. Karışım Mikser Cihazı ve Ekipmanları	39
Şekil 3.25. Marshall Kalıpları.....	39
Şekil 3.26. Marshall Tokmağı.....	40
Şekil 3.27. Marshall Stabilite Cihazı ve Ekipmanları.....	40
Şekil 3.28. Marshall Tasarım Deneyi Aşamaları	44
Şekil 4.1. Pirina Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon Deneyi Sonuç Grafiği	45
Şekil 4.2. Pirina Katkılı Bitüme Ait Yumuşama Noktası Deneyi Sonuç Grafiği.....	46
Şekil 4.3. Pirina Katkılı Bitüme Ait Brookfield Viskozite Deneyi Sonuç Grafiği.....	47
Şekil 4.4. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneyi Sonuç Grafiği.....	49
Şekil 4.5. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneyi Sonuç Grafiği	50
Şekil 4.6. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon Deneyi Sonuç Grafiği	52
Şekil 4.7. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Yumuşama Noktası Deneyi Sonuç Grafiği.....	53
Şekil 4.8. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Brookfield Viskozite Deneyi Sonuç Grafiği.....	54

Şekil 4.9. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneyi Sonuç Grafiği.....	56
Şekil 4.10. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneyi Sonuç Grafiği	57
Şekil 4.11. Agregat Granülometrisi	60
Şekil 4.12. Boşluk Hacminin Bitüm Yüzdesi ile Değişimi	64
Şekil 4.13. Agregatlar Arası Boşluk Oranının Bitüm Yüzdesi ile Değişimi	64
Şekil 4.14. Bitümle Dolu Boşluk Oranının Bitüm Yüzdesi ile Değişimi	65
Şekil 4.15. Marshall Stabilesinin Bitüm Yüzdesi ile Değişimi	65
Şekil 4.16. Akma Oranının Bitüm Yüzdesi ile Değişimi.....	66
Şekil 4.17. Boşluk Hacminin Pirina Katkı Oranı ile Değişimi.....	68
Şekil 4.18. Agregatlar Arası Boşluk Oranının Pirina Katkı Oranı ile Değişimi..	68
Şekil 4.19. Bitümle Dolu Boşluk Oranının Pirina Katkı Oranı ile Değişimi.....	69
Şekil 4.20. Marshall Stabilesinin Pirina Katkı Oranı ile Değişimi.....	70
Şekil 4.21. Akma Oranının Pirina Katkı Oranı ile Değişimi	71



TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Modifikasyon İşleminde Kullanılan Katkı Malzemelerinin Türleri .	4
Tablo 2.1. Bitümün Kimyasal Bileşenleri	11
Tablo 3.1. Saf Bitüme Ait Deney Sonuçları.....	16
Tablo 3.2. Aloe Vera Jelini Oluşturan Bileşenler.....	19
Tablo 3.3. Agreganın Özellikleri.....	21
Tablo 3.4. Literatürdeki Benzer Çalışmalara Ait Karıştırma Verileri.....	23
Tablo 3.5. Modifiye Bitüm Numunelerinin Hazırlanmasında Kullanılan Karıştırma Verileri	24
Tablo 3.6. Karıştırma Verilerine Göre Oluşturulan Modifiye Bitüm Numuneleri.....	26
Tablo 3.7. Penetrasyon Okumaları Arası Maksimum Fark Değerleri.....	29
Tablo 3.8. Bitümlü Sıcak Karışım Tasarım Kriterleri.....	41
Tablo 4.1. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Kütle Kaybı Hesap Sonuçları	48
Tablo 4.2. Pirina Katkılı Bitüm Numunelerine Ait Penetrasyon İndeksi ve Kalıcı Penetrasyon (%) değeri	51
Tablo 4.3. Aloe Vera Katkılı Bitüm Numunelerine Ait RTFOT Kütle Kaybı Hesap Sonuçları.....	55
Tablo 4.4. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon İndeksi ve Kalıcı Penetrasyon (%) Değeri	58
Tablo 4.5. Agreganın Karışım Verileri.....	59
Tablo 4.6. Optimum Bitüm İçeriği İçin Marshall Tasarım Deney Sonuçları.....	63
Tablo 4.7. Pirina Katkılı Modifiye Bitüm Numuneleri İçin Marshall Tasarımı Deney Sonuçları	67
Tablo Ek-A: Marshall Stabilite Düzeltme Faktörleri	81

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	Sayfa I
ABSTRACT	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER.....	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	V
TABLolar DİZİNİ	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
------------------------------	---

İKİNCİ BÖLÜM

2. BİTÜM MODİFİKASYONU	11
2.1. Bitüm	11
2.2. Modifikasyon İşleminin Amaçları	14
2.3. Modifikasyonda Kullanılacak Malzemelerde Aranılan Özellikler	15

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	16
3.1.1 Bitüm.....	16
3.1.2 Pirina.....	16
3.1.3 Aloe Vera	18
3.1.4 Agrega.....	20
3.2. Yöntemler	22
3.2.1 Modifiye Bitüm Numunelerinin Hazırlanması	22
3.2.2 Geleneksel Bitüm Deneyleri.....	27
3.2.2.1 Penetrasyon Deneyi	27
3.2.2.2 Yumuşama Noktası Tayin Deneyi	29
3.2.2.3 Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi (RTFOT)	32
3.2.2.4 Penetrasyon İndeksi ve Kalıcı Penetrasyon Değeri Hesabı...	34
3.2.2.5. Brookfield Dönel Viskozite Deneyi	34
3.2.3. Marshall Tasarım Deneyi	36
3.2.3.1. Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi	41
3.2.3.2 Marshall Tasarım Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	42

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. DENEY SONUÇLARI.....	45
4.1. Geleneksel Deney Sonuçları	45
4.1.1. Pirina Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon Deney Sonuçları.....	45
4.1.2. Pirina Katkılı Bitüme Ait Yumuşama Noktası Tayini Deney Sonuçları	46
4.1.3. Pirina Katkılı Bitüme Ait Brookfield Dönel Viskozite Deney Sonuçları	46
4.1.4. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Deney Sonuçları.....	47
4.1.4.1. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Penetrasyon	

Deney Sonuçları	48
4.1.4.2. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deney Sonuçları	49
4.1.5. Pirina Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon İndeksi ve Kalıcı Penetrasyon Değeri Hesabı	50
4.1.6. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon Deney Sonuçları	51
4.1.7. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Yumuşama Noktası Deney Sonuçları.....	52
4.1.8. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Brookfield Dönel Vizkozite Deney Sonuçları.....	53
4.1.9. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait RTFOT Deney Sonuçları	54
4.1.9.1. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Penetrasyon Deney Sonuçları	55
4.1.9.2. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deney Sonuçları	56
4.1.10. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon İndeksi ve Kalıcı Penetrasyon Değeri Hesabı.....	57
4.2. Marshall Tasarım Deney Sonuçları	58
4.2.1. Elek Analizi	59
4.2.2. Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi ve Marshall Tasarım Deney Sonuçları	60
4.2.3. Pirina Katkılı Modifiye Bitüm Numunelerine Ait Marshall Tasarım Deney Sonuçları	66
BEŞİNCİ BÖLÜM	
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	72
KAYNAKÇA	77
EKLER.....	81
EK A. (Marshall Tasarım Deneyi Stabilite Düzeltme Faktörü)	81

GİRİŞ

Artan nüfus ve araç kullanımı yüksek performanslı yollara duyulan ihtiyacı arttırmıştır. Bu sebeple dünya üzerinde en çok kullanılan ve uygulama alanı en geniş olan bitümlü sıcak karışımların (BSK) performansını artırmaya yönelik çalışmalar araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bitümlü sıcak karışımların temel bileşenlerinden olan bitümün performans özelliklerinde ve karışım içerisindeki davranışında iyileştirme yapılması BSK'lerin hem servis ömürlerinin uzamasına hem de kullanım konfor ve güvenliğinin artmasına katkı sağlamaktadır. Bu iyileştirmeler öncelikle BSK'lerin ana bileşeni olan bitümün performans özelliklerinin iyileştirilmesi ile sağlanmaktadır ki bu da bitümün modifikasyonu ile mümkündür. Bitüm modifikasyon işlemleri çeşitli katkı malzemeleri ile yapılabildiği gibi atık malzemeler ile de yapılabilmektedir. Modifikasyonun atık malzemeler ile yapılması hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli fayda sağlamaktadır [1].

Bu tez çalışmasında zeytinlerin sıkılmasından sonra arta kalan pirinanın ve Aloe vera jelinin bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bitkisel atık malzemesi olan pirina (zeytin posası), değerli bir tarımsal ürün olan zeytinyağının üretimi sonrasında oluşan, çekirdek, kabuk ve posadan meydana gelen bir yan üründür. Pirina %8-%15 oranında yağ, %5-%10 oranında protein, %75-%80 oranında kuru madde, %3-%5 oranında kül ve %35-%50 oranında selüloz içeriğine sahiptir [2, 3]. Pirina malzemesinin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, bu malzemenin kimyacılar, ziraat mühendisleri ve gıda mühendisleri tarafından kullanımının araştırıldığı görülmüştür. Bunların yanı sıra, atık malzeme olarak görülen pirinanın karayolu mühendisliğinde modifiyer olarak kullanımının da araştırıldığı, bu sayede sürdürülebilirlik açısından pirinanın farklı bir kullanım alanı daha kazanabileceği sonucuna varılmıştır [2, 3].

Bu çalışmada kullanılacak bir diğer ürün olan Aloe vera, sıcak ve kuru iklimlerde yetişen kaktüs benzeri bir bitkidir. Aloe vera, bitkinin sağlık yararlarını sağlayan aktif maddeler içerir. Aloe vera yapraklarında en az 160 temel bileşen vardır. Örneğin, Aloe vera, oksidatif stresi önlemek için serbest radikalleri savuşturarak çalışan antioksidanlar olan A, B, C ve E vitaminlerini içerir [4, 5]. Aloe vera ayrıca monosakkaritler, polisakkaritler, hormonlar, enzimler ve ikincil

bitki bileşikleri içerir [4, 5]. Aloe vera jeli deri üzerinde birçok pozitif etkisi olan su bazlı bir nemlendiricidir. Çalışmalar, topikal olarak deriye uygulandığında Aloe vera jelinin cildin yapısı ve esnekliği konusunda önemli rol oynayan kolajen üretimini arttırdığını göstermektedir. Kozmetik ve tıbbi amaçlar için kullanılan Aloe vera bitkisinin gençleştirici, onarıcı ve iyileştirici etkileri göz önünde bulundurularak bitüm üzerinde de benzer sonuçlar alınabileceği düşünülerek çalışmada pirinanın yanı sıra Aloe vera Jelinin de bitüm özelliklerine etkisi araştırılacaktır [4, 5].

Bu kapsamda, deneysel çalışmalarda kullanılması için 50/70 penetrasyon sınıfına sahip saf bitüm, pirina ve Aloe vera Jeli temin edilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar göz önünde bulundurularak, bitüm ağırlığınca farklı oranlarda pirina ve Aloe vera Jeli ayrı ayrı bitüme eklenmiş, homojen bir karışım elde edilmesi için standart bir metotla karıştırılmıştır. Bitkisel atık katkılı modifiye bitüm ve saf bitüm numunelerine, penetrasyon, yumuşama noktası, Marshall stabilite, RTFOT ve dönel viskozite deneyleri uygulanmıştır.

Yapılacak olan çalışmanın amacı, modifiye edilen bitümlü bağlayıcının karışım içerisindeki davranışlarını iyileştirip bitümlü kaplamanın servis ömrü boyunca meydana gelebilecek bozulmalara karşı dayanımını artırıp servis ömrünü uzatmak ve sürdürülebilir ulaşım katkıda bulunmaktır. Bitümü modifiye etmek için modifiyer olarak bitkisel katkı malzemeleri farklı oranlarda kullanılacak ve kullanılan katkı malzemelerinin bitümün özelliklerini iyileştirici etkisi farklı deneysel yöntemlerle test edilecektir. Modifiyer olarak kullanılacak ürünlerin; bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerinde ve buna bağlı olarak performansında iyileşme sağlaması amaçlanmaktadır.

Yapılan incelemelerde, modifiyer malzeme olarak kullanmış olduğumuz Aloe vera jelinin bitümü modifiye etmek amaçlı şu zamana kadar hiç kullanılmadığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışma bu yönü ile literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Yapılan çalışma, 50/70 penetrasyon değerine sahip saf bitümün, pirinanın ham haliyle modifiye edilmesi açısından ve hem geleneksel bitüm deneylerinin hem de Marshall tasarım deneyinin bir arada uygulanıp değerlendirilmesi yönü ile de literatür açısından özgün niteliktedir.

1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Yüksek performanslı yollara duyulan ihtiyaç, BSK'lerin performansının iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmaları da beraberinde getirmiştir. Bu çalışmalar doğrultusunda, bitümlü bağlayıcıların karışım içerisindeki davranışlarını iyileştirerek daha sürdürülebilir ulaşım katkıda bulunmak için bitümü modifiye etmeye dair çalışmalar önem kazanmıştır. Bitüm modifikasyonu işleminde kullanılan katkı malzemeleri Tablo 1.1'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Modifikasyon İşleminde Kullanılan Katkı Malzemelerinin Türleri [6]

	Katkı Türü	Örnekler	Katkının Bağlayıcının Üzerindeki Etkisi
Polimerler	Kauçuk (Elastomer) - Doğal Lateks - Yapay Lateks - Blok Kopolimer - İşlenmiş Kauçuk	- Stiren-Butadien-Stiren (SBS) - Stiren-Butadien-Rubber (SBR) - Doğal Kauçuk - Dönüştürülmüş Kauçuk - Atık Tekerlek Lastikleri	-
	Plastik (Plastomer)	- Polietilen - Polipropilen - Etil-Vinil-Asetat (EVA) - Polivinil Klorid (PVC)	Serleştirme
	Bileşim	Kauçuk ve plastik gruplarındaki polimerlerin karışımı	-
	Filler	- Mineral Filler - Kireç - Portland Çimentosu - Uçucu Küller - Karbon Siyahı - Sülfür	Sertleştirme
	Gençleştirici (ekstender)	- Lignin (Odun Özü) - Sülfür	Sertleştirme
	Fiber	Doğal - Asbest - Taş Yünü	Sertleştirme
		Yapay - Polipropilen - Polyester - Fiberglas	
	Oksidan	Manganez Tuzu	Sertleştirme
	Antioksidan	- Kurşun Karışımları - Karbon - Kalsiyum Tuzu	Yumuşatma
	Hidrokarbon	- Yeniden Kullanma ve Gençleştirici Yağları - Doğal Asfaltlar	Yumuşatma veya Sertleştirme
	Soyulma Önleyici	- Aminler - Kireç	Yumuşatma

Modifikasyon işlemi, çeşitli katkı malzemeleriyle yapılabileceği gibi atık ve bitkisel içerikli malzemeler ile de yapılabilmektedir. Modifikasyon işleminde bu tarz malzemelerin kullanılması hem çevresel hem de ekonomik açıdan da yarar

sağlamaktadır. Ancak kullanılan katkı malzemesinin türüne ve kullanım miktarına dikkat edilmesi gerekmektedir.

Bitkisel katkı malzemeleri süründürülebilir ulaşım açısından faydalı olsalar da yapıları gereği sıcaklık, UV ışını, oksijen, nem ve trafik yükleri gibi çevresel etkiler nedeniyle zamanla kimyasal ve fiziksel değişime uğrayarak bozulma eğilimi gösterebilirler. Bu da servis ömrü boyunca meydana gelebilecek durumlara karşı bitümün performansının olumsuz yönde etkilenmesine sebep olabilir. Bitüm modifikasyonunda kullanılan bitkisel katkı malzemelerinin bozulma çeşitleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Oksidatif Bozulma (Yaşlanma): Oksijen ile uzun süreli temastan dolayı katkı malzemelerinin sertleşerek bitümün elastikiyetini kaybetmesine sebep olan bozulma türüdür [7].

2. UV Işınması ile Bozulma (Foto oksidasyon): Özellikle aşınma tabakasında kullanılan bitkisel katkı malzemelerinin güneş ışığına uzun süreli maruz kalmasından dolayı kimyasal yapısında oluşan bozulma türüdür [8, 9, 10].

3. Termal Bozulma (Yüksek Sıcaklıkta Parçalanma): Bitümün işlenebilir hale gelmesi için ortalama 160°C'ye kadar ısıtılması gerekmektedir. Bazı bitkisel katkı malzemelerinin bu derece yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında yapılarının bozularak modifiye edici özelliklerini kaybetmesine sebep olan bozulma türüdür [7, 10].

4. Hidroliz (Nem ile Tepkime): Uzun süreli yüksek nem ve/veya su ile temasta BSK'nin suya karşı duyarlılığının artmasına sebep olan bozulma türüdür [11, 12].

5. Mikrobiyal Bozulma (Biyolojik Parçalanma): Bitkisel malzemelerde bulunan mikroorganizmaların bozularak özelliklerini yitirmesine ve bu bozulma sonucunda da kullanılan katkı malzemesinin bitümlü bağlayıcıdan ayrılarak bitümlü kaplamanın performans kaybına sebep olan bozulma türüdür [13, 14, 15].

6. Kimyasal Uyumsuzluk: Kullanılan katkı malzemesinin bitüm ile kimyasal açıdan uyumsuz olması homojen bir karışım elde etmeyi engelleyebilir. Bitüm içerisinde homojen olarak karışmayan katkı malzemesinin bitümden ayrılarak karışımın performans özelliklerini olumsuz yönde etkilemesine sebep olan bozulma türüdür [16].

Bitkisel ve atık malzemeler kullanılarak yapılan bitüm modifikasyon çalışmaları ile ilgili örnekler aşağıda verilmiştir.

Öz Kıcı vd. (2020), pirinanın bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Penetrasyon sınıfı 50/70 olan bitüm için Edremit Bölgesinde elde edilen zeytinyağı üretim atığı pirina kullanılmıştır. Kullanılan pirina %30-40 nem oranına sahip olduğu için, öncelikle doğal kurutma yöntemleriyle bu nem oranı %12-15'lere düşürülmüştür. Daha sonra pirina 300-350°C'lik fırında yakılarak nem oranı %8'e kadar düşürülmüştür. Yakılan pirina öğütülmüş ve No:200 elekten geçirilmiştir. Modifikasyonu için bitümlü sıcak karışıma bitüm ağırlığınca %2, %4, %6, %8, %10 oranlarında pirina eklenmiştir. Modifikasyon işlemi sonucunda katkı maddesi orası arttıkça penetrasyonun azaldığı, yumuşama noktası değerinin arttığı görülmüştür. Bu durum pirina külü ile modifiye edilmiş bitümün daha sıcak bölgelerde kullanılabilirliğini göstermiştir [1, 17].

İssi (2019) yaptığı çalışmada, pirina katkı kullanımının bitümün performans özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla penetrasyon sınıfı B160/200 olan saf bitüme, bitümün ağırlığınca %5, 10, 15 ve 20 oranlarında pirina ekleyerek modifiye bitüm numuneleri hazırlamıştır. Deneyler sonucunda, pirina katkı kullanımının genel olarak bitümü sertleştirdiği tespit etmiştir. Belli bir orandan sonra bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfının arttığı ancak, düşük sıcaklık performans sınıfının azaldığı tespit edilmiştir. Pirina katkı kullanımı ile karışımların nem hasarı ve kalıcı deformasyona karşı dirençlerinin arttığı görülmüştür [18].

Şehnaz Tıraş (2023) çalışmasında, pirina yağının bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliğini incelemiştir. Bitüme, ağırlığının %1, %2, %4 ve %8 oranlarında katkı malzemesi ekleyerek modifiye bitüm numuneleri oluşturmuştur. Deney sonuçlarına bakıldığında, kullanılan katkı maddesinin bitümün kıvamını düşürdüğü, kısa süreli yaşlanmaya karşı direncinin arttırdığı tespit edilmiş ve tekerlek izi oluşumu direncini arttırabileceği sonucuna ulaşılmıştır [19].

Yener ve Yadollahi (2013) yaptıkları çalışmada pirina pirolizi yapmış ve ardından bitüm modifikasyonunda kullanmıştır. Modifikasyon için bitümün ağırlığınca %1, 3 ve 5 oranlarında pirina kullanılarak 70/100 penetrasyon değerine sahip bitüm modifiye edilmiştir. Elde edilen modifiye bitümün penetrasyon değerinin artarken, yumuşama noktası değerinin azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, bu modifiye

bitümün agrega ve bitüm arasındaki bağı kuvvetlendirerek, soyulma direncini artırdığı belirlenmiştir. Soyulma direncindeki bu artış, durabiliteyi artırarak servis ömrü boyunca bitüm karışımının performansını olumlu yönde etkileyeceği belirtilmiştir [20].

Özel (2024) çalışmasında, zeytin pirinasının (OP) bitüm modifikasyonunda kullanımını incelemiş ve Stiren Butadien Stiren (SBS) polimeri ile performans ve maliyet açısından karşılaştırmıştır. 50/70 penetrasyon değerine sahip saf bitüme, ağırlığınca %4, 8, 15, 19, 25, 30 oranlarında OP ve %4, 4,5 oranlarında SBS ekleyerek modifiye bitüm numuneleri elde etmiştir. Geleneksel deney sonuçlarına bakıldığında, OP ve SBS modifiyeli bitümlerin benzer özellikler gösterdiğini, penetrasyonun azaldığını, sıcaklık duyarlılığının düştüğünü ve yumuşama noktasının arttığını gözlemlemiştir. OP ve SBS modifiye bitümlerin asfalt karışımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, %19 OP katkısının, yüksek sıcaklıklarda daha elastik bir katı gibi davrandığı ve tekerlek izi direnci, yorulma ve termal çatlak direncinde iyileşme sağladığı ve performans ve maliyet açısından özellikle %4 SBS modifiye bağlayıcısına alternatif olabileceği sonucuna varmıştır [21].

Gökalp vd. (2018), atık bitkisel yemeklik yağların (ABYY) saf bitüm özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu anlamda; 70/100 penetrasyon sınıfına ait bitüm içerisine, bitüm ağırlığınca %2, %4, %6, %8, %10 oranlarında ABYY ekleyerek 5 farklı değer için modifiye bitüm elde etmişlerdir. Dönel viskozite için ABYY oranı artıkça numunelerin viskoz değerlerinin düştüğü, akıcılıklarının arttığı gözlenmiştir. Bitüme ilave edilen ABYY miktarı artıkça, penetrasyon değerinde artış, yumuşama noktası, parlama noktası, uzama miktarı ve viskozite değerlerinde azalış meydana geldiğini tespit etmişlerdir [22].

Mc Cready ve Williams (2007) mısır ligninini %3, %6, %9 ve %12 oranlarında bitümlü bağlayıcılara ilave ederek bitümü modifiye etmişlerdir. Deney sonuçlarından lignin kullanımı ile yaşlanmanın azaldığı, tekerlek izi dayanımının arttığı ve düşük sıcaklık dayanımının değişmediği belirlenmiştir. Bu durum lignin kullanımının bitümlü kaplamalarda termal ve yorulma çatlakları gibi yaşlanma ve oksidasyonla ilgili bozulmaları azaltarak kaplamanın daha uzun süre hizmet vermesini sağlayacağı sonucuna ulaşmışlardır [23].

Zhao vd. (2014) çalışmalarında PG 64-22 performans dereceli saf bitüm ile katkı maddesi olarak dallı darı bitkisinin yavaş ve hızlı pirolizi sonucunda elde edilen biyoçar kullanılmış ve bitüm ağırlığınca %5, %10, %15 ve %20 oranlarında eklenerek modifiye bağlayıcıların performans özelliklerini araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda genel olarak biyoçar kullanımının viskoziteyi artırması sebebiyle bitümlü bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini azalttığı, bağlayıcının uzun dönem yaşlanmasında olumlu etki gösterdiği, tekerlek izi direnci açısından fayda sağladığı belirlenmiştir [24].

Zhao vd. (2014) tarafından yapılan benzer bir çalışmada dallı darı bitkisinden hızlı piroliz yöntemiyle elde edilen biyoçar, bitümlü bağlayıcıda ve karışımında modifiye amaçlı kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda biyoçar modifiyesinin bitümlü bağlayıcının tekerlek izi oluşumuna karşı direncini önemli oranda iyileştirdiği fakat yorulma çatlağı direncini çok az miktarda arttırdığı sonucu ortaya çıkmıştır. Modifiye bitümle hazırlanan sıcak karışımında tekerlek izi, nem hasarı ve çatlak ilerleyişinde daha iyi sonuç görüldüğü ortaya çıkmıştır [25].

Bostancıoğlu (2012) yapmış olduğu çalışmada fındık kabuğu artıklarından kimyasal aktivasyon yöntemi ile elde edilen aktif karbonun ve bitkisel atıkların asidik hidrolizi ile elde edilen furfuraldan üretilmiş furan reçinesinin bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Deney sonuçları hem aktif karbon hem de furan reçinesinin bitümün sertliğini artırdığını, sıcaklık hassasiyetini düşürdüğünü ve reolojik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Karışım deneylerinden elde edilen sonuçlara göre her iki katkı malzemesinin de karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı direncini arttırdığı ve tekrarlı yükler altında yorulma dayanımını geliştirdiği belirlenmiştir [26].

Atasağın (2009) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında çörekotu küspesinin pirolizinden elde edilen biyoyağı bitüm katkı maddesi olarak kullanmıştır. Çörekotu küspesi biyoyağı bitüme %3 ve %6 oranlarında ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan çörekotu küspesi biyoyağı kullanımının bitümlü bağlayıcının penetrasyon değerini arttırdığı, yumuşama noktası değerini ve bitümün yaşlanma etkilerini azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca, kullanılan katkı maddesinin, bitümün PG sınıfını PG 64-22'den PG 58-28 ve PG 52-28 olarak değiştirdiği sonucuna ulaşılmıştır [27].

Xue vd. (2014), çalışmalarında bitüm modifikasyonunda biyokütle külü olan pirinç kabuğu külü ve talaş külünü kullanmışlardır. 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 [28].

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. 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 [29].

Arabani ve Esmaeli çalışmalarında, toplam bitüm ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yer fıstığı kabuğu külünü modifiye edici olarak eklemişlerdir. Bitümlü bağlayıcıya yer fıstığı kabuğu külü ilavesinin ardından yumuşama noktası, viskozite ve tekerlek izi direncinde artış, penetrasyon değeri, süneklik, yorulma direnci ve düşük sıcaklıkta çatlama direncinde azalış gözlemlenmiştir. Ayrıca yer fıstığı kabuğu külü ile modifikasyonun bitüm karışımlarının mekanik performansını arttırdığı kanıtlanmıştır [30].

Aminbakhsh (2013) yaptığı çalışmada, şeker pancarı melası ve boroksit ile mela karışımını (MEBSA), bitümün ağırlığınca %1, 2, 3, 5, 7,5 ve 10 oranlarında bitümle karıştırarak modifiye bitüm numuneleri üretmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında, melas katkı maddesinin bitümü daha sünek bir hale getirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Melas ile modifiye edilen bitümlerde Marshall stabilitesinin saf bitüme göre az da olsa arttığı görülmektedir. MEBSA ile modifiye edilen bitüm numunelerinde ise viskozite ve yumuşama noktasında artış meydana gelirken düktilite değerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Şeker pancarı melası diğer katkı maddeleriyle kıyaslandığında yapılan fiyat analizlerine göre önemli miktarda maliyet düşüşü sağladığı görülmüştür [31].

Zorlu (2023) yaptığı çalışmada, atık kızartma yağı ve atık tarımsal külün (çam dal, çam kapak, kavak kapak, mısır sapı) bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkisini

incelemiştir. Çalışmada 70/100 penetrasyona sahip saf bitüme, ağırlığınca %0, %2, %4 oranlarında atık kızartma yağı ve ağırlığınca %0, %3, %6 oranlarında atık tarımsal kül ekleyerek modifiye bitüm numuneleri üretmiştir. 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 oluşturmuştur. Çalışma sonucunda; Atık kızartma yağı katkısının bitümün penetrasyon değerini artırdığı, atık tarımsal kül katkısının ise penetrasyon değerini düşürdüğü sonucuna ulaşmıştır. Marshall deneyi sonucunda atık kızartmalık yağ katkısının stabilite değerini düşürdüğü, kül katkısının ise stabilite değerini artırdığı sonucuna ulaşılmış; yağ ve kül katkısının akma değerlerinde ani bir artış ya da azalmaya sebep olmadığı görülmüştür [32].

Ertaş (2022), yaptığı çalışma kapsamında atık ceviz kabuğu tozunun bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. 50/70 penetrasyona sahip saf bitüme ağırlığınca %7, %10, %12, %15 ve %17 oranında atık ceviz kabuğu tozu ekleyerek modifiye bitüm numuneleri elde etmiş ve deneyler sonucunda, atık kuru ceviz kabuğu tozu katkı oranının artmasına bağlı olarak bitümün sertliğinin arttığı sonucuna varılmıştır. Saf bitüme göre atık ceviz kabuğu tozu katkılı bitümlü bağlayıcı numunelerinin yüksek sıcaklık (PG) sınıflarının arttığı gözlemlenmiştir. DSR sonuçları göz önüne alındığında da özellikle orta sıcaklıklarda yorulma çatlağını azaltmasının yanı sıra olumlu performanslar gösterdiği tespit edilmiştir [33].

2. BİTÜM MODİFİKASYONU

2.1 Bitüm

Bitüm, kimyasal olarak karmaşık bir yapıya sahip olmakla birlikte, kimyasal özellikleri bakımından öz kaynağı olan petrolün kimyasal özelliklerini yansıtmaktadır. Bitümün genel olarak kimyasal içeriği Tablo 2.1’de verilmiştir [34].

Tablo 2.1. Bitümün Kimyasal Bileşenleri [34]

Bitüm Bileşenleri	Bileşen Oranı (%)
Karbon	82-88
Hidrojen	8-11
Sülfür	1-6
Nitrojen	0,1
Oksijen	0-1,5
Metal	Eser miktarda

Kimyasal yapısı karmaşık olmasına karşın bitümü genel haliyle iki farklı kimyasal gruba ayırmak mümkündür. Bitümün n-heptan’da çözülen kısmına maltenler, çözünmeyen kısmına ise asfaltenler denir. Ayrıca maltenler de kendi aralarında doygunlar, aromatikler ve reçineler olmak üzere alt gruplara ayrılmaktadır [35, 36].

Asfaltenler, hidrojen ve karbondan oluşan, kahverengi veya siyah amorf katılardır. Bitüm içerisindeki asfalten miktarı arttığında bitümün de kıvamı artar. Bunun sonucunda yoğunluğu artan bitümün yumuşama noktası ve viskozite değerleri artarken penetrasyon değeri düşer [35].

Maltenlere bakıldığında;

Reçineler, koyu kahve renginde, katı ya da yarı katı kıvamda ve doğal elektriksel yüklere sahip olmasından dolayı bitümün üst düzeyde adezyona sahip olmasını sağlar [35].

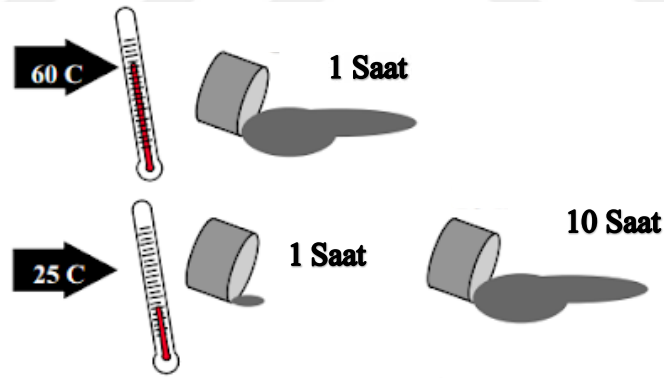
Aromatikler, bitümün %40 ila %60'ını oluşturur. Koyu kahve rengine, viskoz yağ şeklinde bir sıvı olup asfaltenlerin yayılımı için gereken ortamı oluştururlar [35].

Doygunlar ise bitümün %5 ila %20'sini oluşturur. Polar olmayan viskoz yağ olup saman rengi ya da beyaz renkli bir yapıya sahiptir [35].

Bitüm mühendislik özellikleri bakımından incelendiğinde visko-elastik bir davranış gösteren termo-plastik bir malzemedir [37, 38]. Trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığına bağlı olarak farklı davranışlar gösterir.

Bitümün gösterdiği davranış sıcaklık ve yükleme zamanına bağlıdır. Yani yük sabit tutulup uygulama süresi değiştiğinde bitümün de sergileyeceği davranış değişecektir.

Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi farklı sıcaklık ve süreye rağmen her iki örnek için de gösterdiği davranış sonuçta aynıdır. Bu da sıcaklık ile yükleme süresinin arasındaki ilişkinin benzer olduğunu göstermektedir.

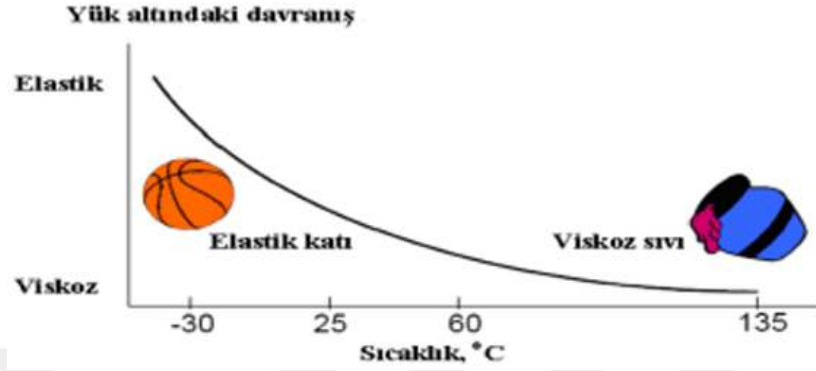


Şekil 2.1. Bitümün Farklı Sıcaklık ve Zamana Göre Değişimi [37]

Böyle malzemeler, hızlı taşıtlar gibi yüksek yükleme hızlarında elastik, yavaş ya da duran taşıtlar gibi düşük yükleme hızlarında viskoz, orta yükleme hızlarında ise orta elastik ve viskoz davranış gösterirler.

Benzer şekilde, düşük sıcaklıklarda elastik davranış ve yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklarda ise viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler (Şekil 2.2).

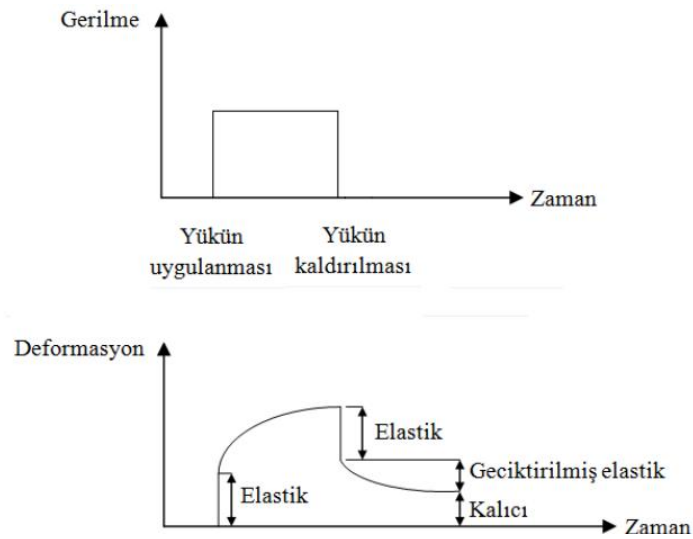
Bitümün bu reolojik özelliği bitümlü karışımların da visko-elastik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Bu sebeple yükleme süresi ve sıcaklık karışımın rijitliğine doğrudan etki ettiği sonucuna varılmaktadır [38].



Şekil 2.2. Bitümün Sıcaklıkla Değişimi [37]

Şekil 2.3'e bakıldığında bitümlü bağlayıcıların yük uygulanması sonucunda ani bir elastik davranış gösterdiği ve zaman içinde bitümlü bağlayıcılarda viskoz deformasyonlar oluştuğu görülmektedir.

Aynı şekilde yük uygulaması sonlandırıldığında ani elastikten dolayı deformasyonun yavaşça düzeldiği ve en sonunda azda olsa kalıcı bir deformasyon oluştuğu görülmektedir [39].



Şekil 2.3. Bitümlü Bağlayıcıda Zamana Bağlı Oluşan Gerilme ve Deformasyon [39]

2.2 Modifikasyon İşleminin Amaçları

Bitümlü kaplamalar ağır trafik yükleri ve değişken iklim koşullarına maruz kalmalarından dolayı, başlangıçtaki özelliklerini yitirip servis ömürlerinden daha kısa sürede bozulmaya başlamaktadır. Bitümlü kaplamalarda oluşan bozulmalar hem sürüş konforunu hem de sürüş güvenliğini olumsuz yönde etkilemektedir [1].

Bu tür bozulma nedenlerini ortadan kaldırmak ve bitümlü kaplamaların servis ömrünü uzatmak için bitümlü bağlayıcılara farklı katkı malzemeleri ekleyip bitümlü bağlayıcıları modifiye etme çalışmaları yapılmıştır [6].

Bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesindeki amaçlar;

- Esnekliği düşük sıcaklıklarda arttırarak kırılmaları azaltmak,
- Tekerlek izini azaltmak,
- Bitümün yaşlanma sürecini uzatmak,
- Bitüm maliyetinin azaltılmasına yardımcı olmak,
- İlk günlük sürüş konforunu daha uzun süre devam ettirebilmek,
- Kaplamanın servis ömrünü uzatabilmek,
- Agregat ve bitüm arasında oksidasyona karşı mukavemeti arttırmak,
- Yorulma mukavemetini arttırmak,
- Bitümün reolojik özelliklerini iyileştirmek,
- Kırılma ve kalıcı deformasyonların mukavemetini arttırmak,
- Bitümün sıcaklık duyarlılığını azaltmak,
- Yumuşama noktasını yükseltmek,
- Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde ederek çatlakları minimuma indirmek,
- Karışımların işlenebilirliğini ve dayanımlarını arttırmak,
- Günlük veya mevsimsel sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılığı azaltmak şeklinde sıralanabilir [1, 6, 35, 40].

2.3. Modifikasyonda Kullanılacak Malzemelerde Aranacak Özellikler

Bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesi için farklı yapı ve özelliklere sahip birçok katkı maddesi kullanılmaktadır.

Kullanılan katkı maddelerinin bazı koşulları sağlaması gerekmektedir. Bu koşullar;

- Bitümlü bağlayıcının özelliklerini iyileştirmesi ve bitümün sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleri koruması,
- Kolay erişilebilir ve ekonomik olarak elde edilmesi,
- Bitümlü bağlayıcı ile homojen bir bağ oluşturması,
- Modifiye edilmiş bitümlü sıcak karışımların uygulama esnasında şartname sıcaklık değerlerinde kendisinden beklenen özellikleri kaybetmemesi ve aynı zamanda işlenebilir olması,
- Kullanılacak olan malzemenin yüksek sıcaklıklarda akma mukavemetini düşürmemesi, düşük sıcaklıklarda ise bitümün sert ya da kırılgan olmasını engellemesi,
- Bitümün hazırlandığı sıcaklıklarda etkisini yitirmemesi şeklinde sıralanabilir [1, 6, 31].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Bitüm

Deneyisel çalışmalarda, İzmir Aliğa Tüpraş Rafinerisinden temin edilmiş, 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitüm (Şekil 3.1) kullanılmıştır. Saf bitüme ait geleneksel deney sonuçları Tablo 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Bitüm

Tablo 3.1. Saf Bitüme Ait Deney Sonuçları

DENEY ADI	SONUÇ
Penetrasyon	60
Yumuşama Noktası (°C)	49,80
Vizkozite (135 °C) (cP)	462,50
Vizkozite (165 °C) (cP)	200

3.1.2. Pirina

Zeytin ağacı ve ürünlerinin ekonomide büyük bir payı vardır. Zeytinyağı üretimi sonucu ana ürün olan yağ ile beraber, pirina ve karasu gibi yan ürünlerde ortaya çıkmaktadır. Zeytinin işlenmesi sonucu %20 zeytin yağı, %40 karasu ve %40 pirina elde edilir [41].

Ülkemizde zeytinyağı üretimi günden güne artış göstermektedir. Ülkemiz, 1.800.000 ton zeytin üretimi ile dünyada zeytin üretiminde 4. sıradadır. Bu üretimin yaklaşık %75'i zeytinyağı üretiminde değerlendirildiği ve zeytinyağı üretiminden %35-45 oranında pirina elde edildiği göz önüne alınırsa ülkemizde yıllık 472.500-540.000ton pirina elde edilmektedir [41].

Gelişen ve büyüyen dünyada arz talep dengesini korumak için ana ürünler kadar yan ürünlerinde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Genel haliyle bakıldığında pirina, zeytinyağı üretimi sonrasında çekirdek, kabuk ve posadan oluşan bir yan üründür (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Pirina Gösterimi

Elde edilen pirinaların bir kısmı kalıplanarak satılmakta, geriye kalan büyük çoğunluğu da doğaya atılmakta ve çevre sorunu haline gelmektedir [19].

Bitkisel atık malzemesi olan pirina, büyükbaş yemi, gübre, yakıt, bitüm katkı maddesi vb. pek çok alanda kullanılarak değerlendirilmeye çalışılmaktadır [42].

3.1.3. Aloe Vera

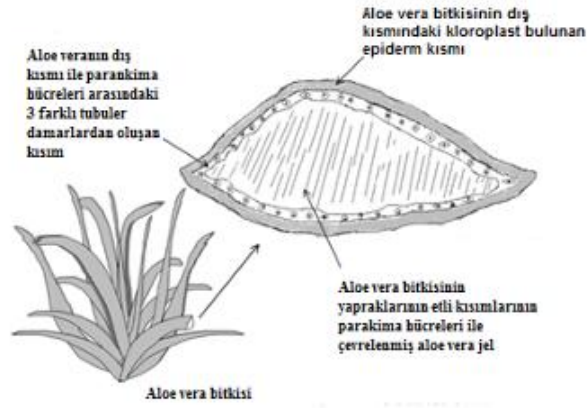
Aloe vera, sıcak ve kuru iklimlerde yetişen kaktüs benzeri bir bitkidir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Aloe Vera Görünümü

Şekil 3.4'te Aloe vera'nın katmanları gösterilmiştir. Bunlar;

1. İç kısım tabakasında şeffaf jel içerisinde %99 oranında su, geri kalanında ise glukomannan, aminoasit, yağ, stereol ve vitaminleri içerir.
2. Orta tabaka lateks acı sarı özü, antrakinin ve glikozidleri içermektedir.
3. Dış tabaka koruyucu fonksiyondadır, içerisinde 15-20 hücre bulunur. Karbonhidrat ile protein sentezi görevi bulunmaktadır. Kabuk kısmının içinde damarsal lifler bulunmaktadır. Bu lifler su ve nişasta gibi maddelerin taşınmasında görev alırlar [43, 44].



Şekil 3.4. Aloe Vera Bitkisinin Katmanlarının Gösterimi [45]

Tablo 3.2'de Aloe vera'nın aktif bileşenleri ve özellikleri gösterilmektedir. Aloe vera jelinin pH aralığı 4,4-4,7 arasındadır ve %90-99 oranında su içermektedir [45].

Tablo 3.2. Aloe Vera Jelini Oluşturan Bileşenler [46]

Aktif Bileşenler	Aktif Bileşenlerin Aloe Vera'daki Özellikleri
Vitaminler	A (beta-karoten), C ve E vitaminleri ve antioksidan içerir. Antioksidanlar, serbest radikalleri nötrleyerek vücudu korur.
Enzimler	Alkali fosfat, amilaz, oksidaz, bradykinaz, karboksipeptidaz, katalaz, selülaz, lipaz, peroksidad, siklooksijenaz. Bradykinaz deride lokal olarak uygulandığı zaman fazla enflamasyonu azaltmaya yardım ederken, diğer enzimler ise şekerlerin, proteinlerin ve yağların yıkımına yardımcı olur.
Mineraller	Kalsiyum, selenyum, bakır, krom, magnezyum, potasyum, sodyum ve çinko içerir. Minerallerin bazıları antioksidanlar olarak hareketi ve farklı metabolik yollar içinde çeşitli enzim sisteminin asıl işlevi için gereklidir.
Şekerler	Monosakkaritler (glikoz ve fruktoz) ve polisakkaritlerdir (glikomannan ve polimannoz). En çok öne çıkan monosakkaritler mamnoz-6-fosfat'tır ve en sık kullanılan polisakkarit glikomannoz olarak adlandırılır. Önemli bir glikomannan olan Acemannan bulunmuştur. Son zamanlarda bir glikoprotein anti-alerjik özelliklerle (alprogen ve yeni geliştirilen anti-enflamatuar bileşen olarak adlandırılır) C-glukosilkromon, Aloe vera jelden izole edildi.
Organik Asitler	Sorbat, salisilik asit ve ürik asittir. Salisilik asit, anti-enflamatuar ve antibakteriyel özelliklere sahiptir.

Antrakinolar	Aloin, barbaloin, izobarbaloin, aloetik asit, aloe-emodin, sinamik asittin esteri, resistanol, krizofanik asit ve emodin, bileşenleridir. Laksatif olarak görevi vardır. Aloin ve emodin ağrı kesici, antibakteriyel ve antiviral olarak görevi vardır.
Yağ asidi ve Steroidler	Kolestrol, kampesterol, β -sisosterol ve lupeol steroidlerini içermektedir. Araşidonik asit ve γ -linoleik asit gibi yağ asitlerini içermektedir. Tüm bunlar ayrıca anti-enflamatuar etki ve lupeol, anriseptik ve ağrı kesici özelliklere sahiptir.
Non-esansiyal Aminoasitler	Histidin, arjinin, aspartik asit, prolin, glisin, tirozin, alanin ve hidroksiprolin non-esansiyal aminoasitlerdir.
Esansiyal Aminoasitler	Metiyolin, fenilalalin, izolesin, valin, treonin ve lizin esansiyal aminoasitlerdir.
Hormonlar	Oksin ve gliberelin hormonlardır. Yara iyileşmesine yardım eder ve anti-enflamatuar etkiye sahiptir.
Diğer	Lignin, bir inert madde, topikal prepasyon içerdiğinden deri içindeki diğer bileşenlerin penetrative etkisini artırır. Saponinler, jelin %3'ünü oluşturan sabunlu maddelerdir ve temizleme, antiseptik özelliğe sahiptir.

Çalışmalar topikal olarak deriye uygulandığında Aloe vera jelinin ciltteki kolajen üretimini arttırdığını göstermektedir. Kozmetik ve tıbbi amaçlar için kullanılan Aloe vera bitkisinin gençleştirici, onarıcı ve iyileştirici etkileri göz önünde bulundurularak bitüm üzerinde de benzer sonuçlar alınabileceği düşünülerek bu çalışmada Aloe vera Jelinin bitüm özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

3.1.4 Agrega

Çalışmalarda kullanılan agregalar Manisa'da bulunan Mıcırtaş İnşaat Mad. Taah. Tic. A.Ş.'den temin edilmiştir. Çalışma için hazırlanan numuneler aşınma tabakasına uygun olacak şekilde, en büyük agrega tane boyutu 19 mm (KTŞ, 2006) olarak belirlenmiştir. Tablo 3.3'te agrega özellikleri göstermiştir.

Tablo 3.3. Agregada Özellikleri

Agregada Boyutu	Özellikleri	Standart	Değer
0,075 – 4,75 mm	Özgöl Ağırlık (kg/cm ³)	TS EN 1097-6	2,65 – 2,64
	Doymuş Özgöl Ağırlık		2,68
	Su Emme Oranı (%)		0,90
4,75 – 12,5 mm	Özgöl Ağırlık (kg/cm ³)	TS EN 1097-6	2,75
	Doymuş Özgöl Ağırlık		2,69
	Su Emme Oranı (%)		0,34

Taş ocağından karışık şekilde alınan agregaya, Şekil 3.5'te gösterildiği şekilde eleme işlemi yapılmıştır. Elek analizi sonrasında agreganın tane boyutlarına göre ayrılmış hali Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Elek Analizi



Şekil 3.6. Tane Boyutlarına Göre Ayrılmış Agrega

3.2. Yöntemler

3.2.1 Modifiye Bitüm Numunelerinin Hazırlanması

Literatürdeki benzer çalışmalara ait karıştırma verileri Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tabloda verilen çalışmaların sonuçları incelendiğinde karıştırma süresi ve karıştırma hızı arttığında üretilen numunelerin penetrasyon değerinin düştüğü ve yumuşama noktası değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Zorlu (2023) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, karışım sıcaklığı 170°C’den 190°C’ye arttıkça penetrasyon değerinde azalma, yumuşama noktası değerinde ise artış gözlemlenmiştir [32].

Deney sonuçlarına göre, daha yüksek sıcaklık ve karıştırma hızı ile uzun karışım sürelerinin bitümün özellikleri üzerinde belirgin bir değişime sebep olduğu, bitüm üzerinde kısa dönem yaşlanmaya benzer sonuçlar vererek penetrasyon değerini düşürdüğü ve yumuşama noktası değerini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 3.4. Literatürdeki Benzer Çalışmalara Ait Karıştırma Verileri

Referans	Bitüm Sınıfı	Modifiyer Cinsi	Modifiyer Oranı (%)	Karıştırma Süresi (Dk)	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Hızı (rpm)
Gülşah Öz Kıcı [1, 17]	AC 50/70	Pirina Külü	2 – 4 – 6 – 8 – 10	120	160	4000
Semih İssi [18]	B 160/200	Pirina	5 – 10 – 15 – 20	60	150	1000
Feyzullah Özel [21]	B 50/70	Pirina SBS	4 – 8 – 15 – 19 – 25 – 30	60	170	1000
Melek Rukiye Şehnaz Tıraş [19]	50/70	Pirina Yağı	1 – 2 – 4 – 8	120	160	600
Sina Aminbakhsh [31]	50/70	Şeker Pancarı Melası	1 – 2 – 3 – 5 – 7,5 – 10	15	120	1300
Elif Zorlu [32]	70/100	Kızartma Yağı	2 – 4	10 – 20 – 30	170 – 180 – 190	3000
		Atık Tarımsal Kül	3 – 6			
Neslihan Atasağun [27]	50/70	Çörekotu Küspesi	3 – 6	5	125 ± 5	-
Tekin Ertaş [33]	50/70	Ceviz Kabuğu Tozu	7 – 10 – 12 – 15 – 17	-	-	-
Engin Yener [20]	70/100	Pirina	1 – 3 – 5	15	150	800

Literatürdeki çalışmalar ve sonuçları göz önünde bulundurularak bitümün modifiye edilmesinde Tablo 3.5’te verilen değerler kullanılmıştır.

Tablo 3.5. Modifiye Bitüm Numunelerinin Hazırlanmasında Kullanılan Karıştırma Verileri

Bitüm Sınıfı	50 / 70
Modifiyer Oranı (%)	2 – 4 – 6 – 8 – 10
Karıştırma Süresi (dk)	60
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	160
Karıştırma Hızı (rpm)	1000

Karışım verilerine karar verildikten sonra modifiyerler hazırlanmıştır. Bunun için pirina 200 nolu elekten geçirilmiştir (Şekil 3.7) ve Aloe vera bitkisinin de içindeki jeli spatula yardımı ile çıkarılarak bitüm içerisinde daha kolay şekilde karışması için küçük parçalara ayrılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. No 200 Elekten Geçirilmiş Pirina



Şekil 3.8. Aloe Vera Jeli

Ön hazırlıklar tamamlandıktan sonra, öncelikle saf bitüm işlenebilir hale getirilinceye kadar etüvde ısıtılmıştır.

Bitüm ısınırken karıştırma cihazının da haznesi ısıtmaya başlanmıştır. Karıştırma cihazı ve ekipmanlarının görseli Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

Isıtma işleminden sonra 600 ml hacimli cam kaplara 400 gr saf bitüm ilave edilmiştir ve cam kap içindeki saf bitüm karıştırma cihazına yerleştirilmiştir.

Karıştırma işlemi için dört kollu mekanik karıştırıcı kullanılmış ve karışım ısısını ayarlamak için karıştırıcının altında ısıtıcı tabla kullanılmıştır.

Modifiyer ürünün tamamı bitüme eklendikten sonra bitüm sıcaklığının 160°C’ye kadar çıkması beklenmiştir. Sıcaklık istenilen değere geldikten sonra karıştırma hızı 1000 rpm’ye çıkarılmış ve 60 dk boyunca karıştırma işlemi devam etmiştir.

Sürenin sonunda modifiye bitüm numuneleri hazır hale gelmiştir. Karıştırma işlemi her modifiyer ve yüzde oranı için aynı şekilde tekrar edilmiştir.



Şekil 3.9. Karıştırma Cihazı ve Ekipmanları

Seçilen modifiyer cinsi ve karıştırma oranlarına göre oluşturulan modifiye bitüm örnekleri kısaltılmış gösterimi ile Tablo 3.6’da gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Karıştırma Verilene Göre Oluşan Modifiye Bitüm Numuneleri

Numune No	Modifiyer Cinsi	Modifiyer Oranı (%)	Modifiye Bitüm Numune Adı
1	Saf Bitüm	0	B
2	Pirina	2	PB ₂
3	Pirina	4	PB ₄
4	Pirina	6	PB ₆
5	Pirina	8	PB ₈
6	Pirina	10	PB ₁₀
7	Aloe Vera	2	AB ₂
8	Aloe Vera	4	AB ₄
9	Aloe Vera	6	AB ₆
10	Aloe Vera	8	AB ₈
11	Aloe Vera	10	AB ₁₀

Karıştırma işlemi sonunda, pirina ve bitümün kimyasal reaksiyona girmediği, fiziksel olarak homojen bir şekilde karıştığı ancak, Aloe vera jeli ve bitümün reaksiyona girdiği, Aloe vera jelinin sıcak bitüm ile teması sonucunda bitümde köpürme ve patlama etkisi olduğu, jel ve bitümün homojen bir şekilde karışmadığı ve Aloe vera jelinin tortu halinde bitüm içinde kaldığı gözlemlenmiştir.

3.2.2. Geleneksel Bitüm Deneyleri

3.2.2.1 Penetrasyon Deneyi

Penetrasyon deneyi bitümün sertlik derecesini yani kıvamını belirlemek için yapılan bir deneydir.

Penetrasyon değeri, 100 gr ağırlığındaki bir iğnenin 25°C sıcaklıkta, 5 saniye boyunca bitüm içerisinde battığı düşey mesafe olarak tanımlanır. Deney birimi 10^{-1} mm'dir. Penetrasyon değeri ile bitüm kıvamı ters orantılıdır. Penetrasyon değeri arttıkça bitümün kıvamı azalır ve daha yumuşak ve akışkan hale geçer. Aynı şekilde penetrasyon değeri azaldıkça bitümün kıvamı artar ve bitüm sertleşir [18]. Penetrasyon deneyinde kullanılan cihaz ve ekipmanlar Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Penetrasyon Cihazı ve Ekipmanları

Deneyin yapılışı;

Yeterli miktarda (en az 100 gr) bitüm numunesi, ortalama 160°C'de, önceden ısıtılmış etüvde akışkan hale gelene kadar ısıtılır.

Akışkan hale gelen bitüm penetrasyon kabına aktarılır ve oda sıcaklığında soğuması için 1-1,5 saat bekletilir.

Soğuyan bitüm numunesi 25°C sabit sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilir.

Numuneler oda sıcaklığında bekletildiği süre kadar su banyosu içerisinde de bekletilir. Süre sonunda penetrasyon ölçümüne geçilir.

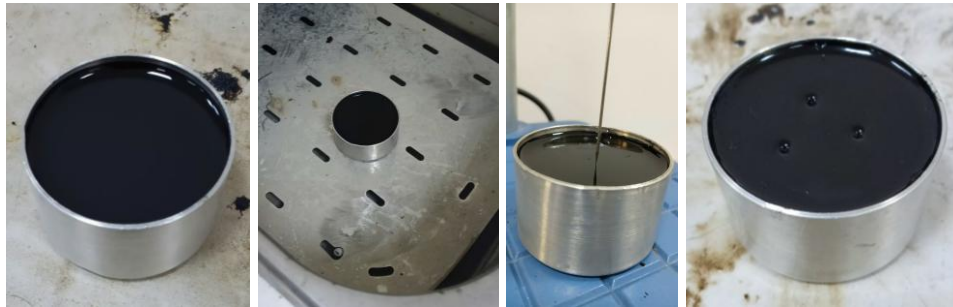
25 °C sıcaklığı muhafaza edebilmek için numune, penetrasyon cihazına su dolu beher ile taşınarak yerleştirilir.

Penetrasyon iğnesi kontrollü şekilde düşey yönde hareket ettirilerek iğnenin ucu, bitüm numunesinin üst yüzeyine temas etmeyecek şekilde yakınlaştırılır.

Daha sonrasında cihaz sıfırlanarak penetrasyon iğnesi 100 gr ağırlık altında 5 sn. boyunca serbest düşüşe maruz bırakılır. Bu işlem 3 kere tekrar edilir ve her işlem sonrasında okunan penetrasyon değeri not edilir.

Okumalar 3 farklı noktada eşkenar bir üçgen oluşturacak şekilde yapılır. Okunan sonuçların ortalaması alınır. Elde edilen ortalama değer o numunenin penetrasyon değeridir [1, 19, 31, 47].

Deney aşamaları Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Penetrasyon Deneyi Aşamaları

Penetrasyon deneyinde yapılan okumalar arasındaki farklar, sahip oldukları penetrasyon değerleri sınırları içinde geçerli olup, Tablo 3.7’deki maksimum aralık değerini aşmamalıdır. Aksi takdirde, deney tekrarlanmalıdır [40].

Tablo 3.7. Penetrasyon Okumaları Arası Maksimum Fark Değerleri [40]

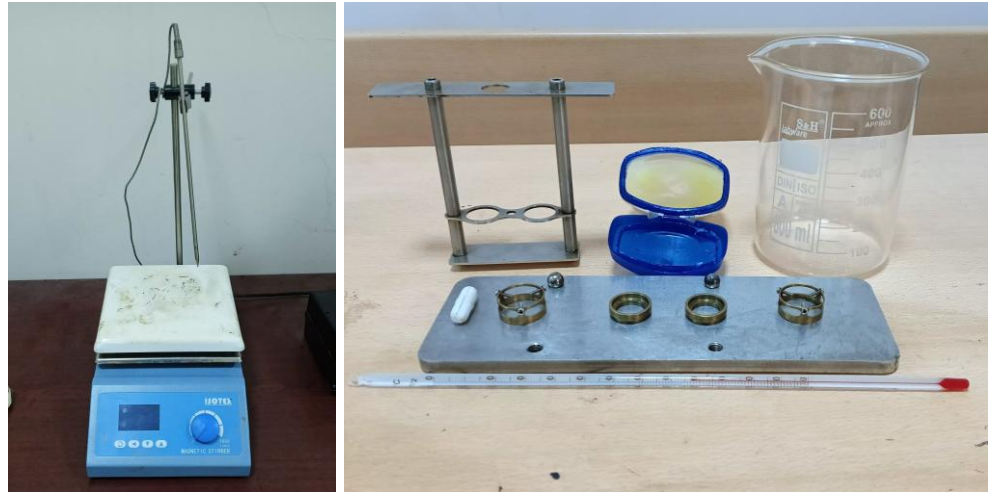
Penetrasyon Aralığı	≤ 49	50 – 149	150 – 249	≥ 250
Aradaki Maksimum Değer Farkı	2	4	6	8

3.2.2.2 Yumuşama Noktası Tayin Deneyi

Yumuşama noktası deneyi, bitümün yumuşamaya başladığı andaki sıcaklığının tespit edilmesi için yapılan bir kıvam tayini deneyidir. Deneyde; bitümle doldurulmuş olan iki halka, deney düzeneğine yerleştirilir ve bu halkalar üzerine birer adet çelik bilye koyulur. Deney için başlangıç sıcaklığı 5°C'dir ve sıcaklık dakikada 5°C arttırılır. Bitüm üzerindeki çelik bilyeler düzenek tabanına değdiği andaki sıcaklıkların ortalaması yumuşama noktası sıcaklık değerini vermektedir.

Bu değer eğer bitüm sert ve kıvamlı ise yüksek; yumuşak ve kıvamı az ise düşük olacaktır.

Yumuşama noktası deneyinde kullanılan cihaz ve ekipmanlar Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Yumuşama Noktası Deneyi Cihaz ve Ekipmanları

Deneyin yapılışı;

Bitüm numunesi akışkan hale gelene kadar etüv içerisinde ısıtılır.

Deney numunelerinin bekletileceği çelik sehpa, ince bir tabaka olacak şekilde vazelinle yağlanır. Bu işlem çelik tabla ile bitüm arasındaki sürtünmeyi ortadan kaldırmak amacıyla yapılır.

Yağlanan çelik tablaya deney yüzükleri yerleştirilir.

Akışkan hale gelen bitüm numunesi yüzüklerin içerisine doldurulur ve 30 dk boyunca oda sıcaklığında bekletilir. Döküm sırasında oluşan bitüm fazlalıkları ısıtılmış mala vb. bir alet yardımıyla alınır.

Deney için hazır hale gelen yüzükler deney aparatına yerleştirilir. Yüzüklerin üzerine deney halkaları takılır ve numune üzerine gelecek şekilde halkaların içine çelik bilyeler yerleştirilir

Hazırlanan düzenek, başlangıç sıcaklığı 5°C su dolu behere yerleştirilir ve 15 dk boyunca 5°C sabit sıcaklıktaki su içerisinde bekletilir.

Su sıcaklığı devamlı olarak termometre ile kontrol edilir. Su sıcaklığını sabit tutabilmek için zaman zaman buz ilavesi yapılabilir.

15 dk sonunda beher ısıtıcı cihaza yerleştirilir. Sıcaklığın homojen dağılabilmesi için beher içerisine karıştırıcı balık yerleştirilir.

Deney sıcaklığı dakikada 5°C arttırılır. Sıcaklığın artmasıyla bitüm üzerindeki çelik bilyeler, bitüm içinden geçerek akmaya başlar.

Bilyelerin düzeneğin tabanındaki levhaya değdiği andaki sıcaklık okunarak kaydedilir [18, 19].

Deney aşamaları şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Yumuşama Noktası Deney Aşamaları

Okunan iki değer arasındaki fark 1°C 'nin üzerinde olmamalıdır. Okunan sıcaklık değerlerinin ortalaması alınır. Elde edilen değer bitüm numunesinin yumuşama noktası değeridir [18, 19].

3.2.2.3. Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi (RTFOT)

Bitümün çevresel etkilere maruz kalması bitüm bünyesinde değişimlere neden olur. Bitümde meydana gelen bu değişimler yaşlanma olarak ifade edilir.

RTFOT deneyi, düşey ekseninde dönen, her biri 35 gr bitüm içeren 8 numunenin 163°C’de, 15 dev/dk dönme hızında, 85 dk boyunca ısıtma işlemine tabi tutularak yaşlandırılmasıdır. Bu deney bitümlü bağlayıcının kısa dönem yaşlanma ve sertleşmesini laboratuvar koşullarında uyarlayıp fikir sahibi olmayı sağlamaktır [19].

RTFOT denetinde kullanılan cihaz ve ekipmanlar şekil 3.14’te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. RTFOT Deney Cihazı ve Ekipmanları

Deneyin Yapılışı;

Deney fırını, 163°C’ye ayarlanır ve çalıştırılır.

Deney kapları tartılır ve her birinin ağırlığı not edilir.

Bitüm numunesi etüvde ısıtılır.

Akışkan hale gelen bitüm, deney kaplarına 35± 0.5 gr. olacak şekilde dökülür.

Bitüm dolu kaplar tartılır ve hemen yan yatırılarak bitümün yüzeylere dağılması sağlanır

Bitüm dolu kaplar bu şekilde 60 dakika boyunca oda sıcaklığında soğumaya bırakılır.

Soğumuş olan numune kapları RTFOT deney fırınındaki düşey ekseninde bulunan bölmelere yerleştirilir.

Numuneler yerleştirildikten sonra fırın kapağı kapatılır ve fırın içine kompresör yardımı ile 4000 ± 200 ml /dk olacak biçimde sıcak hava verilir

Deney fırını 163°C 'de, 85 dk boyunca bu şartlar altında çalıştırılır. Eğer ilk 15 dakikada fırın sıcaklığı $163 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 'ye gelmezse deney sonlandırılır [19].

Deneye aşamaları şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15. RTFOT Deney Aşamaları

Süre sonunda kaplar fırından çıkarılır ve tartılarak kütle kaybı aşağıdaki Formül-1 ile hesaplanır.

Numuneler tartıldıktan sonra geleneksel bitüm deneylerinde kullanılmak için başka bir kaba aktarılır.

$$\% \text{Kütle Kaybı} = \frac{(M_1 - M_0) - (M_2 - M_0)}{M_1 - M_0} * 100 \quad (1)$$

M_1 : Yaşlandırma öncesi bitüm + boş kap ağırlığı

M_2 : Yaşlandırma sonrası bitüm + boş kap ağırlığı

M_0 : Boş kap ağırlığı [19]

3.2.2.4. Penetrasyon İndeksi ve Kalıcı Penetrasyon Değeri Hesabı

Deneyler sonucunda elde edilen penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri kullanılarak Formül-2 yardımıyla penetrasyon indeksi, yaşlandırma öncesi ve sonrası elde edilen penetrasyon sonuçları kullanılarak da Formül-3 yardımıyla kalıcı penetrasyon değeri hesaplanır.

$$\text{Penetrasyon İndeksi: } PI = \frac{20-500 \cdot A}{1+50 \cdot A}, A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (2)$$

P_{25} : Bitümün 25 °C'deki penetrasyon değeri

T_{YN} : Bitümün yumuşama noktası değeri

$$\text{Kalıcı Penetrasyon (\%)} = \frac{\text{Yaşlanmış Numunenin Penetrasyon Değeri}}{\text{Yaşlanmamış Numunenin Penetrasyon Değeri}} * 100 \quad (3)$$

3.2.2.5. Brookfield Dönel Viskozite Deneyi

Bitümün sıcaklık etkisine bağlı olarak reolojik özelliklerinde değişiklikler olmaktadır. Bu deney, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık altındaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır

Dönel viskozite deneyi için Brookfield Viskozimetre cihazı kullanılmaktadır ve ölçüm sıcaklıkları 135°C ve 165°C'dir. Dönel viskozite deneyinde 135°C' deki viskozite değerinin 3000 cP'yi geçmemesi istenmektedir [48].

Dönel viskozite deneyine ait cihaz ve ekipmanlar şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Brookfield Viskozite Deney Cihazı ve Ekipmanları

Deneyin yapılışı;

Bitüm, etüvde ısıtılır ve işlenebilir hale gelmesi sağlanır.

Bitüm ısındıktan sonra deney tüpüne ortalama 11gr bitüm konulur.

Deney tüpü, 135°C'deki sıcaklık kontrollü termosel içerisine yerleştirilir.

Cihaza Autozero işlemi yapılır ve bu işlemden sonra spindle bitüm içerisine dengeli olarak yerleştirilir.

Hazne sıcaklığının eşitlenmesi için deney tüpü hazne içerisinde 135°C'de 15 dk bekletilir.

15 dk'nın sonunda deney başlatılarak bitümün içine daldırılan silindirik milin devamlı 20 rpm hızla dönmesi sağlanır.

Deney 30 dk boyunca devam eder ve deney boyunca 1 dk ara ile okuma gerçekleştirilir.

3 okuma kaydedilir ve ortalaması alınır.

Deney sonunda ekipmanlar temizlenerek 2. Deney için hazır hale getirilir.

165 °C içinde aynı işlemler sırasıyla tekrar edilir [18, 19].

Deney aşamaları şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Brookfield Dönel Viskozite Deney Aşamaları

3.2.3. Marshall Tasarım Deneyi

Marshall tasarım deneyinde kullanılan cihaz ve ekipmanlar Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20, Şekil 3.21, Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24, Şekil 3.25, Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Bitüm Etüvü



Şekil 3.19 Agregat Etüvü



Şekil 3.20. Hassas Terazı



Şekil 3.21. Arşimet Terazisi



Şekil 3.22. Kumpas



Şekil 3.23. Kriko



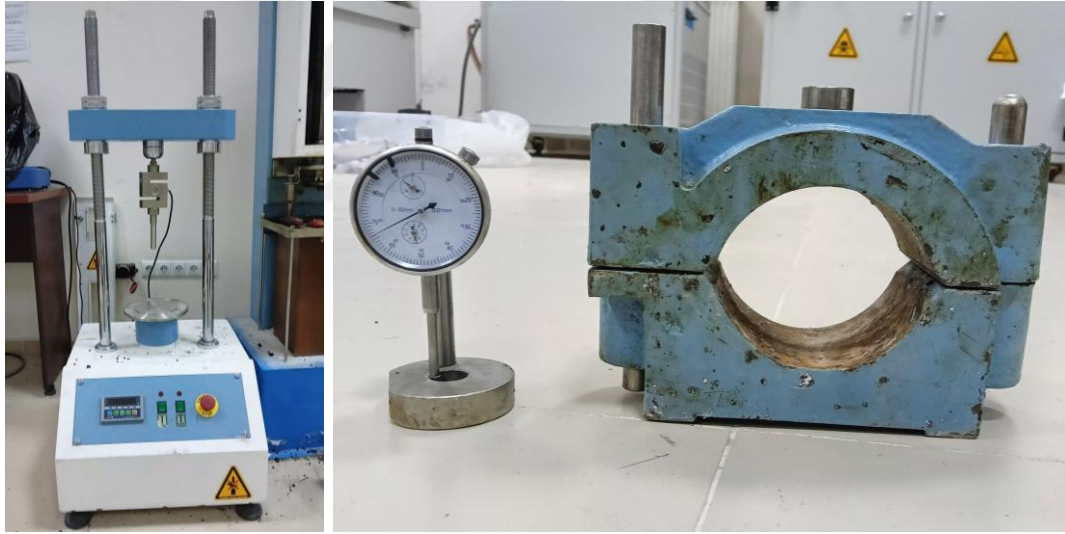
Şekil 3.24. Karışım Mikser Cihazı ve Ekipmanları



Şekil 3.25. Marshall Kalıpları



Şekil 3.26 Marshall Tokmağı



Şekil 3.27. Marshall Stabilite Cihazı ve Ekipmanları

Marshall stabilite deneylerinde kullanılan bitümün tasarım kriterleri Tablo 3.8’de verilmiştir. Marshall tasarım deneyinde Aşınma Tabakası Tip-1 kriterleri kullanılmıştır.

Tablo 3.8. Bitümlü Sıcak Karışım Tasarım Kriterleri [41]

Özellikler	Binder		Aşınma TİP-1 ve TİP-2		Deney Standartı
	Min.	Maks.	Min.	Maks.	
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	75		75		TS EN 12697-30
Marshall Stabilitesi (kg)	750	-	900	-	TS EN 12697-34
Boşluk Oranı (%)	4	6	3	5	TS EN 12697-8
Bitüm Dolu Boşluk Oranı (%)	60	75	65	75	TS EN 12697-8
Agregalar Arası Boşluk Oranı (V_{MA}) (%)	13	15	14	16	TS EN 12697-8
Akma (mm)	2	4	2	4	TS EN 12697-34
Filler / Bitüm Oranı	-	1,4	-	1,5	
Bitüm Oranı (Agrega Ağırlığının %'si)	3,5	6,5	4	7	TS EN 12697-1

3.2.3.1. Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi

Optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi için sırasıyla, agregaya ağırlığının yüzdece %3,5, %4,0, %4,5, %5,0, %5,5, %6,0 ve %6,5 oranlarında bitüm eklenerek her bir bitüm yüzdesi için üçer adet Marshall numunesi hazırlanır.

Hazırlanan numunelerin yükseklikleri, havadaki kuru ağırlıkları (W_{kuru}), sudaki ağırlıkları (W_{suda}), havadaki doymuş ağırlıkları ($W_{doymuş}$), agrega karışımın

ölgül ağırlıkları (G_t), numunelerin pratik ölgül ağırlıkları (D_p) her numune için ölgölerek hesaplanır ve bitüm dolu boşluk oranları (V_{FA}), boşluk oranları (V_h) ve agregalar arasındaki boşluk oranları (V_{MA}) tespit edilir.

Optimum bitüm yüzdesi belirlenirken, genellikle boşluk değeri göz önünde bulundurulur. Bu değeri aşınma tabakası için %4 boşluk oranı olarak belirlenmiştir [40].

Belirlenen optimum bitüm oranına göre Marshall tasarım numuneleri hazırlanır.

3.2.3.2. Marshall Tasarım Deney Numunelerin Hazırlanması

Granülometrik şartlara uygun 1150 gr kırma taş agregası karışımı hazırlanır.

Hazırlanan agregası numunesi 160°C'ye ayarlanmış etüve bir gün önceden konularak ısıtılır.

Karıştırma işleminden 3 saat önce bitüm 160°C'de ısıtılır.

Deney esnasında ısı kaybı olmaması için kullanılacak olan kalıp, şişleme çubuğu, kürek, mikser gibi aletler 10 dk boyunca 160°C etüvde bekletilir

Etüvden çıkarılan agregası karışımı kabına aktarılır ve üzerine agregası ağırlığının yüzdesince, belirlenen miktarda (optimum bitüm oranı) bitüm ilave edilir.

Agregası ve bitüm mikserde 1,5-2 dk süre ile karıştırılır

Numune karıştırıldığı sırada 10 saniyelik kısımda numune kalıpları etüvden çıkarılır ve ince film halinde yağlanır. Kalıp tabanına kalıba uygun boyutta dairesel kesilmiş yağlı veya geçirimsiz kâğıt yerleştirilir ve karışımı kalıba aktarılır. Numunenin üzerine tekrar geçirimsiz kâğıt konulur ve sıkıştırma işlemi için numune düzeneği Marshall tokmağına yerleştirilir.

4536 gr ağırlığındaki silindirik tokmağın 45,7 cm yükseklikten malzeme üzerine serbest düşmesi ile sıkıştırma işlemini gerçekleştirir. Her iki yüzeye de sırasıyla 75 defa olmak üzere toplamda 150 vuruş yapılır.

Tokmaktan çıkarılan numunelerin alt ve üst yüzeylerindeki kâğıtlar çıkarıldıktan sonra soğuması için uygun bir yüzey üzerine bırakılır ve bir gün boyunca oda sıcaklığında bekletilir.

Aynı işlemler sırasıyla tekrarlanarak 3 adet numune hazırlanır.

Numuneler, soğuduktan sonra bir kriko yardımıyla kalıptan çıkarılır.

Kalıptan çıkarılan numuneler, üzerlerine tebeşir ile yazılarak belirli bir sistematiğe numaralandırılır.

Her bir numunenin kumpas yardımıyla 120 derece açı ile 3 ayrı noktasından yükseklikleri ölçülür.

Deney için standart numune yüksekliği 63,5 mm kabul edilir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için ise stabilite düzeltme katsayıları aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır [35, 49].

$$c = 5,24 \times e^{(0,058 \times h)} \quad (4)$$

Denklemdeki “c” düzeltme katsayısı, “h” ise mm cinsinden numune yüksekliğidir. Elde edilen değerlerin ortalaması alınarak stabilite ve akma değerleri belirlenmiş olur.

Numunelerin sırasıyla havadaki, sudaki ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları ölçülerek not edilir.

Numuneler, stabilite deneyinden önce 30-40 dk süre ile 60°C±1°C’deki su banyosunda bekletilir.

Süre sonunda su banyosundan çıkarılan numuneler Marshall stabilite aletine yerleştirilir. Bu cihaz ile numune için stabilite ve akma değerleri elde edilir.

Stabilite değeri, numunenin deformasyona karşı oluşan maksimum direnç değerini verirken, akma değeri de maksimum yüke ulaşıldığında meydana gelen düşey deformasyon değerini verir.

Deney aşamaları Şekil 3.28’de gösterilmiştir.



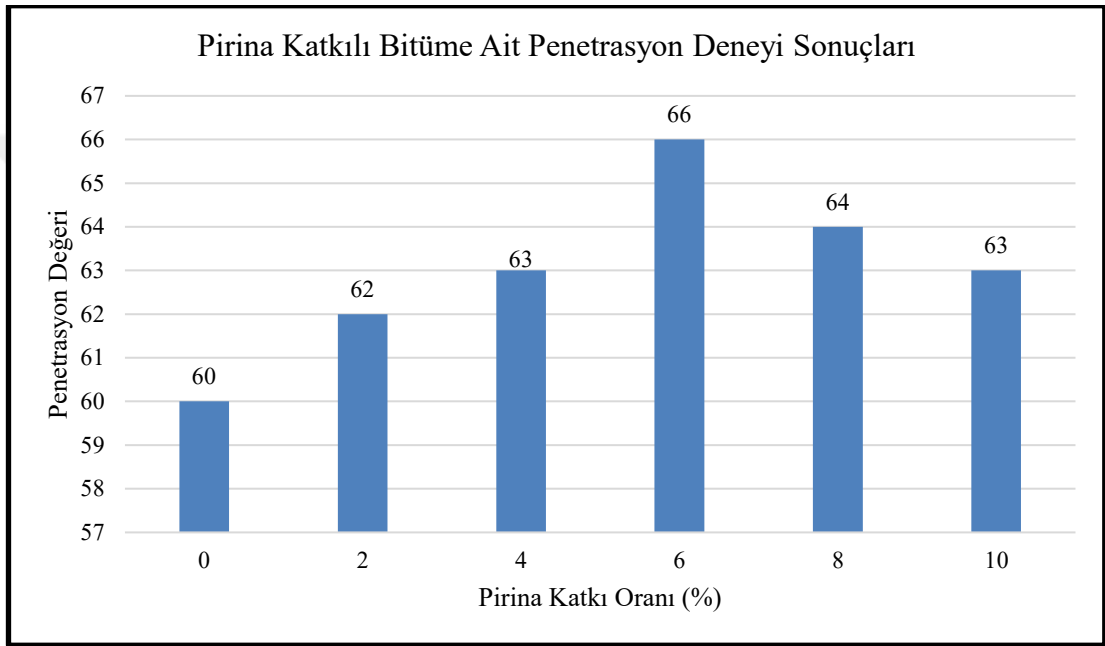
Şekil 3.28. Marshall Tasarım Deneyi Aşamaları

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Geleneksel Deney Sonuçları

4.1.1. Pirina Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon Deney Sonuçları

Pirina eklenerek oluşturulan modifiye bitüm örneklerine ait penetrasyon deney sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir.

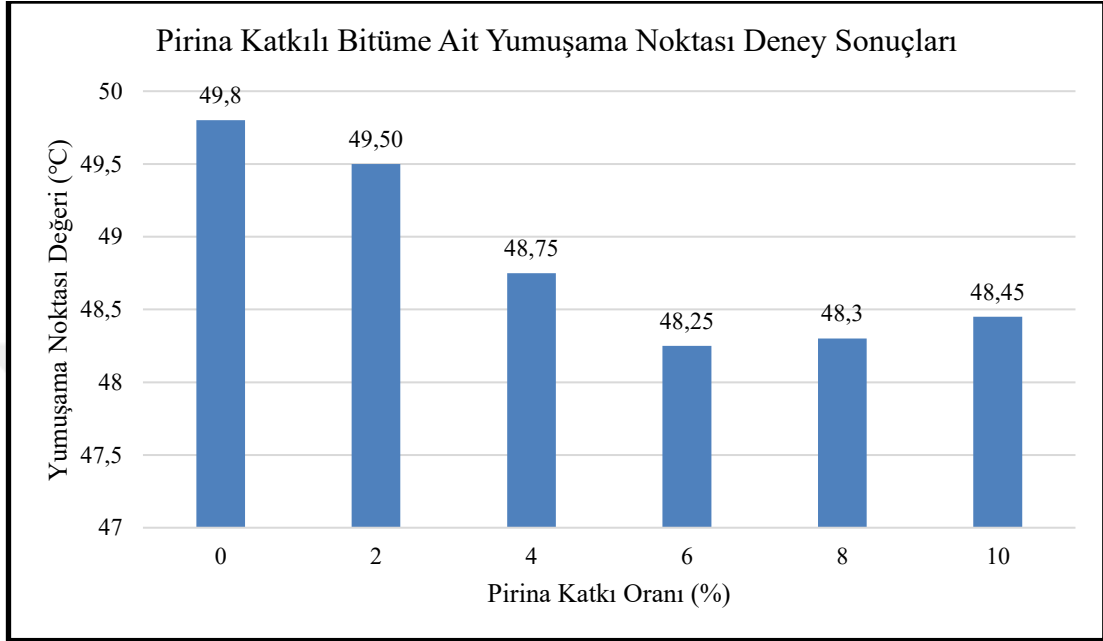


Şekil 4.1. Pirina Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon Deneyi Sonuç Grafiği

Sonuçlar incelendiğinde %2, %4 ve %6 oranında pirina ilavesinin, bitümün penetrasyon değerini arttırdığı, %8 ve %10 katkı oranının ise penetrasyon değerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Genel olarak bakıldığında, %6’lık orandan sonra penetrasyon değerinde düşüş gözlemlense de tüm oranlara ait penetrasyon değerinin saf bitümün penetrasyon değerinden yüksek olduğu görülmüştür. Bu sebeple pirina katkısının bitümün kıvamını yumuşattığı sonucuna varılmıştır.

4.1.2. Pirina Katkılı Bitüme Ait Yumuşama Noktası Tayini Deney Sonuçları

Pirina eklenerek oluşturulan modifiye bitüm örneklerine ait yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir.

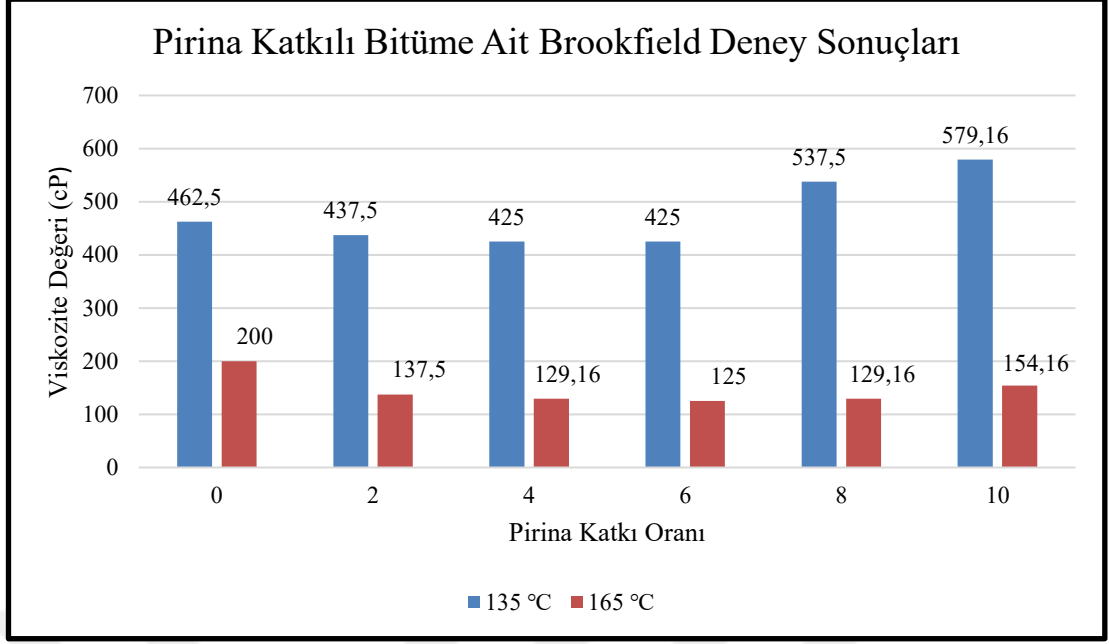


Şekil 4.2. Pirina Katkılı Bitüme Ait Yumuşama Noktası Deneyi Sonuç Grafiği

Sonuçlar incelendiğinde %2, %4 ve %6 oranında pirina ilavesinin, bitümün yumuşama noktası değerini azalttığı, %8 ve %10 katkı oranının ise yumuşama noktası değerini arttırdığı ve sonuçların penetrasyon deneyine ait sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. %6’lık pirina katkı oranından sonra yumuşama noktası değerinde artış gözlemlense de genel olarak bakıldığında tüm oranlara ait yumuşama noktası değerinin saf bitümün yumuşama noktası değerinden düşük olduğu tespit edilmiş ve pirina katkısının bitümün kıvamını yumuşattığı sonucuna varılmıştır.

4.1.3. Pirina Katkılı Bitüme Ait Brookfield Dönel Viskozite Deney Sonuçları

Pirina eklenerek oluşturulan modifiye bitüm örneklerine ait Brookfield viskozite deney sonuçları Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Pirina Katkılı Bitüme Ait Brookfield Viskozite Deneyi Sonuç Grafiği

Sonuçlar incelendiğinde viskozite deney sonuçları ile yumuşama noktası deneyine ait sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. %2, %4 ve %6 oranında pirina ilavesinin, bitümün viskozite değerini azalttığı, %8 ve %10 katkı oranının ise viskozite değerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu da %6'dan daha fazla pirina katkısı kullanıldığında bitümün daha yoğun bir kıvama geldiği ve dolayısıyla bitümün akmaya karşı direncinin de arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.1.4. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Deney Sonuçları

Pirina eklenerek oluşturulan modifiye bitüm örneklerine ait RTFOT kütle kaybı hesap sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir.

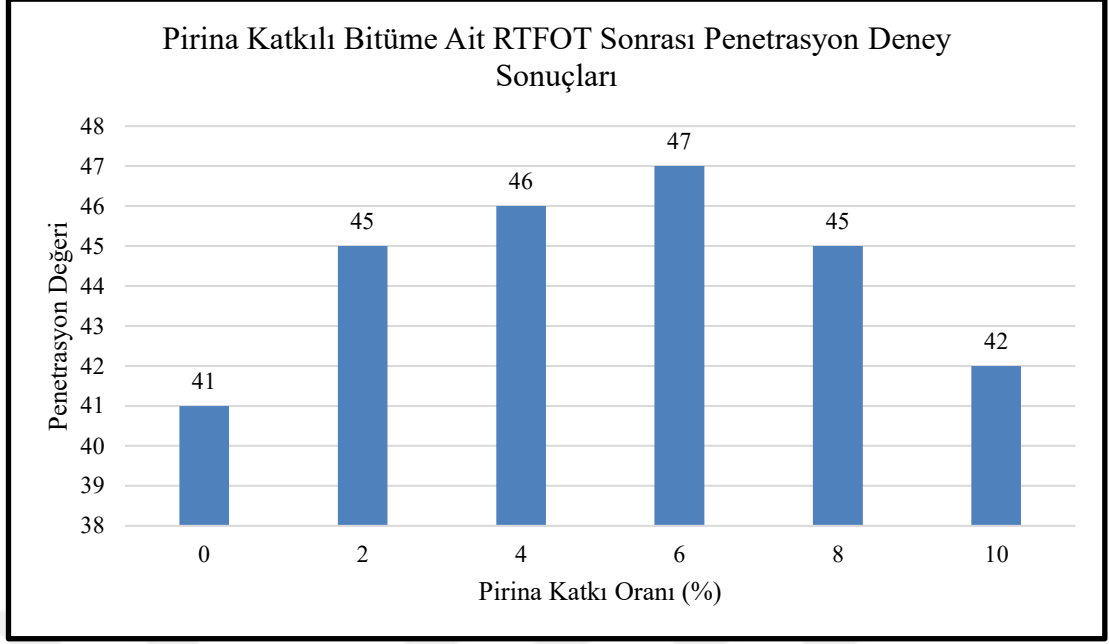
Tablo 4.1. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Kütle Kaybı Hesap Sonuçları (%)

Numune Adı	Şişeler				
	1	2	3	4	5
B	0,56	0,85	0,85	0,56	0,28
PB₂	0,84	0,55	0,85	0,55	0,28
PB₄	0,84	0,84	0,83	0,56	0,83
PB₆	0,56	0,86	0,86	0,85	0,85
PB₈	0,84	0,57	0,84	0,84	0,85
PB₁₀	0,84	0,83	0,85	0,83	0,84

ASTM D6373 standardına göre RTFOT sonucu Superpave sınıflandırmasında kütle kaybının %1'den az olması istenmektedir. Tablo 4.1'e bakıldığında bu kriterin sağlandığı görülmüştür.

4.1.4.1. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Penetrasyon Deney Sonuçları

Pirina eklenerek oluşturulan modifiye bitüm örneklerine ait RTFOT sonrası penetrasyon deney sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir.

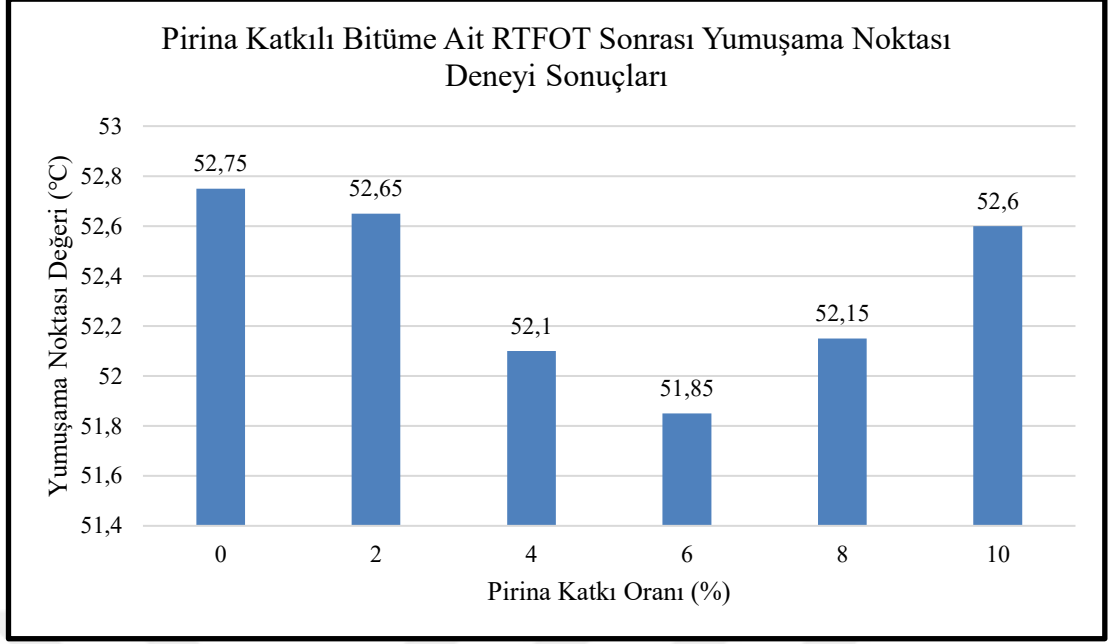


Şekil 4.4. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneyi Sonuç Grafiği

Sonuçlar incelendiğinde %2, %4 ve %6 oranında pirina ilavesinin, bitümün RTFOT sonrası penetrasyon değerini arttırdığı, %8 ve %10 katkı oranının ise penetrasyon değerini azaltmaya başladığı görülmüştür. Genel olarak bakıldığında, %6'lık orandan sonra penetrasyon değerinde düşüş gözlemlense de tüm oranlara ait RTFOT sonrası penetrasyon değerinin saf bitümün penetrasyon değerinden yüksek olduğu görülmüştür. Bu sebeple pirina katkısının bitüm üzerinde gençleştirici etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

4.1.4.2. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Pirina eklenerek oluşturulan modifiye bitüm örneklerine ait RTFOT sonrası yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Pirina Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneyi Sonuç Grafiği

Sonuçlar incelendiğinde %2, %4 ve %6 oranında pirina ilavesinin, bitümün RTFOT sonrası yumuşama noktası değerini azalttığı, %8 ve %10 katkı oranının ise yumuşama noktası değerini arttırdığı ve sonuçların RTOT sonrası penetrasyon deneyine ait sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. %6'lık pirina katkı oranından sonra yumuşama noktası değerinde artış gözlemlense de genel olarak bakıldığında tüm oranlara ait RTFOT sonrası yumuşama noktası değerinin saf bitümün yumuşama noktası değerinden düşük olduğu tespit edilmiştir.

4.1.5. Pirina Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon İndeksi ve Kalıcı Penetrasyon Değeri Hesabı

Pirina eklenerek oluşturulan modifiye bitüm örneklerine ait penetrasyon indeksi değeri ve kalıcı penetrasyon yüzdesi değeri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Pirina Katkılı Bitüm Numunelerine Ait Penetrasyon İndeksi ve Kalıcı Penetrasyon (%) Değeri

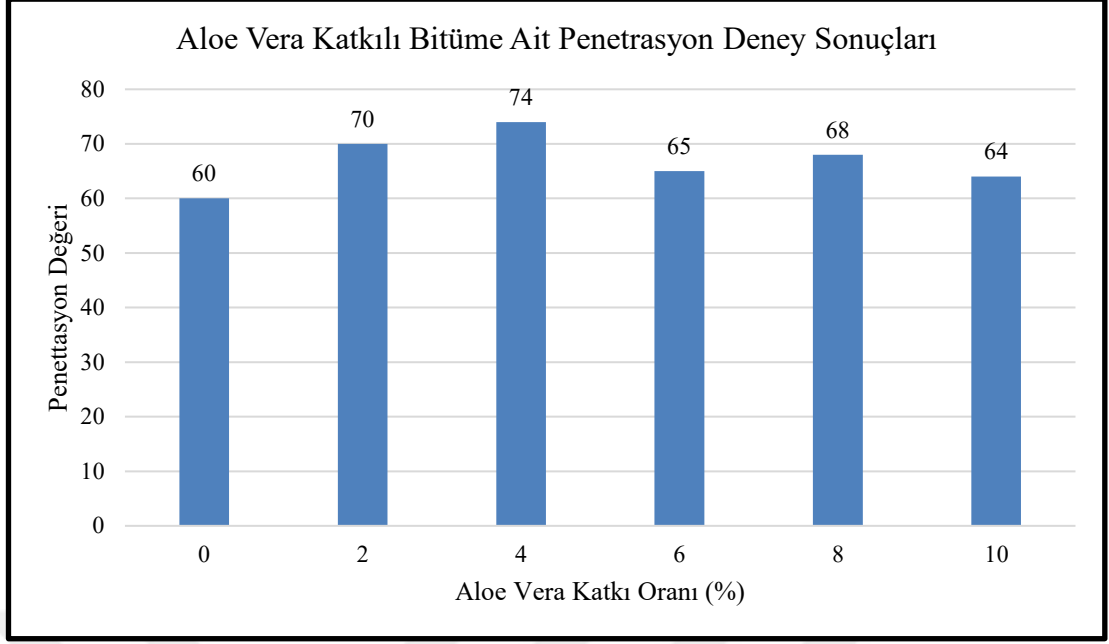
	Numune Adı					
Deney	B	PB ₂	PB ₄	PB ₆	PB ₈	PB ₁₀
Penetrasyon İndeksi (PI)	-0,82	-1,08	-0,98	-0,99	-1,05	-1,05
Kalıcı Penetrasyon (%)	68,34	72,58	73,01	71,21	70,31	66,67

Tablo 4.2.'de saf bitüm ve modifiye bitüm örneklerinin penetrasyon indeksi değerleri ve kalıcı penetrasyon yüzde değerleri verilmiştir. Saf ve pirina katkılı modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon indeksleri incelendiğinde, saf bitüme ait penetrasyon indeksinin modifiye bitüm numunelerine ait penetrasyon indeksinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Penetrasyon indeksi ile sıcaklık duyarlılığı arasında ters bir ilişki olup, penetrasyon indeksinin artması sıcaklığa karşı duyarlılığı azaltırken, penetrasyon indeksinin azalması sıcaklığa karşı duyarlılığı artırmaktadır. Tablo 4.2.'ye göre pirina katkı kullanımı penetrasyon indeksini azaltmış yani sıcaklığa karşı duyarlılığı arttırmıştır.

Kalıcı penetrasyon değerine bakıldığında, şartnameye göre (TS EN 1426, ASTM D5) minimum değer olan %50 kalıcı penetrasyon değerinin, pirina katkılı numunelerin hepsi için sağlandığı görülmüştür.

4.1.6. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon Deney Sonuçları

Aloe vera jeli kullanılarak hazırlanan modifiye bitüm numunelerine ait penetrasyon deney sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir.

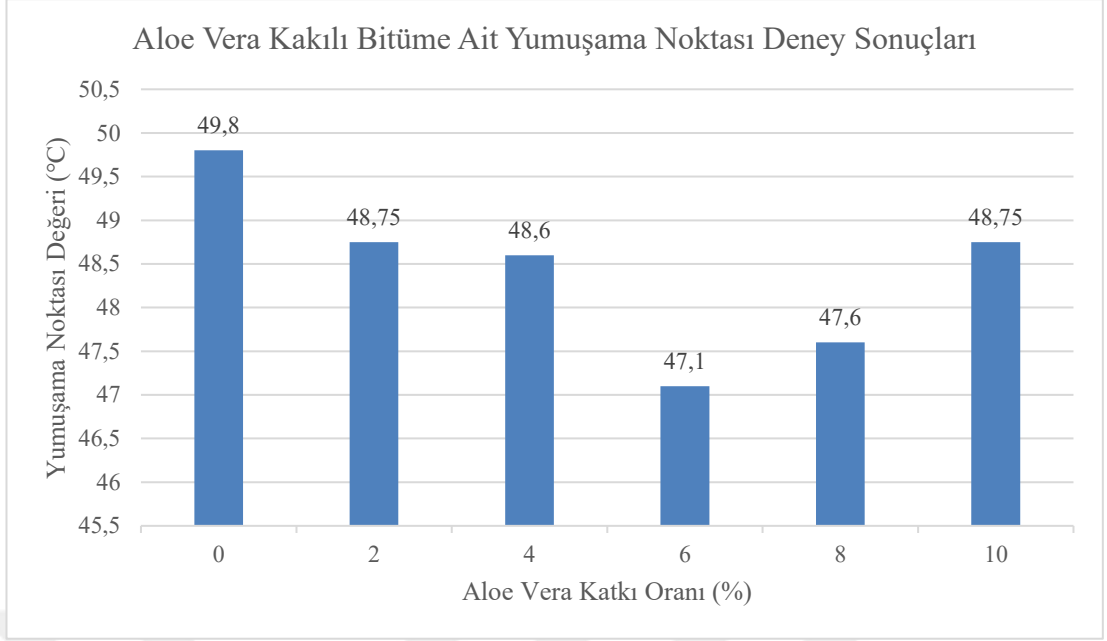


Şekil 4.6. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon Deneyi Sonuç Grafiği

Sonuçlar incelendiğinde %2 ve %4 oranında Aloe vera ilavesinin bitümün penetrasyon değerini düzenli bir şekilde arttırdığı ve sonrasında bitüm içerisindeki Aloe vera oranı attıkça (%6, %8 ve %10) penetrasyon değerinde düzensiz azalış ve artışlar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu düzensiz durumun Aloe vera jelinin hem bitümle tepkimeye girmesi hem de Aloe veranın bitüm içerisinde homojen olarak karışmayıp tortu halinde kalması ve katkı oranı arttıkça modifiye bitüm numunesi içerisinde daha fazla tortu birikmesinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Genel haliyle bakıldığında Aloe vera katkı kullanımının bitümün kıvamını azalttığı sonucuna varılsa da %6'lık katkı kullanımından itibaren oluşan düzensizlikten dolayı net bir çıkarım yapılamamıştır.

4.1.7. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Aloe vera jeli kullanılarak hazırlanan modifiye bitüm numunelerine ait yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 4.7'de verilmiştir.

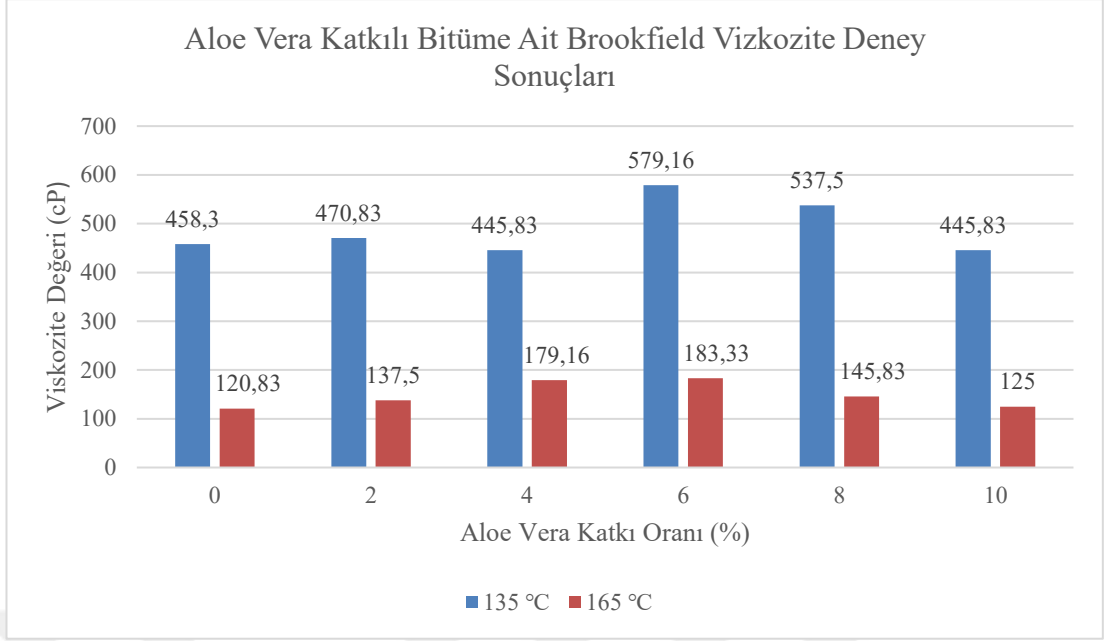


Şekil 4.7. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Yumuşama Noktası Deneyi Sonuç Grafiği

Sonuçlar incelendiğinde %2, %4 ve %6 oranında Aloe vera ilavesinin, bitümün yumuşama noktası değerini azalttığı, %8 ve %10 katkı oranının ise yumuşama noktası değerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Genel olarak bakıldığında tüm oranlara ait yumuşama noktası değerinin saf bitümün yumuşama noktası değerinden düşük olduğu için Aloe katkısının bitümün kıvamını azaltarak daha yumuşak bir hal almasına sebep olduğu söylenebilir.

4.1.8 Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Brookfield Viskozite Deney Sonuçları

Aloe vera jeli kullanılarak hazırlanan modifiye bitüm numunelerine ait Brookfield viskozite deney sonuçları Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Brookfield Viskozite Deneyi Sonuç Grafiği

Sonuçlar incelendiğinde Aloe vera katkısının bitümün viskozite değeri üzerinde düzensiz artış ve azalışlara sebep olduğu gözlemlenmiştir. Penetrasyon ve yumuşama noktası değerleriyle karşılaştırıldığında da grafiklerin uyumsuz olduğu görülmektedir. Bunun sebebi Aloe veranın bitüm ile tepkimeye girmiş olmasıdır. Viskozite değerlerinde net bir azalış ya da artış olmadığı için Aloe vera katkı kullanımının bitümün akmaya karşı direncinin üzerinde nasıl bir etki oluşturduğuna dair net bir çıkarıma varılamamıştır.

4.1.9. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait RTFOT Deney Sonuçları

Aloe vera jeli kullanılarak hazırlanan modifiye bitüm numunelerine ait RTFOT kütle kaybı hesabı Tablo 4.3'te verilmiştir.

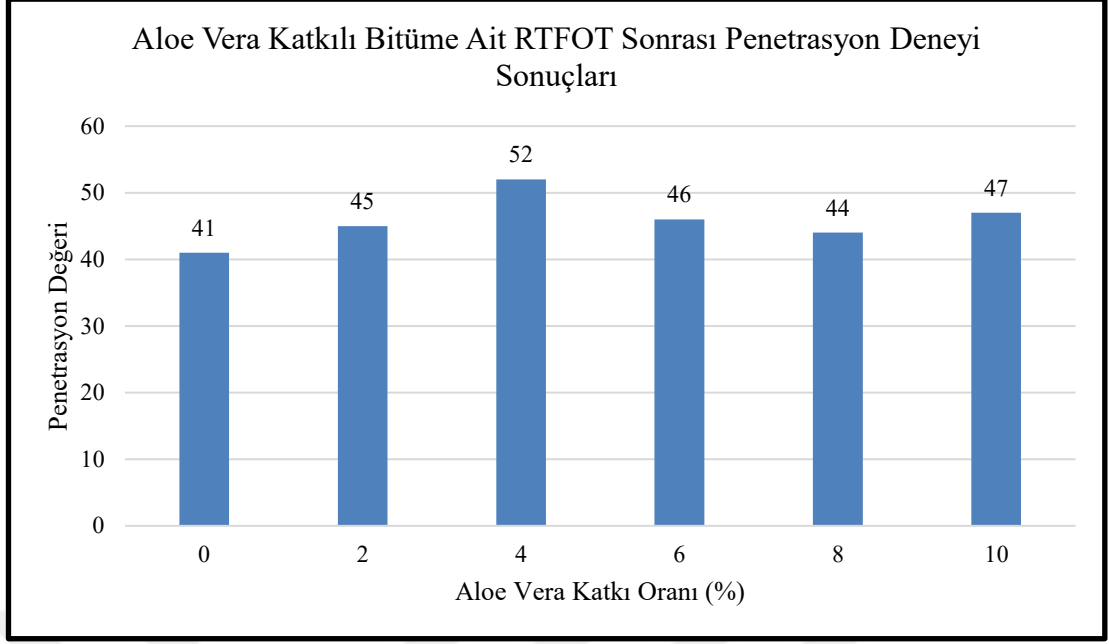
Tablo 4.3. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait RTFOT Kütle Kaybı Hesap Sonuçları (%)

Numune Adı	Şişeler				
	1	2	3	4	5
B	0,56	0,85	0,85	0,56	0,28
AB₂	0,83	0,84	0,86	0,28	0,55
AB₄	0,84	0,56	0,56	0,84	0,57
AB₆	0,85	0,56	0,85	0,86	0,84
AB₈	0,83	0,84	0,84	0,56	0,28
AB₁₀	0,48	0,03	0,16	0,40	0,34

ASTM D6373 standardına göre RTFOT sonucu Superpave sınıflandırmasında kütle kaybının %1'den az olması istenmektedir. Tablo 4.3'e bakıldığında bu kriterin sağlandığı görülmüştür.

4.1.9.1.Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Penetrasyon Deney Sonuçları

Aloe vera jeli kullanılarak hazırlanan modifiye bitüm numunelerine ait RTFOT sonrası penetrasyon deney sonuçları Şekil 4.9'da verilmiştir.

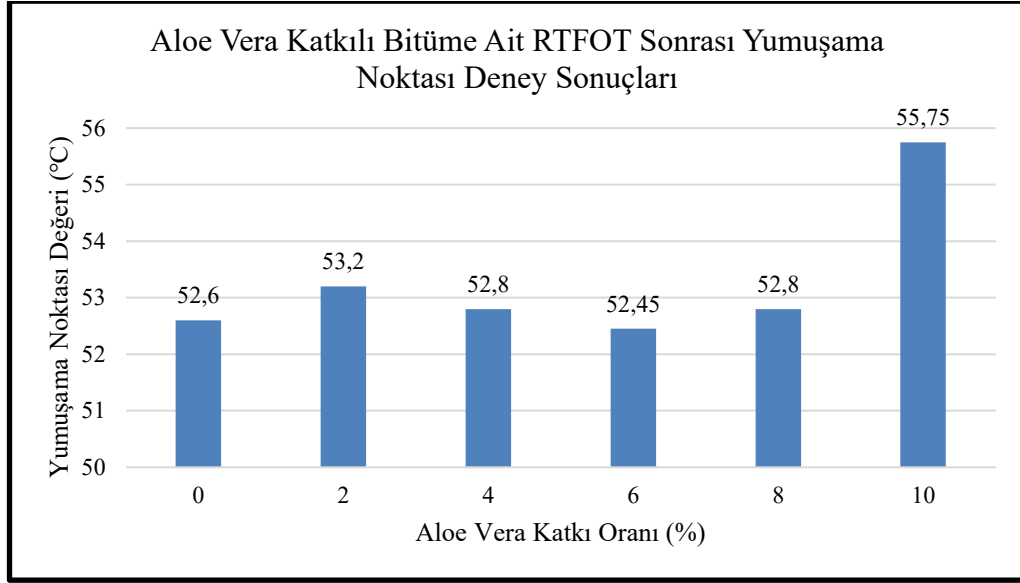


Şekil 4.9. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneyi Sonuç Grafiği

Sonuçlar incelendiğinde kısa dönem yaşlandırma sonrasında %2 ve %4 oranında Aloe vera ilavesinin, bitümün penetrasyon değerini arttırdığı, %6 ve %8 katkı oranının ise penetrasyon değerini düşürdüğü ve %10 katkı kullanımında penetrasyon değerinin tekrardan artmaya başladığı gözlemlenmiştir. %6 ve %8’lik Aloe vera katkı oranına ait modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon noktası değerinde düşüş gözlemlense de genel olarak bakıldığında RTFOT sonrası tüm oranlara ait penetrasyon değerinin saf bitümün penetrasyon değerinden yüksek olduğu tespit edilmiş ve Aloe vera katkısının bitüm üzerinde az da olsa gençleştirici etki yarattığı gözlemlenmiştir.

4.1.9.2. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Aloe vera jeli kullanılarak hazırlanan modifiye bitüm numunelerine ait RTFOT sonrası yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneyi Sonuç Grafiği

Sonuçlar incelendiğinde Aloe vera katkısının RTFOT sonrası bitümün yumuşama noktası değeri üzerinde düzensiz artış ve azalışlara sebep olduğu gözlemlenmiştir. RTFOT sonrası penetrasyon değerleriyle karşılaştırıldığında da grafiklerin uyumsuz olduğu görülmektedir. Diğer deney sonuçlarında olduğu gibi Aloe veranın bitüm ile tepkimeye girerek düzensiz sonuçlara sebep olması durumu burada da söz konusudur.

4.1.10. Aloe Vera Katkılı Bitüme Ait Penetrasyon İndeksi ve Kalıcı Penetrasyon Değeri Hesabı

Pirina eklenerek oluşturulan modifiye bitüm örneklerine ait penetrasyon indeksi değeri ve kalıcı penetrasyon yüzdesi değeri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Aloe Vera Katkılı Bitüm Numunelerine Ait Penetrasyon İndeksi ve Kalıcı Penetrasyon (%) Değeri

	Numune Adı					
Deney	B	AB ₂	AB ₄	AB ₆	AB ₈	AB ₁₀
Penetrasyon İndeksi (PI)	-0,82	-0,70	-0,59	-1,34	-1,09	-0,93
Kalıcı Penetrasyon (%)	68,34	64,28	70,27	70,76	64,70	73,43

Tablo 4.4.'te saf bitüm ve modifiye bitüm örneklerinin penetrasyon indeksi değerleri ve kalıcı penetrasyon yüzde değerleri verilmiştir. Saf ve Aloe vera katkılı modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon indeksleri incelendiğinde, diğer deney sonuçlarında görülen düzensizliklerin burada da devam ettiği görülmektedir. AB₂ ve AB₄ numunelerinde saf bitüme kıyasla penetrasyon indeksinin arttığı yani ısıya karşı duyarlılığın azaldığı, AB₆, AB₈ ve AB₁₀ numunelerine ait penetrasyon indeksinin ise saf bitüme göre azaldığı yani bu numunelerin sıcaklığa karşı duyarlılığının arttığı görülmektedir. Bu durumda Aloe vera katkısının başlangıçta bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını azaltırken, katkı kullanım oranı belli bir seviyenin üstüne çıkınca Aloe veranın bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını arttırdığı söylenebilir.

Kalıcı penetrasyon değerine bakıldığında, şartnameye göre (TS EN 1426, ASTM D5) minimum değer olan %50 kalıcı penetrasyon değerinin, Aloe vera katkılı numunelerin hepsi için sağlandığı görülmüştür.

4.2. Marshall Tasarım Deney Sonuçları

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere Aloe vera ve bitüm kimyasal reaksiyona girdiği, fiziksel olarak homojen bir şekilde karışmadığı ve Aloe vera ile hazırlanan modifiye bitüm numunelerinin geleneksel deney sonuçları tutarsız çıktığı için Aloe vera katkılı modifiye bitüm numuneleri için Marshall tasarım çalışması yapılmamış, bu sebeple sadece pirina katkılı modifiye bitüm numuneleri için Marshall tasarım deneyleri yapılmıştır.

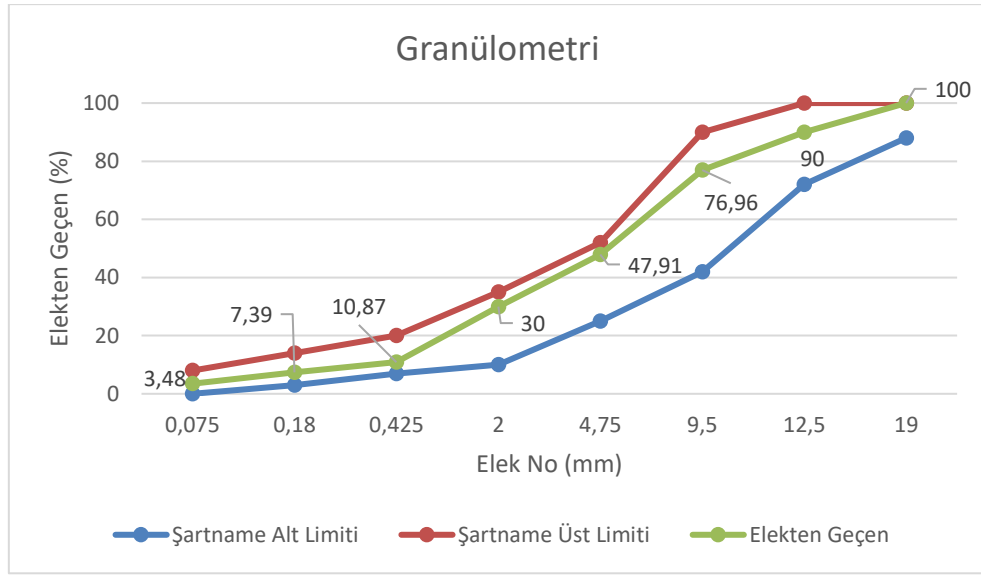
4.2.1 Elek Analizi

Karışım tasarımı aşınma tabakası için yapıldığından en büyük agreg a tane boyutu 19 mm olarak seçilmiştir. Agreg a için teknik şartnamedeki alt ve üst limitlerin ortalaması kullanılarak toplamda 1150 gr numune elde edilmiştir. (Tablo 4.5).

Tablo 4.5. Agreg a Karışım Verileri

Elek Numarası (mm)	Şartname Alt ve Üst Limitleri (%)	Elekten Geçen (%)	Elekte Kalan (gr)
19	100	100	0
12,5	88 – 100	90	115
9,5	72 – 90	76,96	150
4,75	42 – 52	47,91	334
2	25 – 35	30	206
0,425	10 – 20	10,87	220
0,18	07 – 14	7,39	40
0,075	03 – 08	3,48	45
Boşluksuz Kap	-	0	40
Toplam			1150

Bitüm karışım numuneleri için agreg a tane dağılımı eğrileri KTŞ aşınma tabakası TİP-1'e uygun olarak seçilmiştir. Mevcut elek analizi sonuçları ve deneyler için seçilen agreg a granülometrisi Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Agrega Granülometrisi

4.2.2. Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi ve Marshall Tasarım Deneyi Sonuçları

Optimum bitüm oranının %4 ile %6 arasında bulunacağı öngörülerek, agregaya ağırlığının yüzdece %4,0 %4,5 %5,0 %5,5 ve %6,0 oranlarında bitüm eklenerek her bir bitüm yüzdesi için üçer adet Marshall numunesi hazırlanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre %4 boşluk oranına karşılık gelen optimum bitüm içeriği oranı %4,25 olarak bulunmuştur. Tablo 4.6'da elde edilen değerlerin hesaplamalarında kullanılan eşitlikler (5-13) ise aşağıda gösterilmiştir.

Deney sonuçları her briket yüksekliğinin birbirinden farklı ölçüldüğünü göstermektedir. Marshall tasarım deneyi sonucunda ölçülen stabilite değeri düzeltme faktörü ile çarpılır ve bu düzeltme faktörü briketin yüksekliğine göre tablodan okunarak dikkate alınır (EK-A). Standart bir briketin yüksekliği 63,5 mm'dir ve bu yükseklik değeri için düzeltme faktörü 1'dir. Briketin yüksekliği arttıkça düzeltme faktörü sayısı azalır, tersi olarak da briket yüksekliği azaldıkça düzeltme faktörü sayısı artar.

$$W_a = \frac{M_B}{M_A} * 100 \quad (5)$$

W_a : Agregada içerisindeki bağlayıcı %'si

M_B : Karışım içerisindeki bağlayıcı miktarı (gr)

M_A : Karışım içerisindeki agregada miktarı (gr)

Briketin hacmi, biriketin havada ve sudaki ağırlığının aşağıdaki formülle hesaplanması sonucu bulunur.

$$V = B - C \quad (6)$$

V : Briketin hacmi (cm^3)

B : Briketin doygun kuru yüzey ağırlığı (gr)

C : Briketin sudaki ağırlığı (gr)

Numunelerin Hacim Özgöl Ağırlığı (D_p);

$$D_p = \frac{A}{V} \quad (7)$$

A : Briketin havadaki ağırlığı (gr)

Kaplama Karışımının Boşluksuz Maksimum Özgöl ağırlığı (D_t);

$$D_t = \frac{100}{\frac{100 - W_b}{G_{ef}} + \frac{W_b}{G_b}} \quad (8)$$

G_b : Bitüm özgöl ağırlığı (kN/cm^3)

W_b : Karışım içindeki bağlayıcı yüzdesi

G_{ef} : Agregada efektif özgöl ağırlığı

Karışım Numunelerinin Pratik Özgöl Ağırlığı Ortalaması (D_{Port});

$$D_{Port} = \frac{D_{P1} + D_{P2} + D_{P3}}{3} \quad (9)$$

Sıkıştırılmış Kaplamadaki Hava Boşluğu %'si (V_h);

$$V_h = \frac{D_t - D_{Port}}{D_t} * 100 \quad (10)$$

Karışımındaki Bağlayıcının Hacim %'si (V_B);

$$V_B = \frac{D_{Port} * W_b}{G_b} \quad (11)$$

Sıkıştırılmış Kaplamadaki Agregalar Arası Boşluk (V_{MA});

$$V_{MA} = 100 - V_A \quad (12)$$

V_A : Karışımındaki agregaların hacim olarak yüzdesi

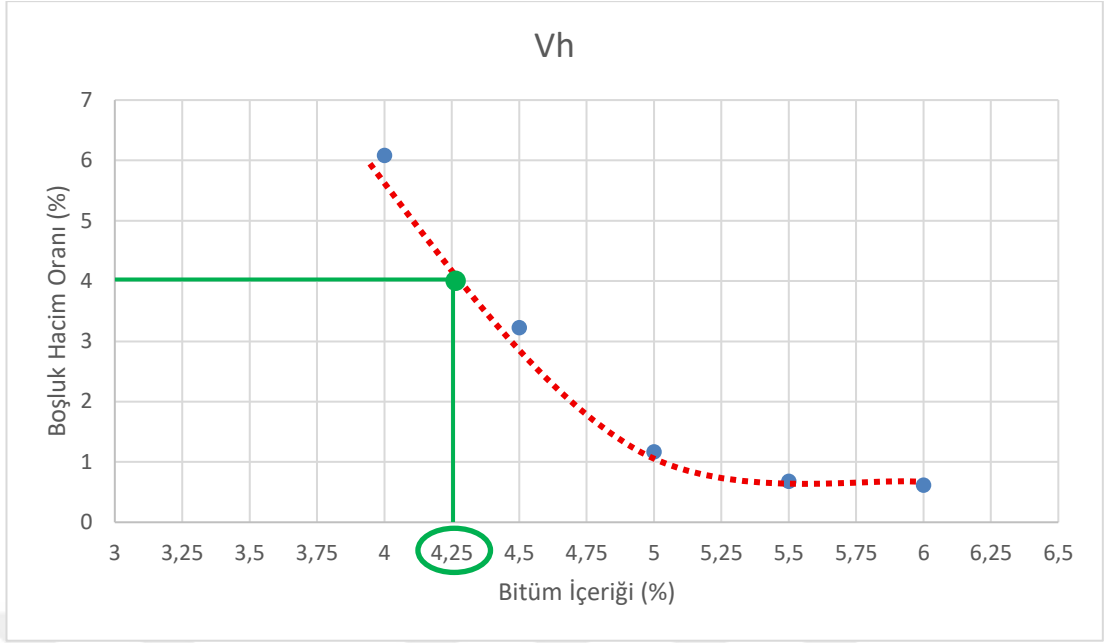
Sıkıştırılmış Kaplamadaki Bitümle Dolu Boşluk %'si (V_{FA});

$$V_{FA} = \frac{V_B}{V_{MA}} * 100 \quad (13)$$

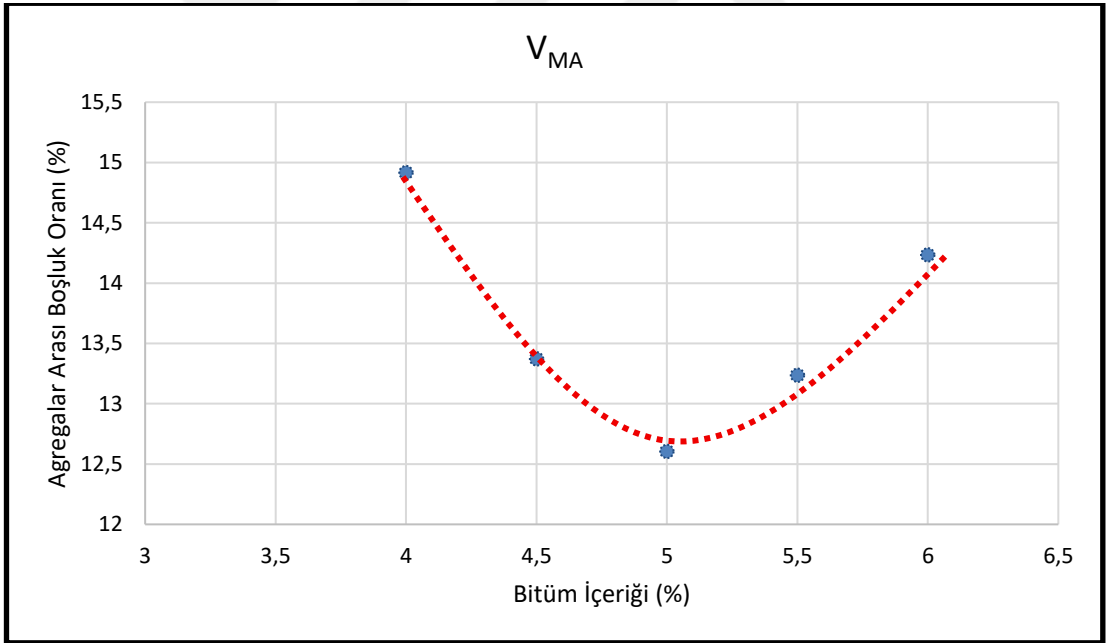
Optimum bitüm yüzdesi hesabına ait ve pirina katkılı bitüme ait Marshall tasarım deney sonuçlarına ilişkin sonuçlar Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'de, grafikler ise Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Optimum Bitüm İçeriği için Marshall Tasarımı Deney Sonuçları

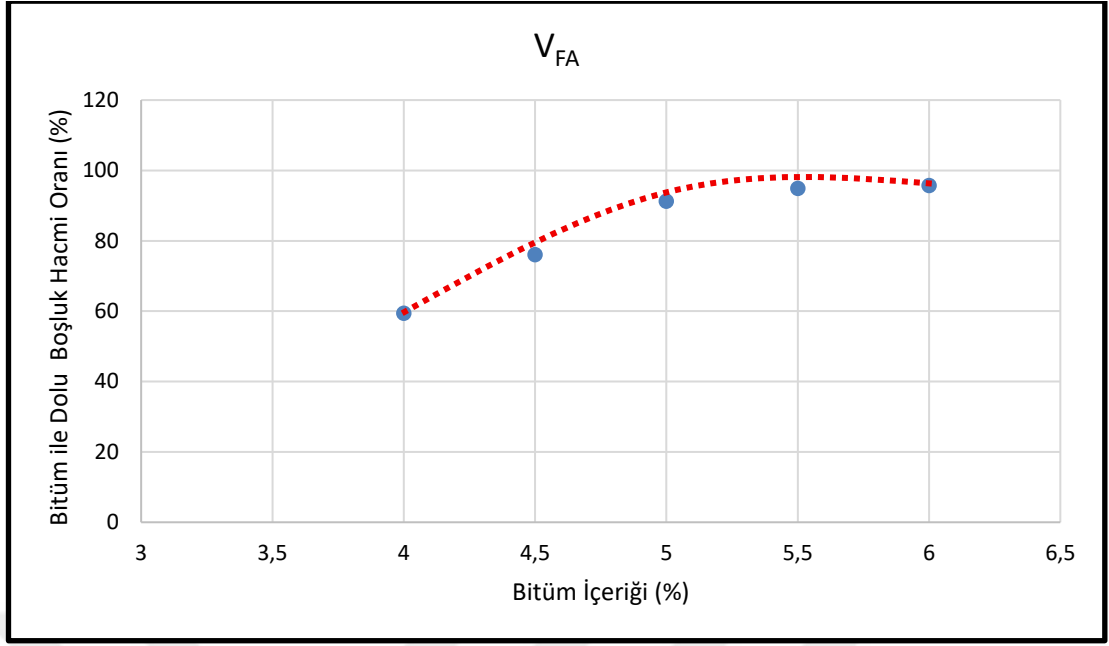
No	Wa (%)	Wb (%)	Num. Yüksek. (mm)	Havada Ağırlık (gr)	Suda Ağırlık (gr)	Doy. Yüzey Ağır. (gr)	Hacim (cm ³)	Hacim Özgül Ağır. (D _P)	Maks. Teo. Özg. Ağır. (D _t)	V _h (%)	V _B (%)	V _A (%)	V _{MA} (%)	V _{FA} (%)	Stabilite (gr)	Düzelt. Fakt.	Düz. Stabilite (kgf)	Akma (mm)
1	4,0	3,85	68,53	1195,60	710,50	1219,30	508,80	2,350	2,534	7,276	8,836	83,888	16,112	54,841	1054,00	0,885	923,79	2,87
2			66,80	1187,46	705,12	1200,94	495,82	2,395	2,534	5,496	8,836	85,668	14,332	61,651	917,00	0,922	845,47	2,56
3			65,90	1190,88	706,27	1203,37	497,10	2,396	2,534	5,468	8,836	85,696	14,304	61,772	1018,00	0,943	959,97	2,72
Ort.							500,57	2,380	2,534	6,080	8,836	85,084	14,916	59,421	996,33	0,917	909,75	2,72
1	4,5	4,31	63,73	1195,81	705,34	1200,73	495,40	2,414	2,517	4,096	10,147	85,757	14,243	71,244	1080,50	0,995	1075,09	2,60
2			62,53	1194,03	710,76	1199,42	488,70	2,443	2,517	2,920	10,147	86,933	13,067	77,656	1404,50	1,026	1441,02	3,07
3			62,63	1187,72	706,75	1191,54	484,80	2,450	2,517	2,662	10,147	87,191	12,809	79,219	1004,50	1,023	1027,60	2,56
Ort.							489,61	2,436	2,517	3,226	10,147	86,627	13,373	76,040	1163,17	1,015	1181,24	2,74
1	5,0	4,76	61,10	1202,21	719,82	1203,19	483,40	2,487	2,500	0,513	11,438	88,048	11,952	95,705	907,50	1,036	939,65	2,68
2			61,23	1191,56	713,35	1192,39	479,00	2,487	2,500	0,503	11,438	88,058	11,942	95,785	909,00	1,062	965,36	3,00
3			63,40	1235,10	729,75	1236,37	506,60	2,438	2,500	2,482	11,438	86,080	13,920	82,169	1160,50	1,003	1163,98	3,11
Ort.							489,68	2,471	2,500	1,166	11,438	87,395	12,605	91,220	992,33	1,034	1023,00	2,93
1	5,5	5,20	61,23	1186,02	706,18	1187,67	481,50	2,463	2,483	0,813	12,562	86,625	13,375	93,918	916,00	1,062	972,79	2,60
2			62,10	1207,42	719,15	1208,09	488,90	2,469	2,483	0,562	12,562	86,876	13,124	95,715	831,00	1,036	860,92	2,68
3			62,30	1202,50	716,47	1203,83	487,40	2,467	2,483	0,647	12,562	86,791	13,209	95,105	930,00	1,031	958,83	2,72
Ort.							485,90	2,467	2,483	0,674	12,562	86,764	13,236	94,913	892,33	1,043	930,85	2,67
1	6,0	5,70	63,50	1195,01	711,37	1199,28	487,90	2,449	2,467	0,723	13,620	85,657	14,343	94,963	793,00	1,000	793,00	3,00
2			63,10	1202,80	713,75	1204,01	490,30	2,453	2,467	0,554	13,620	85,825	14,175	96,089	847,50	1,011	856,82	3,11
3			62,40	1207,11	714,61	1206,68	492,10	2,453	2,467	0,565	13,620	85,814	14,186	96,016	881,00	1,028	905,67	3,35
Ort.							490,08	2,452	2,467	0,614	13,620	85,766	14,234	95,689	840,50	1,013	851,83	3,15



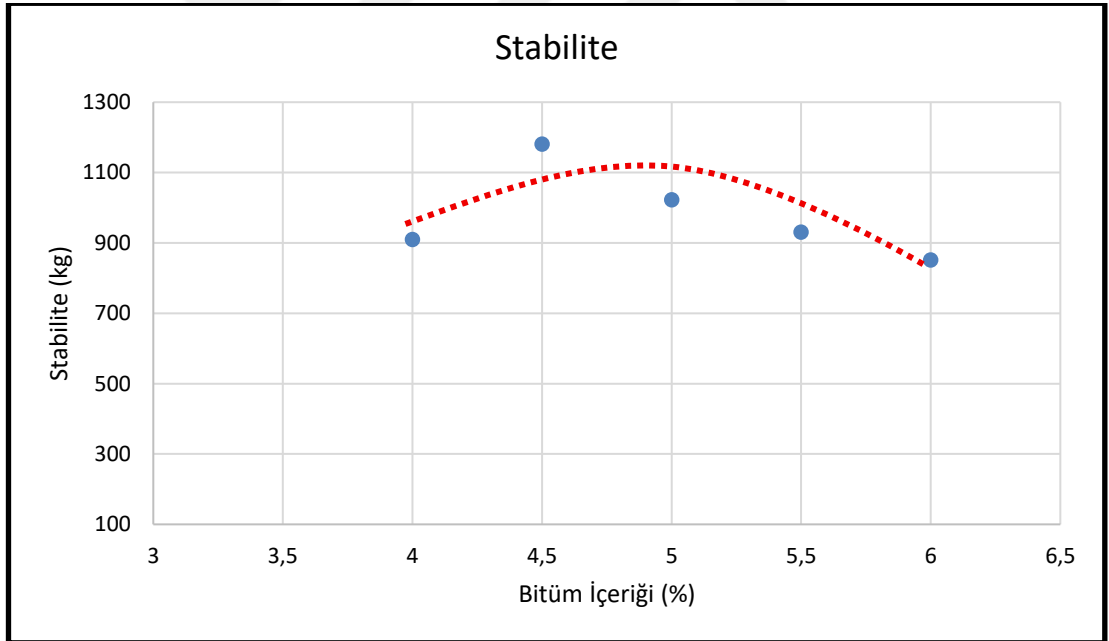
Şekil 4.12. Boşluk Hacminin Bitüm Yüzdesi ile Değişimi



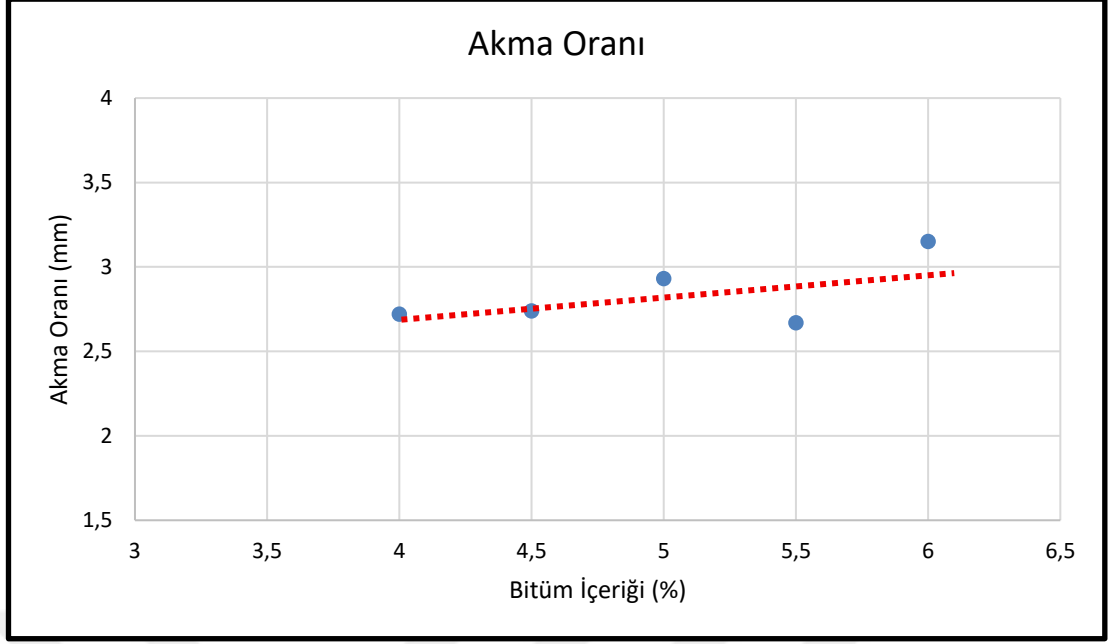
Şekil 4.13. Agregalar Arası Boşluk Oranının Bitüm Yüzdesi ile Değişimi



Şekil 4.14. Bitümle Dolu Boşluk Oranının Bitüm Yüzdesi ile Değişimi



Şekil 4.15. Marshall Stabilitesinin Bitüm Yüzdesi ile Değişimi



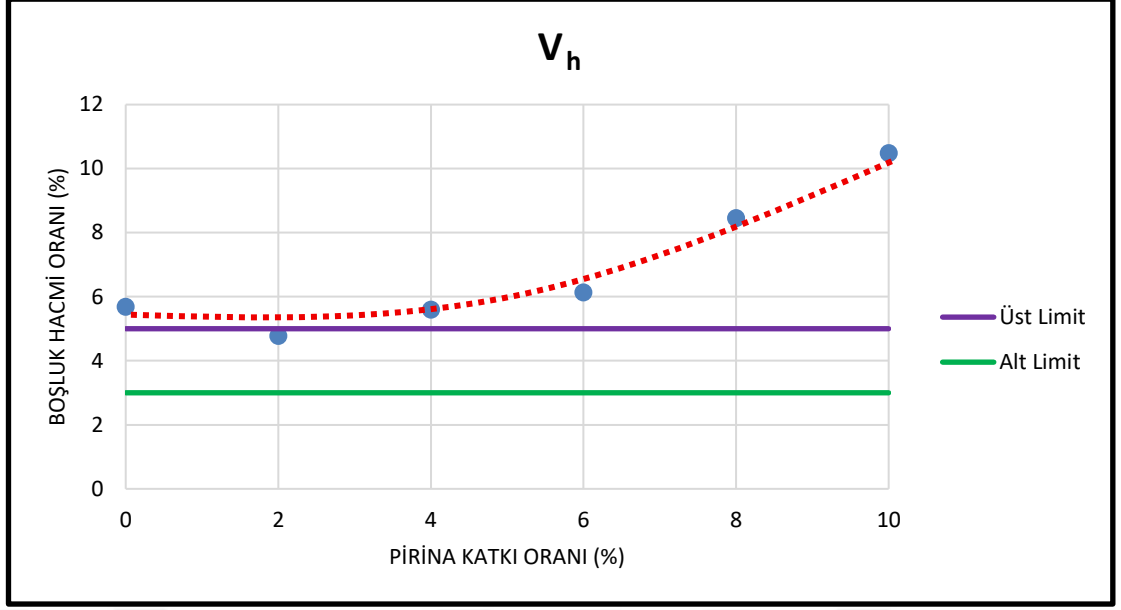
Şekil 4.16. Akma Oranının Bitüm Yüzdesi ile Değişimi

4.2.3. Pirina Katkılı Modifiye Bitüm Numunelerine Ait Marshall Tasarım Deney Sonuçları

Gradasyonu belirlenen agregalar 1150 gr olacak şekilde tartılarak 3 saat boyunca 160°C sıcaklıktaki etüvde ısıtılmıştır. Eş zamanlı olarak modifiye bitüm numuneleri hazırlanmıştır. Süre sonunda agrega ve modifiye bitüm numunesi karıştırma kabına alınarak 2 dk boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan agrega-bitüm karışımı Marshall kalıbına alınmış ve her iki yüzüne 50’şer defa vurularak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminden sonra numuneler 24 saat soğumaya bırakılmış ve soğuyan numuneler krika yardımı ile kalıptan çıkarılarak gerekli ölçüm ve hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar Tablo 4.7’te, elde edilen sonuçlara ait grafikler Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterilmiştir.

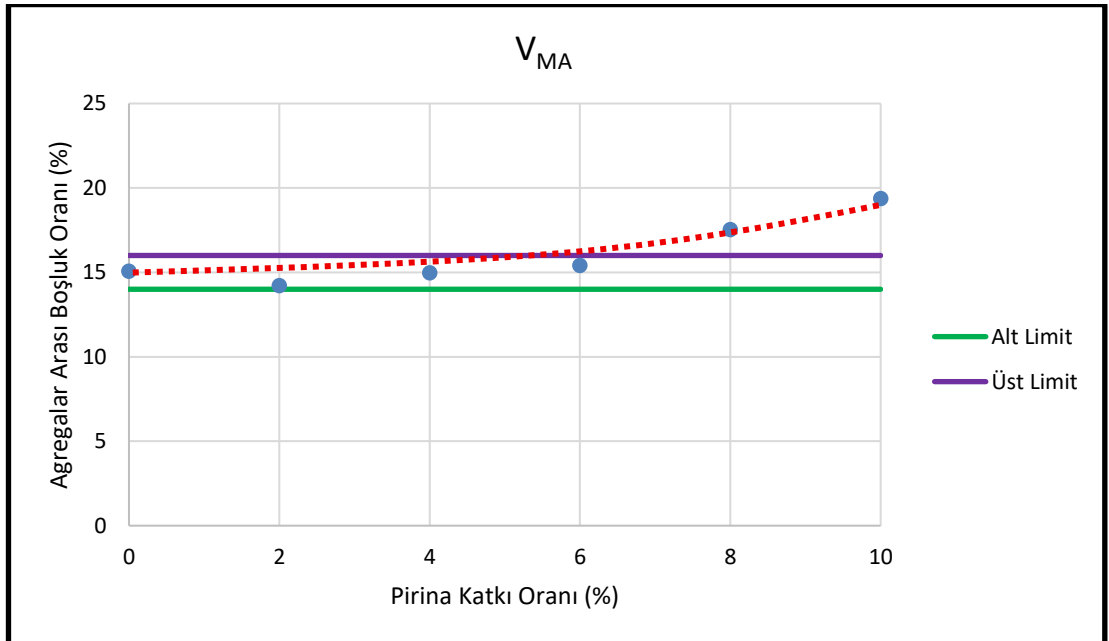
Tablo 4.7. Pirina Katkılı Modifiye Bitüm Numuneleri için Marshall Tasarımı Deney Sonuçları

No	Pirina Katkı Oranı (%)	Wa (%)	Wb (%)	Num. Yüksek. (mm)	Havada Ağırlık (gr)	Suda Ağırlık (gr)	Doy. Yüzey Ağır. (gr)	Hacim (cm3)	Hacim Özgül Ağır. (Dp)	Maks. Teo. Özg. Ağır. (Dt)	Vh (%)	Vb (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stabilite (gr)	Düzelt. Fakt,	Düz. Stabilite (kgf)	Akma (mm)
1	0	4,25	4,077	64,03	1206,11	711,04	1208,43	497,39	2,425	2,526	3,988	9,364	86,638	13,362	70,151	930,00	0,988	918,84	2,72
2				65,40	1179,93	692,37	1192,08	499,71	2,361	2,526	6,508		84,118	15,882	59,020	937,00	0,953	892,96	2,68
3				65,70	1194,36	702,17	1208,34	506,17	2,360	2,526	6,573		84,054	15,946	58,782	1053,00	0,947	997,19	2,60
Ort.									2,382	2,526	5,689		84,936	15,063	62,651	973,33	0,962	933,85	2,67
1	2	4,25	4,077	65,34	1170,10	710,43	1188,30	477,87	2,448	2,526	3,059	9,456	87,483	12,516	75,556	840,00	0,955	802,20	4,70
2				66,64	1186,70	697,85	1200,00	502,15	2,363	2,526	6,437		84,105	15,894	59,496	1268,00	0,927	1175,43	6,18
3				65,00	1164,90	692,28	1176,80	484,52	2,404	2,526	4,814		85,728	14,271	66,262	903,50	0,962	869,16	4,90
Ort.									2,405	2,526	4,770		85,772	14,227	67,105	1003,83	0,948	948,93	5,26
1	4	4,25	4,077	64,94	1168,30	695,35	1179,40	484,05	2,413	2,526	4,444	9,374	86,181	13,818	67,838	1020,00	0,965	984,30	4,20
2				65,80	1183,70	687,60	1184,10	496,5	2,384	2,526	5,612		85,013	14,986	62,551	954,00	0,945	901,53	4,35
3				68,87	1213,20	715,67	1230,70	515,03	2,355	2,526	6,740		83,884	16,115	58,171	1025,00	0,876	897,90	5,40
Ort.									2,384	2,526	5,599		85,026	14,973	62,853	999,66	0,928	927,91	4,65
1	6	4,25	4,077	66,94	1172,40	679,84	1187,50	507,66	2,309	2,526	8,568	9,321	82,109	17,890	52,104	946,50	0,920	870,78	5,10
2				66,50	1181,60	693,94	1192,70	498,76	2,369	2,526	6,206		84,471	15,528	60,029	804,00	0,930	747,72	4,60
3				67,74	1215,70	729,45	1228,80	499,35	2,434	2,526	3,614		87,064	12,935	72,061	925,50	0,901	833,87	4,20
Ort.									2,371	2,526	6,129		84,548	15,415	61,398	892,00	0,917	817,45	4,63
1	8	4,25	4,077	67,47	1185,10	723,42	1202,80	479,38	2,472	2,526	6,045	9,090	84,863	15,136	60,058	875,50	0,908	794,95	4,10
2				67,47	1203,10	664,1	1214,10	550,00	2,187	2,526	8,400		82,508	17,491	51,972	1058,50	0,908	961,11	4,80
3				68,40	1210,00	675,55	1223,30	547,75	2,209	2,526	10,916		79,992	20,007	45,437	1009,00	0,886	893,97	3,80
Ort.									2,289	2,526	8,454		82,454	17,545	52,489	981,00	0,900	883,35	4,23
1	10	4,25	4,077	66,30	1180,50	682,45	1193,70	511,25	2,309	2,526	10,337	8,889	80,773	19,226	46,236	1148,50	0,934	1072,69	4,90
2				67,87	1188,90	660,3	1204,60	544,30	2,184	2,526	9,360		81,750	18,249	48,711	1094,50	0,899	983,95	4,50
3				67,87	1192,90	623,3	1208,40	585,10	2,038	2,526	11,740		79,369	20,630	43,091	684,50	0,899	615,36	4,10
Ort.									2,177	2,526	10,479		80,630	19,369	46,012	975,83	0,910	890,67	4,50



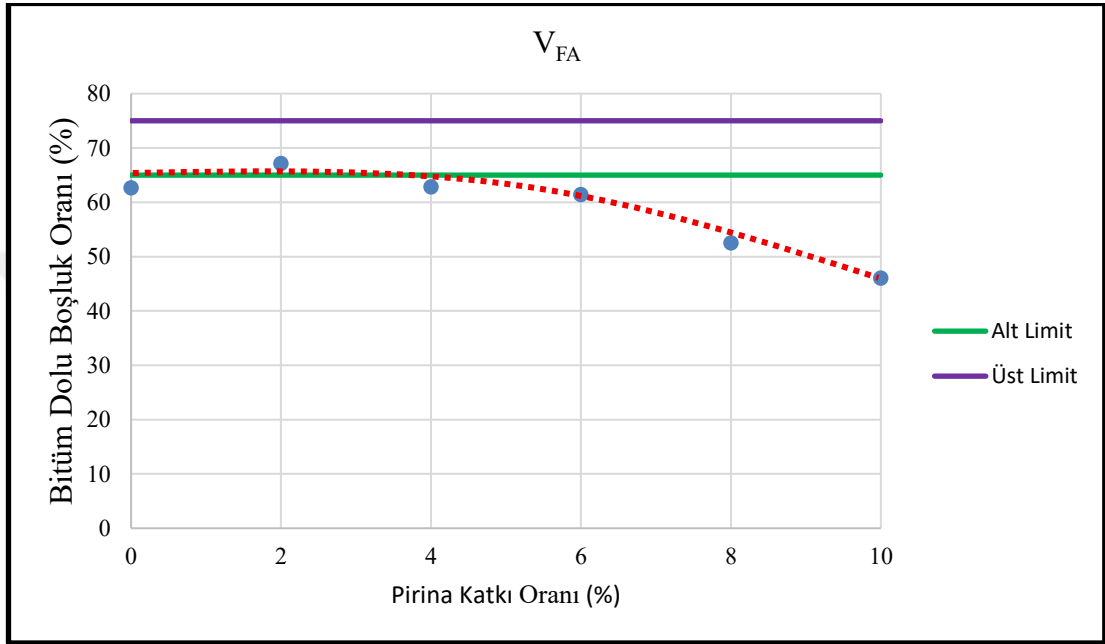
Şekil 4.17. Boşluk Hacminin Pirina Katkı Oranı ile Değişimi

Şekil 4.17’de pirina kullanılarak yapılan Marshall deney sonuçlarında pirina katkı oranı arttıkça boşluk hacim oranı değerinin de arttığı gözükmemektedir. Aşınma tabakası için gerekli olan alt ve üst limit değerlerinin sadece %2 pirina katkı oranında sağlandığı ve katkı kullanım oranı arttıkça sonuçların şartname limitlerinin dışında kaldığı gözlemlenmiştir.



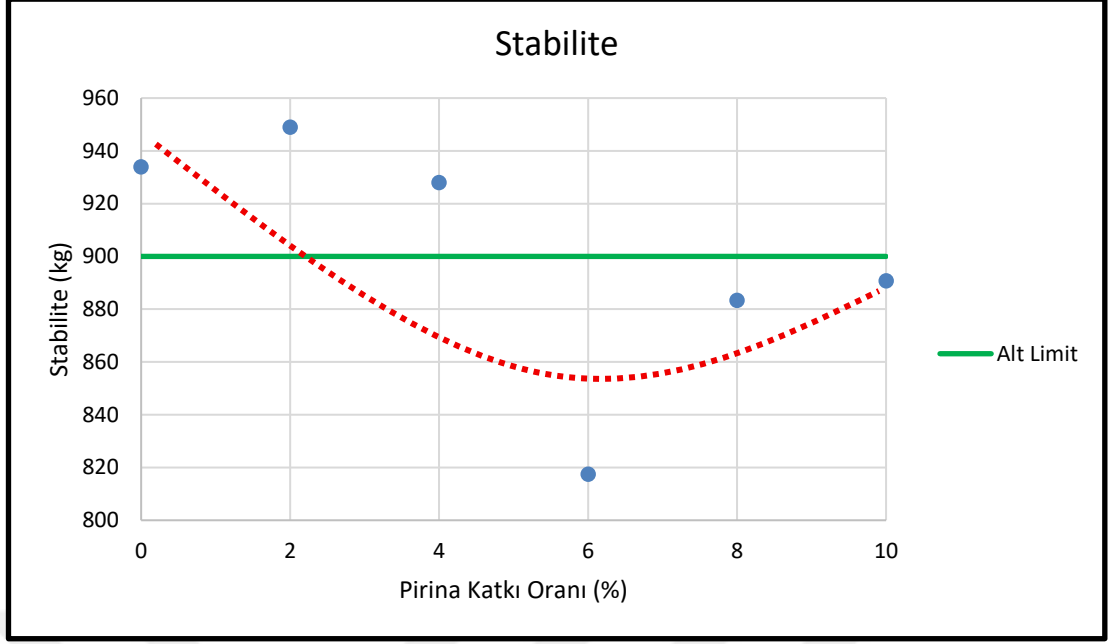
Şekil 4.18. Agregalar Arası Boşluk Oranının Pirina Katkı Oranı ile Değişimi

Şekil 4.18’de pirina kullanılarak yapılan Marshall deney sonuçlarında pirina katkı oranı arttıkça agregalar arası boşluk oranı değerinin de arttığı gözükmemektedir. %2, %4 ve %6 pirina katkı oranı için şartname alt ve üst limit değerlerinin sağlandığı, %8 ve %10 katkı oranı kullanımında agregalar arası boşluk oranının şartname üst limitini aştığı gözlemlenmiştir.



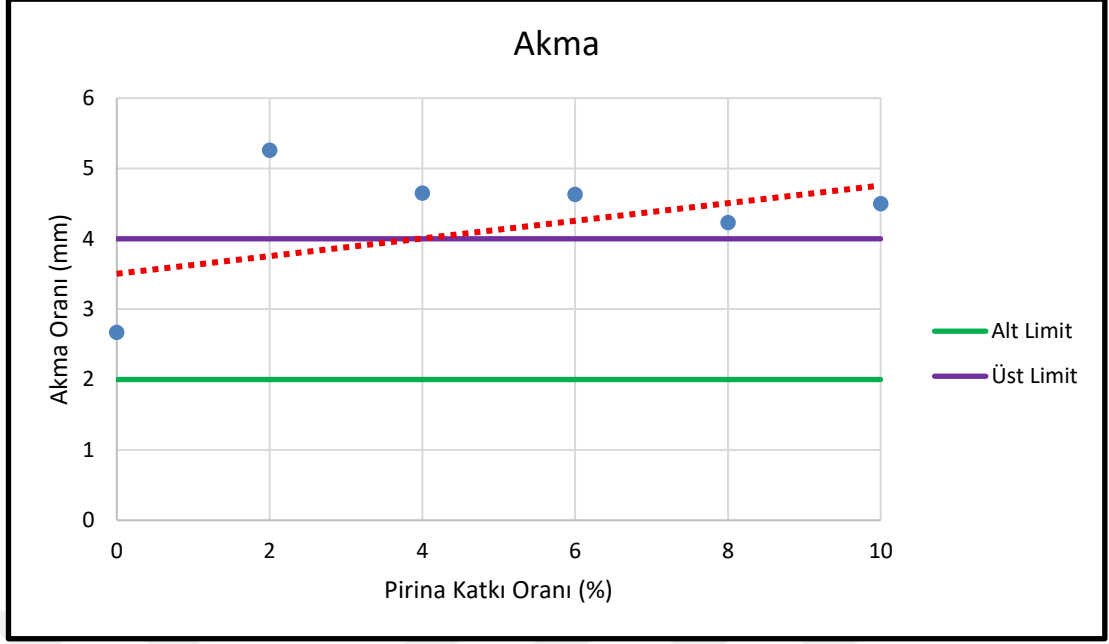
Şekil 4.19. Bitümle Dolu Boşluk Oranının Pirina Katkı Oranı ile Değişimi

Şekil 4.19’da pirina kullanılarak yapılan Marshall deney sonuçlarında pirina katkı oranı arttıkça Bitümle dolu boşluk oranı değerinin azaldığı gözükmemektedir. Şartname limitleriyle kıyaslandığında sadece %2 katkı oranına sahip numunenin şartnamede belirtilen sınırlar içerisinde kaldığı, %4, %6, %8 ve %10 katkı oranlarına sahip modifiye bitüm numunelerinin şartname alt sınır değerinden de düşük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.20. Marshall Stabilitesinin Pirina Katkı Oranı ile Değişimi

Şekil 4.20’de pirina kullanılarak yapılan Marshall deney sonuçlarına bakıldığında %2 oranında pirina kullanımında stabilite değerinin arttığı, devamında ise pirina katkı oranı arttıkça stabilite değerinin azaldığı gözükmemektedir. Sonuçlar şartnamede belirtilen alt sınır değeriyle karşılaştırıldığında %2 ve %4 pirina katkı oranına sahip modifiye bitüm numunelerinin şartname alt sınır değerini karşıladığı, %6, %8 ve %10 katkı oranına sahip modifiye bitüm numunelerinin ise şartnamede belirtilen değerin altında kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.21. Akma Oranının Pirina Katkı Oranı ile Değişimi

Şekil 4.21’de pirina kullanılarak yapılan Marshall deney sonuçlarında pirina katkı kullanımının Akma oranı değerini arttırdığı gözükmemektedir. Hazırlanan modifiye bitüm numunelerine ait akma değerlerinin şartnamede belirtilen üst limiti aştığı gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Pirina ve Aloe vera'nın bitüm modifiyeri olarak kullanılabilirliğinin incelendiği bu çalışmada; modifiye edilen bağlayıcının özellikleri saf bitüm ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Pirina katkılı bitüme ait penetrasyon deneyleri incelendiğinde; katkı oranının artmasına bağlı olarak penetrasyon değerinin ilk olarak arttığı daha sonra ise azalmaya başladığı görülmüştür. En yüksek penetrasyon değeri %6 katkı oranında elde edilmiştir. Belli bir katkı oranından sonra penetrasyon değerinde düşüş başlasa da saf bitüme kıyasla tüm pirina katkı yüzdelere ait penetrasyon değerinin saf bitümden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
2. Pirina katkılı bitüme ait yumuşama noktası deney sonuçlarına bakıldığında da yumuşama noktası değerlerinin penetrasyon değerleri ile uyumluluk gösterdiği ve yumuşama noktası değerinin %2-%6 katkı oranı kullanımında azaldığı daha sonra ise katkı oranının artmasıyla (%8 ve %10) yumuşama noktası değerinin de artmaya başladığı tespit edilmiştir. Tüm sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda tüm pirina katkı yüzdelere ait yumuşama noktası değerlerinin saf bitümün yumuşama noktası değerinden daha düşük olduğu ve en düşük yumuşama noktası değerinin de yine %6 pirina katkı oranında elde edildiği tespit edilmiştir.
3. RTFOT deneyinden sonraki penetrasyon değerlerine bakıldığında, kısa dönem yaşlanma sonrası en yüksek penetrasyon değerine %6 katkı oranında ulaşılmış olup katkı oranı arttıkça penetrasyon değeri düşüş göstermiştir. Buna rağmen modifiye edilmiş numunelerin kısa dönemli yaşlandırma sonrasında da penetrasyon değerlerinin saf bitümden yüksek olduğu ve katkı kullanımının bitüm üzerinde gençleştirici etkisi olduğu tespit edilmiştir.
4. RTFOT deneyinden sonraki yumuşama noktası değerlerine bakıldığında, %6 katkı oranındaki numunenin kısa dönem yaşlanma sonrası en düşük yumuşama

noktası değerini verdiği ve katkı kullanımının bitüm üzerinde gençleştirici etkisi olduğu tespit edilmiştir.

5. Brookfield viskozite deneyi sonuçlarına bakıldığında, %2, %4 ve %6 katkı oranı kullanımında viskozite değeri düşmüş, %8 ve %10 katkı oranı kullanımında ise viskozite değeri artış göstermiştir. 135°C için en düşük viskozite değeri %4 ve %6 katkı oranında, 165°C için ise %6 katkı oranı kullanımında elde edilmiştir ve sonrasında viskozite değerlerinde sürekli bir artış görülmüştür. Bu da %6'dan daha fazla katkı kullanıldığında bitümün kıvamının arttığı ve dolayısıyla akmaya karşı direnç de arttığı için buna bağlı olarak viskozite değerlerinin de arttığı sonucuna varılmıştır.
6. Aloe vera katkılı modifiye bitüm numunelerinin hazırlanma aşamasında; jel, yüksek sıcaklıklı bitümle temas ettiğinde, yapısındaki suyun ani buharlaşmaya maruz kalarak bitüm içerisinde köpürme ve patlama etkisi yarattığı, karıştırma işlemi sonunda yüksek sıcaklığa bağlı olarak Aloe vera'nın jel formunu kaybederek tortu haline geldiği ve bitüm içerisinde homojen karışmadığı gözlemlenmiş ve bu durumun deney sonuçlarında da düzensizliklere sebep olduğu tespit edilmiştir.
7. Aloe vera katkılı bitüme ait penetrasyon deneyleri incelendiğinde; katkı oranının artmasına bağlı olarak %2 ve %4 oranlarında düzenli bir artış olduğu, sonrasında ise sonuçların düzensiz şekilde azalıp arttığı görülmektedir. En yüksek penetrasyon değeri %4 katkı oranında elde edilmiş olup bu orandan sonra penetrasyon değerinde düşüşler tespit edilse de saf bitüme kıyasla tüm Aloe vera katkı yüzdelere ait penetrasyon değerinin saf bitümden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
8. Aloe vera katkılı bitüme ait yumuşama noktası deney sonuçlarına bakıldığında yumuşama noktası değerinin başlangıçta azaldığı ve %6 katkı oranından sonra ise arttığı tespit edilmiştir. Sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda tüm

yüzdelere ait yumuşama noktası değerlerinin saf bitümün yumuşama noktası değerinden daha düşük olduğu ve en düşük yumuşama noktası değerinin de %6 katkı oranında elde edildiği tespit edilmiştir.

9. RTFOT deneyinden sonraki Aloe vera katkılı numunelere ait penetrasyon değerlerine bakıldığında, %4 katkı oranına kadar penetrasyon değerinin arttığı ve bu noktadan sonra düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Değerlerde tespit edilen düşüşlere rağmen modifiye edilmiş numunelerin kısa dönemli yaşlandırma sonrasında penetrasyon değerlerinin saf bitümden yüksek olduğu tespit edilmiştir.
10. RTFOT deneyinden sonraki yumuşama noktası değerlerine bakıldığında, diğer deney sonuçları ve grafiklerde görülen düzensizliklerin burada da devam ettiği ve başlangıçta katkı kullanım oranı arttıkça yumuşama noktası değerinin düştüğü, %8 katkı kullanım oranından sonra ise artışa geçerek en yüksek yumuşama noktası değerine %10 katkı kullanım oranında ulaşıldığı tespit edilmiştir.
11. Brookfield viskozite deneyi sonuçlarına bakıldığında, saf bitüme kıyasla Aloe vera katkılı bitümün viskozite değerinin düzensiz şekilde artış ve azalış gösterdiği ama saf bitüme kıyasla modifiye bitümlerin genel olarak daha yüksek viskozite değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Viskozite değerinde net bir artış ya da azalış olmadığı için Aloe vera katkı kullanımının bitümün akmaya karşı direnci üzerinde nasıl bir etki yarattığına dair net bir çıkarım yapılamamıştır.
12. Pirina katkılı bitüm numunelerinin Marshall tasarımı deney sonuçlarına bakıldığında, saf bitümle yapılan tasarıma kıyasla modifiye bitümle hazırlanan numunelerin boşluk hacim oranı ve agregalar arası boşluk oranı değerinin arttığı, bitüm dolu boşluk oranı değerinin azaldığı, akma değerinin katkı oranı arttıkça arttığı ve standart üst limit değerlerin üstünde kaldığı, stabilite

değerinin ise %2 katkı oranına kadar arttığı ve sonrasında katkı oranı arttıkça düşüş gösterdiği hatta %4'ten daha fazla katkı oranı kullanımında stabilite değerinin şartname limitlerinin de altında kaldığı tespit edilmiştir. Bu da başlangıçta prinanın stabilite üzerinde iyileştirme yapsa belli bir orandan sonra stabiliteyi olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Aynı zamanda, akma grafiğine ait sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, pirina katkı kullanımının, uzun süreli yük altında, oluşabilecek deformasyonlara karşı bitümlü kaplamanın olumsuz yönde etkilenebileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak tüm deney sonuçları bir arada değerlendirildiğinde;

Pirinanın bitümün penetrasyon değerini arttırdığı, yumuşama noktası değerini düşürdüğü, RTFOT deneyleri sonrasında da benzer sonuçları verdiği ve kısa süreli yaşlanmaya karşı direncinin arttığı tespit edilmiştir ve en iyi sonuçlar %2 – %6 katkı oranı aralığında alınmıştır. Aynı şekilde Marshall stabilite deneyi sonuçları göz önünde bulundurulduğunda da %2 – %4 arası pirina katkı oranı kullanımının standart değer aralığını sağladığı ve %2'lik pirina katkı oranı kullanımının tasarım limitleri için en ideal oran olduğu tespit edilmiştir

Aloe vera katkılı bitüm numunelerinin sonuçlarına bakıldığında ise düzensiz sonuçlar elde edilmesine rağmen genel anlamda saf bitüme kıyasla penetrasyon değerinin arttığı ve yumuşama noktası değerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Tüm bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, her iki katkı malzemesi de düşük penetrasyon sınıfına ait bitümlerin penetrasyon değerini arttırıp soğuk iklim bölgelerinde de kullanılabilir hale getirmek amacıyla ve kısa dönem yaşlanmalara karşı bitümün performansını iyileştirme çalışmalarında kullanılabilir.

Bitüm israfının önüne geçebilmek adına RAP bitüm çalışmalarında gençleştirici olarak kullanılabilir.

Pirina malzemesi filler olarak kullanılıp karışım tasarımı üzerindeki etkileri araştırılabilir.

Aşınma tabakası için %4 katkı oranından sonra Marshall tasarım alt limitleri sağlanamamış olsa da değerlere bakıldığında sonuçların binder tabakası için yeterli

olduğu görölmüştür, gerekli ön çalışmalar yapılp binder tabakasında kullanılabilirliği araştırılabilir.

Aloe vera için daha homojen ve stabil sonuçlar alabilmek adına jel hali dışında farklı formlarda kullanarak da benzer çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKÇA

- [1] Öz Kıcı, G. (2019). *Pirinanın Bitüm Modifikasyonunda Kullanımının Araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [2] Sansoucy, R. (1985). *Olive By-Products For Animal Feed* (FAO Animal Production and Health Paper No. 43). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [3] Filya, İ., Hanoğlu, H., Canbolat, Ö., Sucu, E. (2006). Kurutulmuş Pirinanın Yem Değeri ve Kuzu Besisinde Kullanılma Olanakları Üzerinde Araştırmalar 2. Kuzuların Besi Performansı Üzerine Etkileri. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, Cilt. 20(1), s. 13-23*. DOI: <http://hdl.handle.net/11452/3124>
- [4] Başarı Hastanesi. (2021, Kasım 29). *Aloe vera nedir, ne işe yarar? Aloe vera faydaları*. <https://basarihastanesi.com/blog/aloe-vera-nedir-ne-ise-yarar-aloe-vera-faydolari/> (Erişim tarihi: 25 Mayıs 2025).
- [5] Lanka, S. (2018). A Review on Aloe Vera The Wonder Medicinal Plant. *Journal of Drug Delivery & Therapeutics. 8 (5-s): 94-99*.
- [6] Ilıcalı, M. (2001). *Asfalt ve uygulamaları*. İSFALT Bilimsel Yayınları.
- [7] Makhmutova, A. R., Evdokimova, N. G., Karas'kina, D.D. vd. (2023). The Thermal Oxidative Aging of Petroleum Bitumens and Tars. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 59, 950–954*. <https://doi.org/10.1007/s10553-023-01603-8>
- [8] Feng, Z. G., Bian, H. J., Li, X.J. vd. (2016). FTIR Analysis of UV Aging on Bitumen and Its Fractions. *Materials and Structures, 49, 1381–1389*. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0583-9>
- [9] Zheng, Q., Peikai, O., Zhang, D., Weng, Y., Lu, J., Wang, T. (2024). A Holistic View of Asphalt Binder Aging under Ultraviolet Conditions: Chemical, Structural, and Rheological Characterization. *Buildings, 14(10), 3276*. <https://doi.org/10.3390/buildings14103276>
- [10] Wang, H., Zhengang, F., Zhou, B., Jiamying, Y. (2012). A Study on Photo-thermal Coupled Aging Kinetics of Bitumen. *ASTM. 40(5), 724-727*. <https://doi.org/10.1520/JTE20120065>
- [11] Kaur, H., Gray, M. R., Eaton, P. (2008, Temmuz). Control of Hydrolysis of Emulsified Salts in Canadian Bitumens.
- [12] Sowmya Turuga, A. S., ve Klerk, A. D. (2021). Hydrothermal Treatment of Bitumen Froth: Impact of Mineral Solids and Water on Bitumen Properties. *Energy and Fuels, 35(21), 17536-7550*. Doi: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02532>

- [13] Zhang, H., Hu, Z., Hou, S., Xu, T. (2020). Effects of Microbial Degradation on Morphology, Chemical Compositions and Microstructures of Bitumen. *Construction and Building Materials*, 248. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118569>
- [14] Ma, D., Shi, L., Xia, O., Xu, T. (2025). Degradation behaviors of asphalt by microorganisms in asphalt pavement structure. *Bioresour Technol*, 416, 131793. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131793>
- [15] Govekar, A., Devulapalli, L., Dighe, S., Kothandaram, S., Sarang, G. ve Gupta, SS (2024). Assessment of Microbial Degradation of Various Types of Bitumen Using FTIR. *International Journal of Pavement Engineering*, 25(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2290658>
- [16] Sreeram, A., Filonzi, A., Komaragiri S., Roja, K. L., Masad, E., Bhasin, A. (2022). Assessing Impact of Chemical Compatibility of Additives Used in Asphalt Binders: A Case Study Using Plastics. *Construction and Building Materials*, 359(5):129349. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.129349
- [17] Öz Kıcı, G. ve Saltan, M. (2020). Pirinanın Bitüm Modifikasyonunda Kullanımının Araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 12(1)1, 1-9.
- [18] İssi, S. (2019). *Zeytin Posası (Pirina) ’nın Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. İnönü Üniversitesi.
- [19] Şehnaz Tıraş, M. R. (2023). *Pirina Yağının Bitüm Modifikasyonunda Kullanılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Mersin Üniversitesi.
- [20] Yener, E., & Yadollahi, M. M. (2013, December 18–19). *The effect of olive pomace on asphalt binder properties*. International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Sustainable Development, Tabriz, Iran.
- [21] Özel, F. (2024). *Performance of SBS polymer and olive pomace as modified bitumen in hot mix asphalt* [Doctoral dissertation]. Gaziantep University.
- [22] Gökalp, İ., Özinal, Y. ve Uz, V. E. (2018). Atık Bitkisel Yemelik Yağların Saf Bitüm Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6 (4), 570-578.
- [23] McCreedy, N.S. (2007). *The Utilization of Agriculturally Derived Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder* [Master’s Thesis]. Iowa State University.
- [24] Zhao, S., Huang, B., Ye, X. P., Shu, X., & Jia, X. (2014). Utilizing bio-char as a bio-modifier for asphalt cement: A sustainable application of bio-fuel by-product. *Fuel*, 133, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.002>

- [25] Zhao, S., Huang, B., & Ye, P. (2014). Laboratory evaluation of asphalt cement and mixture modified by bio char produced through fast pyrolysis. *Geotechnical Special Publication*, 239, 140–149. <https://doi.org/10.1061/9780784413418.015>
- [26] Bostancıoğlu, M. (2012). *Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler ile Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi* [Doktora Tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [27] Atasagun, N. (2009). *Piroliz Yöntemi Kullanılarak Sıvılaştırılmış Çörekotu Küspesi ile Modifiye Edilen Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri* [Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi.
- [28] Xue, Y., Wu, S., Cai, J., Zhou, M., & Zha, J. (2014). Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis. *Construction and Building Materials*, 56, 7–15.
- [29] Abo-Shanap, 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.
- [30] Arabani, M., & Esmaeili, 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.
- [31] Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., & Sönmez, K. (2001). *Asfalt ve uygulamaları*. Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, Seçil Ofset.
- [32] Zorlu, E. (2023). *Atık Kızartma Yağı ve Atık Tarımsal Kül ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcıların Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi.
- [33] Ertaş, T. (2022). *Atık Ceviz Kabuğu Tozunun Bitümün Fiziksel Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Ege Üniversitesi.
- [34] Tunç, A. (2007). *Yol malzemeleri ve uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım Yayınları.
- [35] Geçkil, T. (2008). *Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi* [Doktora Tezi]. Fırat Üniversitesi.
- [36] Yelken, F. (2009). *Belen-Topboğazı (Hatay) Arası Yol Yapım Çalışmaları* [Yüksek Lisans Tezi]. Çukurova Üniversitesi.
- [37] Tunç, A. (2001). *Yol malzemeleri ve uygulamaları*. Atlas Yayıncılık.
- [38] Seloğlu, M. (2015). *Reaktif Terpolimerin Bitümlü Sıcak Karışım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. İnönü Üniversitesi.

- [39] Tunç, A. (2004). *Kaplama mühendisliği ve uygulamaları*. Asil Yayın Dağıtım Yayınları.
- [40] Yüknü, K., Öztürk, T., & Komut, M. (2021). *Bitümlü bağlayıcılar laboratuvar el kitabı*. Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü.
- [41] Filya, İ., Hanoğlu, H., Canbolat, Ö., & Sucu, E. (2006). Kurutulmuş pirinanın yem değeri ve kuzu besisinde kullanılma üzerinde araştırmalar. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(1), 13–23.
- [42] TÜBİTAK MAM Projesi Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü (2015).
- [43] Surjushe, A., Vasani, R., & Saple, D. G. (2008). Aloe vera: A short review. *Indian Journal of Dermatology*, 53(4), 163–166. <https://doi.org/10.4103/0019-5154.44785>
- [44] Türsen, B. ve Türsen, Ü. (2014). Dermatolojide Aloe vera. *Dermatoz*. 5 (4): 0-0.
- [45] Boundreau, M. D., & Beland, F. A. (2006). An evaluation of the biological and toxicological properties of *Aloe barbadensis* (Miller), *Aloe vera*. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 24, 103–154.
- [46] Lanka, S. (2018). A review on aloe vera: The wonder medicinal plant. *Journal of Drug Delivery & Therapeutics*, 8(5-s), 94–99.
- [47] Dumanlı, O. (2022). *Polimer Modifiye Bitümlü Bağlayıcıların Modifikasyon Prosedüründe Karıştırma Parametrelerinin Etkisinin Araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Celal Bayar Üniversitesi.
- [48] Cooley, L. A., Ahlrich, R. C., James, R. S., Prowell, B. D., & Brown, E. R. (2007). Implementation of Superpave mix design for airfield pavements. In *Proceedings of the 2007 FAA worldwide airport technology transfer conference*. Atlantic City, NJ.
- [49] Ahmedzade, P., Alataş, T., & Geçkil, T. (2007). Siyah karbonun asfalt karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi. *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 25(2), 179–189.
- [50] Çevrim, K. (t.y.). *Marshall tasarım deney föyü* [PDF]. Batman Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Laboratuvarı. https://batman.edu.tr/images/files/Marshall_Tasarim_Deney_Foyu.pdf

EKLER

EK-A-

Tablo Ek-A: Marshall Stabilité Düzeltme Faktörleri [50]

Yükseklik (mm)	Düzeltme Faktörü	Yükseklik (mm)	Düzeltme Faktörü	Yükseklik (mm)	Düzeltme Faktörü	Yükseklik (mm)	Düzeltme Faktörü	Yükseklik (mm)	Düzeltme Faktörü
51.0	1.435	55.0	1.265	59.0	1.130	63.0	1.013	67.0	0.918
51.1	1.432	55.1	1.262	59.1	1.127	63.1	1.011	67.1	0.915
51.2	1.428	55.2	1.259	59.2	1.124	63.2	1.008	67.2	0.913
51.3	1.425	55.3	1.256	59.3	1.120	63.3	1.006	67.3	0.911
51.4	1.421	55.4	1.253	59.4	1.117	63.4	1.003	67.4	0.908
51.5	1.418	55.5	1.250	59.5	1.114	63.5	1.000	67.5	0.906
51.6	1.414	55.6	1.247	59.6	1.110	63.6	0.998	67.6	0.904
51.7	1.411	55.7	1.243	59.7	1.107	63.7	0.995	67.7	0.901
51.8	1.407	55.8	1.239	59.8	1.104	63.8	0.992	67.8	0.899
51.9	1.404	55.9	1.235	59.9	1.100	63.9	0.990	67.9	0.897
52.0	1.400	56.0	1.231	60.0	1.097	64.0	0.988	68.0	0.894
52.1	1.397	56.1	1.228	60.1	1.094	64.1	0.985	68.1	0.892
52.2	1.393	56.2	1.224	60.2	1.090	64.2	0.982	68.2	0.890
52.3	1.390	56.3	1.220	60.3	1.088	64.3	0.980	68.3	0.888
52.4	1.382	56.4	1.216	60.4	1.085	64.4	0.978	68.4	0.886
52.5	1.375	56.5	1.214	60.5	1.082	64.5	0.975	68.5	0.885
52.6	1.368	56.6	1.210	60.6	1.079	64.6	0.972	68.6	0.883
52.7	1.359	56.7	1.206	60.7	1.076	64.7	0.970	68.7	0.881
52.8	1.351	56.8	1.202	60.8	1.073	64.8	0.967	68.8	0.879
52.9	1.344	56.9	1.198	60.9	1.070	64.9	0.965	68.9	0.877
53.0	1.337	57.0	1.194	61.0	1.067	65.0	0.962	69.0	0.875
53.1	1.328	57.1	1.190	61.1	1.064	65.1	0.960	69.1	0.874
53.2	1.320	57.2	1.187	61.2	1.062	65.2	0.957	69.2	0.872
53.3	1.317	57.3	1.184	61.3	1.059	65.3	0.955	69.3	0.870
53.4	1.314	57.4	1.181	61.4	1.056	65.4	0.953	69.4	0.868
53.5	1.311	57.5	1.178	61.5	1.053	65.5	0.951	69.5	0.866
53.6	1.308	57.6	1.175	61.6	1.050	65.6	0.949	69.6	0.864
53.7	1.305	57.7	1.172	61.7	1.047	65.7	0.947	69.7	0.862
53.8	1.302	57.8	1.169	61.8	1.044	65.8	0.945	69.8	0.860
53.9	1.299	57.9	1.164	61.9	1.040	65.9	0.943	69.9	0.858
54.0	1.296	58.0	1.161	62.0	1.038	66.0	0.940	70.0	0.856
54.1	1.293	58.1	1.158	62.1	1.036	66.1	0.938	70.1	0.854
54.2	1.290	58.2	1.155	62.2	1.033	66.2	0.936	70.2	0.852
54.3	1.286	58.3	1.152	62.3	1.031	66.3	0.934	70.3	0.850
54.4	1.283	58.4	1.149	62.4	1.028	66.4	0.932	70.4	0.849
54.5	1.280	58.5	1.146	62.5	1.026	66.5	0.930	70.5	0.847
54.6	1.277	58.6	1.143	62.6	1.023	66.6	0.927	70.6	0.845
54.7	1.274	58.7	1.140	62.7	1.021	66.7	0.925	70.7	0.843
54.8	1.271	58.8	1.137	62.8	1.018	66.8	0.922	70.8	0.841
54.9	1.268	58.9	1.133	62.9	1.016	66.9	0.920	70.9	0.839