

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**CECABASE RT 945 KATKI MADDESİNİN FARKLI SICAKLIK VE ORANLARDA
MODİFİYE BİTÜME OLAN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

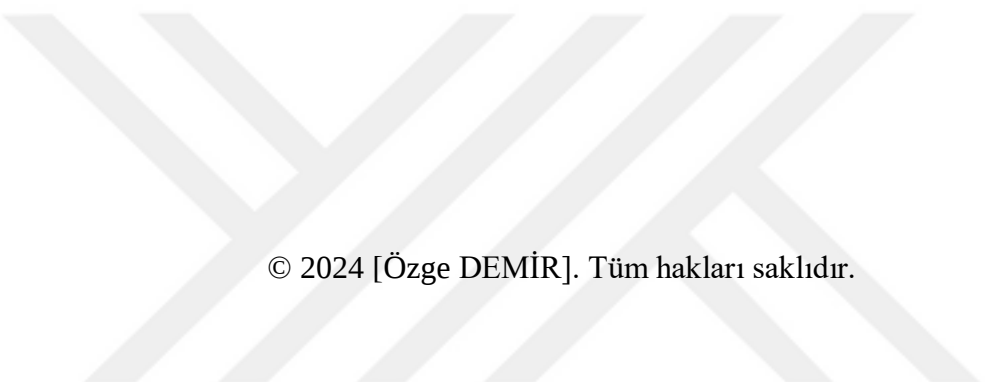
Özge DEMİR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali ÇOLAK

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Doç. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR
Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali ÇOLAK
Dr. Öğr. Üyesi Fatih İrfan BAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2024



© 2024 [Özge DEMİR]. Tüm hakları saklıdır.

ÖZET

CECABASE RT 945 KATKI MADDESİNİN FARKLI SICAKLIK VE ORANLARDA MODİFİYE BİTÜME OLAN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Özge DEMİR

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali ÇOLAK

2024, 110 sayfa

Teknolojinin ilerlemesi ile motorlu araç sayılarında ciddi artışlar meydana gelmiş bu da yol kaplamalarının kaliteli olmasını zorunlu hale getirmiştir. Yol kaplamalarında en çok kullanılan Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)'dır. BSK'lar 140°C ile 180°C aralığında karıştırılır ve 120°C ile 160°C arasında sıkıştırılır. 2000'li yıllardan itibaren dünya genelinde kullanılan Ilık Karışım Asfalt (IKA) teknolojileri ise BSK'lara göre 20°C ile 40°C daha düşük sıcaklıklarda üretilmektedir. Asfalt karışımları daha düşük sıcaklıklarda üretmenin en büyük avantajı enerji tüketiminin ve CO₂ emisyonlarının azalmasıdır. IKA teknolojilerinin üretiminde kullanılan çeşitli katkı maddeleri bulunmaktadır yaptığımız bu çalışmamızda kimyasal katkılardan birisi olan Cecabase RT 945 incelenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan saf bitüm 70/100 penetrasyon derecesine sahiptir. Bitüm ağırlığının %0, %0,3, %0,4 ve %0,5'i olacak şekilde hesaplanan dört farklı Cecabase RT 945 oranı bitüm içerisine eklenmiştir. Taguchi L16 ortogonal dizisine göre hazırlanan deney planlarına uygun olarak karışımlar 120°C, 130°C, 140°C ve 150°C karıştırma sıcaklıklarında, 5, 10, 15 ve 20 dakika boyunca 1000, 2000, 3000 ve 4000 RPM karıştırma hızlarında karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, dönel ince film etüvü (RTFOT), elastik geri dönme ve Marshall stabilite testleri uygulanmıştır. Bu parametrelerin ve seviyelerin bağlayıcı üzerindeki etkileri incelenmiş ve şartnamelere uygunluğu değerlendirilmiştir. Cecabase RT 945 katkı maddesi, saf bitümün penetrasyon değerini artırmış, yumuşama noktası değerini azaltmıştır. Ayrıca modifiye bitümün elastik geri dönme yüzdesi artmış, RTFOT kütle kaybı azalmış ve Marshall stabilite değeri artmıştır. Taguchi Metodu ile gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucunda, en uygun koşullar %0,3

Cecabase RT 945 oranı, 140°C karıştırma sıcaklığı, 20 dakika karıştırma süresi ve 3000 RPM karıştırma hızı olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sıcak karışım asfalt (BSK), Ilık karışım asfalt(IKA), Marshall, Cecabase RT 945, Taguchi Metodu, FT-IR



ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CECABASE RT 945 ADDITIVE ON MODIFIED BITUMEN AT DIFFERENT TEMPERATURES AND RATIOS

Özge DEMİR

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,**

Department of Civil Engineering

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali ÇOLAK

2024, 110 pages

With the advancement of technology, there has been a significant increase in the number of motor vehicles, which has made it necessary for road pavements to be of high quality. The most commonly used bituminous hot mixtures (HMA) are road pavements. HMAs are mixed between 140°C and 180°C and compressed between 120°C and 160°C. Warm Mix Asphalt (WMA) technologies, which have been used worldwide since the 2000s, are produced at temperatures 20°C to 40°C lower than HMAs. The biggest advantage of producing asphalt mixtures at lower temperatures is the reduction of energy consumption and CO₂ emissions. There are various additives used in the production of HMA technologies, and in this study we examined Cecabase RT 945, one of the chemical additives. The pure bitumen used in the study has a penetration degree of 70/100. Four different Cecabase RT 945 ratios calculated as 0%, 0.3%, 0.4% and 0.5% of the bitumen weight were added to the bitumen. In accordance with the experimental plans prepared according to Taguchi L16 orthogonal array, the mixtures were prepared by mixing at 120°C, 130°C, 140°C and 150°C mixing temperatures and 1000, 2000, 3000 and 4000 RPM mixing speeds for 5, 10, 15 and 20 minutes. Penetration, softening point, flash point, rotational thin film oven (RTFOT), elastic recovery and Marshall stability tests were applied to the prepared samples. The effects of these parameters and levels on the binder were investigated and their compliance with the specifications were evaluated. Cecabase RT 945 additive increased the penetration value of pure bitumen and decreased the softening point value. In addition, the elastic recovery percentage of the modified bitumen increased, RTFOT mass loss decreased and Marshall stability value increased. As a result of the optimizations carried out with the Taguchi Method, the most suitable conditions were

determined as 0.3% Cecabase RT 945 ratio, 140°C mixing temperature, 20 minutes mixing time and 3000 RPM mixing speed.

Keywords: Hot mix asphalt (HMA), Warm mix asphalt (WMA), Marshall, Cecabase RT945, Taguchi Method, FT-IR



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde ilgi, teşvik ve yardımlarıyla her zaman yanımda olan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali ÇOLAK'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez aşaması boyunca bilgi, tecrübe, hoşgörüsüyle kıymetli fikirlerini esirgemeyen ve laboratuvar imkânlarından faydalanmamı sağlayan Sayın Doç. Dr. O. Ünsal BAYRAK'a ve Doç. Dr. H. Ferit BAYATA'ya teşekkür ederim.

Tez sürecim boyunca bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih İrfan BAŞ'a teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları aşamasındaki yardımlarından ötürü Arş. Gör. Ahmet Oğuz DEMİRİZ'e, Arş. Gör. Ömer Faruk KELEŞ'e, değerli meslektaşlarım Mustafa ÇAKI ve Suna IŞIK'a teşekkür ederim.

Aynı zamanda meslektaşım olan kardeşime ve çok değerli arkadaşlarıma tez aşamamdaki manevi destekleriyle beni yalnız bırakmadıkları için ayrıca teşekkür ederim. Son olarak, bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, maddi manevi hiçbir desteği benden esirgemeyen anne ve babama minnet ve sonsuz şükranlarımı sunarım.

Özge DEMİR

Ekim, 2024

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	x
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
TABLolar DİZİNİ	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1.GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı	1
1.2. Araştırmanın Önemi	2
1.3. Varsayımlar	2
1.4. Sınırlılıklar	2
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Kaynak Özetleri	3
2.2. Kuramsal Temeller	11
2.2.1. Karayolu	11
2.2.2. Karayolu altyapısı	11
2.2.3. Karayolu üstyapısı	12
2.2.3.1. Rijit üstyapılar	13
2.2.3.2. Esnek üstyapılar	13
2.2.3.3. Yarı rijit üstyapılar	14
2.2.4. Esnek üstyapı	14
2.2.5. Esnek üstyapı avantaj ve dezavantajları	15
2.2.5. Esnek üstyapı elemanları	17
2.2.5.1. Taban zemini	17
2.2.5.2. Alttemel tabakası	17
2.2.5.3. Temel tabakası	17
2.2.5.4. Kaplama tabakası	18
2.2.6. Bitüm	18
2.2.7. Bitümlü bağlayıcılar	18
2.2.8. Sıcak karışım asfalt (BSK)	19
2.2.9. Bitümlü sıcak karışımlardan beklenen özellikler	20

2.2.9.1. Bitümlü sıcak karışımların rijitliği	20
2.2.9.2. Bitümlü sıcak karışımların dayanıklılığı (Durabilitesi)	21
2.2.9.3. Bitümlü sıcak karışımların stabilitesi	21
2.2.9.4. Bitümlü sıcak karışımların yorulma mukavemeti	22
2.2.9.5. Bitümlü sıcak karışımların esnekliği (Fleksibilitesi).....	23
2.2.9.6. Bitümlü sıcak karışımların geçirgenliği (Permeabilitesi)	23
2.2.9.7. Bitümlü sıcak karışımların kayma direnci	24
2.2.9.8. Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği	24
2.2.10. Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen deformasyon tipleri.....	24
2.2.10.1. Terleme (Kusma).....	25
2.2.10.2. Tekerlek izi (Oluklanma).....	26
2.2.10.3. Çatlaklar	26
2.2.10.4. Ondülasyonlar	28
2.2.10.5. Bölgesel çökme (Oturmalar)	29
2.2.10.6. Ayrışmalar.....	29
2.2.11. Modifiye bitüm.....	30
2.2.12. Modifiye bitümün kullanım amaçları.....	30
2.2.13. Ilık karışım asfalt (IKA)	31
2.2.14. IKA üretim teknolojileri	32
2.2.14.1. Organik katkıları.....	32
2.2.14.2. Kimyasal katkıları	33
2.2.14.3. Köpüklendirme teknikleri	33
2.2.15. IKA faydaları	33
2.2.15.1. Çevresel faktörler	34
2.2.15.2. Ekonomik faydalar	34
2.2.15.3. Üretim faydaları	34
2.2.15.4. Uygulama kolaylığı	34
3. YÖNTEM.....	36
3.1. Materyal.....	36
3.1.1. Bitüm	36
3.1.2. Bitüm özgül ağırlık deneyi	36
3.1.3. Agregat ve filler	38
3.1.4. Kaba agreganın özgül ağırlık deneyi.....	39
3.1.5. İnce agreganın özgül ağırlık deneyi	41

3.1.6. Fillerin özgül ağırlık deneyi.....	43
3.1.7 Cecabase RT 945.....	45
3.1.8. Cecabase RT945’in fiziksel özellikleri	46
3.2. Yöntem	46
3.2.1. Taguchi Metodu	47
3.2.2. Modifiye bitümün karıştırılması	49
3.2.3. Penetrasyon deneyi.....	50
3.2.4. Yumuşama noktası deneyi.....	51
3.2.5. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) deneyi.....	52
3.2.6. Elastik geri dönme deneyi	54
3.2.7. Parlama noktası deneyi.....	55
3.2.8 Marshall tasarım deneyi	56
3.2.9 Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) deneyi.....	67
4. BULGULAR.....	69
4.1 Saf Bitüm Deney Sonuçları	69
4.2. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deneyi Sonuçları	69
4.3 RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneyi Sonuçları	73
4.4 RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları.....	76
4.5 RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları.....	78
4.6 Penetrasyon İndeksi	82
4.7 RTFOT Kütleli Kayıp Sonuçları.....	83
4.8 Elastik Geri Dönme Deneyi Sonuçları	85
4.9 Marshall Stabilité Deneyi Sonuçları	87
4.10 Çoklu Yanıt Performans İndeksi (MRPI) ile Optimizasyon.....	99
4.11 Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) Deney Sonuçları.....	103
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	107
KAYNAKÇA	111

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. B 70/100 penetrasyon dereceli saf bitümün özellikleri	38
Tablo 3.2. Kaba agreganın, ince agreganın ve fillerin fiziksel özellikleri	44
Tablo 3.3. Agregaların elek analizi.....	44
Tablo 3.4. Cecabase RT 945'e ait fiziksel özellikler	46
Tablo 3.5. Deney parametreleri ve seviyeleri.....	49
Tablo 3.6. Deney planı	49
Tablo 3.7 Marshall tasarım kriterleri	65
Tablo 3.8 Optimum bitüm %'sinin formül tablosu.....	66
Tablo 4.1. Saf bitüm deney sonuçları	69
Tablo 4.2. RTFOT öncesi penetrasyon ve S/N değerleri	69
Tablo 4.3. RTFOT öncesi penetrasyon ortalama S/N etkileri	70
Tablo 4.4. RTFOT öncesi penetrasyon performans tahminleri	71
Tablo 4.5. RTFOT öncesi penetrasyon ANOVA tablosu	72
Tablo 4.6. RTFOT sonrası penetrasyon ve S/N değerleri	73
Tablo 4.7. RTFOT sonrası penetrasyon ortalama S/N etkileri.....	74
Tablo 4.8 RTFOT sonrası penetrasyon performans tahminleri.....	74
Tablo 4.9. RTFOT sonrası penetrasyon ANOVA tablosu	75
Tablo 4.10. RTFOT öncesi yumuşama noktası değerleri ve S/N değerleri	76
Tablo 4.11. RTFOT öncesi yumuşama noktası ortalama S/N etkileri	76
Tablo 4.12. RTFOT öncesi yumuşama noktası performans tahminleri	77
Tablo 4.13. RTFOT öncesi yumuşama noktası ANOVA tablosu	78
Tablo 4.14. RTFOT sonrası yumuşama noktası değerleri ve S/N değerleri	79
Tablo 4.15. RTFOT sonrası yumuşama noktası ortalama S/N etkileri.....	79
Tablo 4.16. RTFOT sonrası yumuşama noktası performans tahminleri.....	80
Tablo 4.17. RTFOT sonrası yumuşama noktası ANOVA tablosu	81
Tablo 4.18. Penetrasyon indeksi sonuçları.....	82
Tablo 4.19. RTFOT kütle kaybı değerleri ve S/N değerleri.....	83
Tablo 4.20. RTFOT ortalama S/N etkileri	84
Tablo 4.21. RTFOT kütle kaybı performans tahminleri	85
Tablo 4.22. Elastik geri dönme deney sonuçları ve S/N değerleri	86
Tablo 4.23. Elastik geri dönme yüzdesi ortalama S/N etkileri.....	86

Tablo 4.24. Elastik geri dönme yüzdesi performans tahminleri.....	87
Tablo 4.25. Optimum bitüm oranının belirlenmesi için deney sonuçları	89
Tablo 4.26. Optimum bitüm yüzdesi ile Marshall stabilite deney sonuçları.....	94
Tablo 4.27. Marshall stabilite ortalama S/N etkileri.....	97
Tablo 4.28. Marshall stabilite performans tahminleri.....	97
Tablo 4.29. MRPI değerleri.....	101
Tablo 4.30. MRPI ortalama S/N etkileri	102
Tablo 4.31. MRPI performans tahminleri	103
Tablo 4.32 MRPI performans istatistikleri ve doğrulama deney sonuçları	103



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Üstyapı tabakaları ve türleri.....	12
Şekil 2.2. Tipik Karayolu Enkesiti.....	13
Şekil 2.3. Tipik Yol Kesiti.....	15
Şekil 2.4. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması.....	19
Şekil 2.5. Yüksek şiddette kuma örneği	25
Şekil 2.6. Tekerlek izi(oluklanma) örneği.....	26
Şekil 2.7. Timsah sırtı çatlak örneği	28
Şekil 2.8. Yansıma çatlakları örneği	28
Şekil 2.9. Bölgesel çökme örneği	29
Şekil 2.10 Karışımların üretim sıcaklıklarına göre sınıflandırılması.....	32
Şekil 3.1 Su doldurulmuş piknometrenin tartımı.....	36
Şekil 3.2 Bitüm ve su doldurulmuş piknometreler	37
Şekil 3.3 Çalışmada kullanılan agregalar	38
Şekil 3.4 Deney numuneleri	39
Şekil 3.5 24 saat su içinde bekletilmiş agregalar	39
Şekil 3.6 Deney numuneleri	41
Şekil 3.7 24 saat su içinde bekletilmiş agregalar	41
Şekil 3.8. Karışımın gradasyon eğrisi	45
Şekil 3.9. Cecabase RT 945 katkı maddesinin görünümü	46
Şekil.3.10. Cecabase RT 945 maddesi ile hazırlanmış IKA' ın elektron mikroskobu altındaki görünüşü.....	46
Şekil 3.11. Kendinden ısıtıcılı High Shear Mikser	50
Şekil 3.12. Penetrasyon testi.....	51
Şekil 3.13. Oda sıcaklığında bekleyen numuneler.....	52
Şekil 3.14. Yumuşama deneyi cihazı	52
Şekil 3.15. RTFOT Deneyi.....	53
Şekil 3.16. Soğutulmaya bırakılan iki adet numune	54
Şekil 3.17. Düktilite cihazına yerleştirilmiş numune.....	55
Şekil 3.18. Ortadan kesilmiş bitüm iplikleri.....	55
Şekil 3.19. Parlama noktası deneyinin yapılışı.....	56
Şekil 3.20. Agrega karışımlarının hazırlanma aşaması.....	57
Şekil 3.21 Elektrikli karıştırıcı.....	58

Şekil 3.22 Sıkıştırma tokmağı kullanımı.....	58
Şekil 3.23 Soğumaya bırakılmış numuneler.....	59
Şekil 3.24 Kriko kullanımı	59
Şekil 3.25 Su banyosuna bırakılan briketler.....	63
Şekil 3.26 Marshall stabilite cihazı.....	64
Şekil 3.27 Marshall deney numuneleri	66
Şekil 3.28 Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi çalışma prensibi	68
Şekil 4.1. RTFOT öncesi penetrasyonun tüm seviyeler için performans istatistikleri ...	72
Şekil 4.2. RTFOT sonrası penetrasyonun tüm seviyeler için performans istatistikleri ..	75
Şekil 4.3. RTFOT öncesi yumuşama noktası tüm seviyeler için performans istatistikleri .	78
Şekil 4.4. RTFOT sonrası yumuşama noktası tüm seviyeler için performans istatistikleri	81
Şekil 4.5. Saf bitüm ve deney sonuçlarının penetrasyon indeksi karşılaştırması	83
Şekil 4.6. Elastik geri dönme tüm seviyeler için performans istatistikleri.....	87
Şekil 4.7 Bitüm –Dp oranı.....	91
Şekil 4.8 Bitüm-Stabilite oranı	91
Şekil 4.9 Bitüm-Akma oranı.....	92
Şekil 4.10 Bitüm-VFA oranı	92
Şekil 4.11 Bitüm-Boşluk oranı	93
Şekil 4.12 Bitüm-VMA oranı	93
Şekil 4.13. MRPI performans istatistikleri.....	102
Şekil 4.14. Saf bitüm FT-IR deney sonucu	104
Şekil 4.15. Deney 4’e ait FT-IR deney sonucu.....	104
Şekil 4.16. Deney 6’ya ait FT-IR deney sonucu.....	104
Şekil 4.17. Deney 13’e ait FT-IR deney sonucu.....	105
Şekil 4.18. Deney 16’ya ait FT-IR deney sonucu.....	105

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

rpm	Dakikada Devir Sayısı
g	Gram
kg	Kilogram
mm	Milimetre
°C	Santigrat Derece
%	Yüzde

Kısaltmalar

VMA	Agregalar Arasındaki Boşluk (%)
MRPI	Ağırlıklar ve Çoklu Yanıt Performans İndeksleri
VFA	Bitüm İle Dolu Boşluk (%)
PG	Bitümün Performans Sınıfı
RTFOT	Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi
FTIR	Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi
IKA	Ilık Karışım Asfalt
TSR	İndirekt Çekme Dayanım Oranı
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
BSK	Sıcak Karışım Asfalt
PI	Penetrasyon İndeksi
S/N	Taguchi Yöntemi Performans İstatistiği
VTM	Toplam Karışımın Boşluk Oranı

1. GİRİŞ

1.1.Araştırmanın Amacı

Karayolu ulaşımı hem ülkemizde hem de dünyada en sık kullanılan ulaşım türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Nüfusun artışına bağlı olarak ulaşım talebinin de artmasıyla karayolu ağı giderek daha da genişlemektedir. Karayolları, üretim sırasında insan sağlığı ve çevreye olan etkisinin yanı sıra servis süresi boyunca da emniyet ve konfor özellikleri ile insan yaşamını doğrudan etkilemektedir.

Enerjinin tüketimi, küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda farkındalıkların artması ile araştırmacılar çevre dostu malzemeler ve teknikler aramaya başlamıştır. Ilık karışım asfalt (IKA), kullanılan ve gelişmeye devam eden tekniklerden birisidir. IKA'nın uygulanması, asfalt üretimi sırasında ortaya çıkan olumsuz çevresel etkileri temel performansından ödün vermeden azaltılmasını sağlar. IKA katkı maddeleri, asfalt bağlayıcının üretim sıcaklıklarını Sıcak Karışım Asfalta (BSK) göre yaklaşık 20°C ile 40°C düşürmek için kullanılmaktadır. Üretim sıcaklığının düşmesinin en büyük avantajı tesiste ve asfaltlama sahasında oluşan sera gazı emisyonlarının, dumanların ve kokuların azalmasını sağlamasıdır. Ayrıca, kısa süreli bağlayıcı sertleşmesinin azalması, sıkıştırma sırasında karışım hassasiyetinin azalması, yeni asfalt kaplama karışımlarında ıslah edilmiş asfalt kaplama yüzdesinin artışı ve inşaat sezonunun uzaması dahil olmak üzere teknik faydaları da bulunmaktadır.

IKA teknolojisinin işlevselliği, asfalt bağlayıcı viskozitesinin belirli sıcaklıklarda azaltılmasına dayanmaktadır, viskozite düşürülerek işlenebilirliğin artması sağlanır dolayısıyla daha iyi sıkıştırma sağlanmış olur. Daha düşük bir viskozite, sıcak karışım asfalt (BSK) karışımlarının karıştırılması için gerekenden daha düşük bir sıcaklıkta agregaların bitümlle tamamen kaplanmasına olanak tanır. Çalışmalar, IKA karışımlarının performans özelliklerinin BSK' lara eşdeğer olabileceğini göstermiştir. IKA karışımlarının üretimi için farklı teknolojiler ve farklı katkı maddeleri bulunmaktadır (Vaitkus vd., 2009). Avrupa ve Amerika'da kullanılmakta olan IKA teknolojileri ülkemiz için henüz yeni bir teknolojidir.

Bu çalışmanın amacı, kullanım alanı oldukça yaygın olan asfalt yolların performansının iyileştirilmesi amacıyla geliştirilmekte olan bitümlü ılık karışım asfaltlar için yeni teknolojilerden sayılan Cecabase RT 945 kullanarak optimum bitüm oranını araştırmak ve bu

katkı maddesi sayesinde bitümlü sıcak karışım asfaltlardaki performansı daha düşük sıcaklıklarda elde ederek enerji tasarrufu ve daha az emisyonlar elde etmek.

1.2. Araştırmanın Önemi

Bugüne kadar BSK'ların olumsuz özelliklerini iyileştirmek için uygun malzemeleri belirlemek amacıyla kapsamlı araştırmalar yürütülmüştür. IKA karışımlarının çevresel ve ekonomik avantajları göz önünde bulundurulduğunda performanslarının araştırılması çok önemlidir. Bu çalışmada Cecabase RT945 katkı maddesi kullanılarak hazırlanacak olan ılık karışım asfalt numunelerinin mühendislik özellikleri karakterize edilecektir. Bitüme eklendiğinde, kimyasal katkı maddeleri bağlayıcının yapısını değiştirerek asfalt karışımının üretim ve yerleştirme sıcaklığını yaklaşık 30–40 °C düşürmeyi mümkün kılar böylece enerji tüketimini ve emisyonların azaltılması sağlanmış olur.

1.3. Varsayımlar

IKA teknolojilerinin asfalt karışımlarının performansı üzerindeki etkisi doğrulanmıştır. Bu çalışmanın bulguları, yeni ve daha etkili ılık karışım teknolojileri ve malzemelerinin geliştirilmesi için öngörüler ve referanslar sağlayabilir

1.4. Sınırlılıklar

Ilık karışım asfaltında kullanılan Cecabase RT945 ve diğer katkı maddeleri üzerine yapılan literatür incelemelerinde katkı maddeleri bitüme farklı oranlarda eklenmiştir aynı zamanda karıştırma sıcaklığı, hızı, süresi gibi parametreler de farklı seviyelerde kullanılmıştır. Bu nedenle bu çalışmada da Taguchi Yöntemi kullanılarak farklı karıştırma sıcaklıkları, karıştırma hızları, karıştırma süreleri ve Cecabase RT 945 oranlarının bitüm performansına etkileri incelenmiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Kaynak Özetleri

Yapılan çalışma kapsamında incelenen literatür araştırmasında İKA teknolojisi ile ilgili araştırmalar, katkı maddesi olarak Cecabase RT ve Cecabase RT945 kullananlar ile ilgili araştırmalar özetlenmiştir.

Kakar vd. (2016) yaptıkları çalışmalarında 64 ve 76 penetrasyon derecesine sahip bitüm ile çalışmışlardır. Kimyasal katkı maddesi olarak kullandıkları Cecabase RT945 maddesinden bitümün ağırlıkça %0,2, %0,3 ve %0,4 oranlarında eklemiştir. Deney sonuçları Cecabase yüzey aktif madde bazlı kimyasal katkı maddesinin bitüm yüzey enerjisini azalttığını ve bitümün agregayı ıslatma yeteneğini artırdığını göstermiştir. Genel yüzey serbest enerjisi, RTFO bitümün yaşlanmasıyla artarken, PAV yaşlanmasından sonra yüzey serbest enerjisi azalmıştır. Sonuçlar ayrıca çalışmada kullanılan hem 64 hem de 76 penetrasyon dereceli bitümlerin asidik yapıda olduğunu göstermiştir. Cecabase katkı maddesi eklendiğinde, yaşlandırılmamış bitüm için yapışma işinin biraz iyileştiği bulunmuştur. PG-64 ve PG-76 bitüm/kireçtaşı agrega kombinasyonları için uyumluluk oranı granit agrega kombinasyonlarına kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Bu, bitüm/kireçtaşı agrega kombinasyonlarının granit agrega kombinasyonlarına kıyasla daha iyi nem duyarlılığına sahip olduğunu göstermektedir.

Соломенцев (2018) yaptığı çalışmada katkı maddelerinin asfalt bağlayıcının sıkıştırılması üzerindeki etkisini belirleyebilmek için şu parametreleri benimsemiştir: numune üzerindeki yük 4 ton ve karışımdaki optimum miktarda bitüm ile sıkıştırma süresi ise 1,5 dakika. Karışıma 0,5 oranında Cecabase RT 945 ve Wormmix L katkı maddeleri eklenmiştir. Karışımdaki bitüm içeriği ise %13'tür. Test numunelerinin tüm partilerindeki UNIREM-001 kauçuk tozu bazlı katkı maddesi miktarı değişmediği gözlenmiştir ve mineral tozunun ağırlıkça %1,5'i kadar kullanılmıştır. Asfalt bağlayıcı numunelerinin üretimi 60 ila 140°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Bitüm kütlelerinin %0,3 ve %0,5'i oranında Cecabase RT 945 katkılı A tipi asfalt beton karışımı, katkısız karışıma göre sıkıştırmayı %1 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir.

Hernández (2018), çalışmasında düşük sıcaklık bitümünün performansını özellikle bazı düşük sıcaklık bitümlerinin uzun vadeli davranışını ve kullanım ömrü tahmini üzerine bir araştırma sunmuştur. Numunelere sentetik Cecabase RT (C) %0,4, Sasobit (S)%3, Fluxant (F) %0,4, Greenseal (G)%1 ve Advera (A) mumu %0,25 gibi farklı katkı maddeleri eklenmiştir. Deney sonuçları, Sasobit ve zeolit katkı maddeleri hariç, çoğu IKA'nın termal çatlama direncini iyileştirdiğini göstermektedir. Sasobit, laboratuvar da bağlayıcıyı sertleştirme eğiliminde olmuştur. Sasobit ile modifiye edilmiş bitüm, antioksidan gibi davrandığı için PAV'daki bağlayıcının yaşlanma oranını azaltmıştır. Deney sonuçları, IKA teknolojilerinin, modifiye edici olarak Sasobit hariç daha yumuşak bir bağlayıcı ile sonuçlandığını göstermiştir. Sasobit ve Cecabase ile test edilen tüm modifiye bitümler ve ayrıca köpük bitüm ve RAP bitüm kapanımı için BSK referans karışımına kıyasla önemli ölçüde daha yüksek tekerlek izi olduğunu göstermektedir. Tekerlek izi testi, 105 °C ve 120 °C arasındaki sıcaklıklarda üretilen tüm IKA'ların referans BSK'a kıyasla daha yüksek tekerlek izi derinliğine sahip olduğunu göstermektedir. 120 °C'de üretilen Sasobit ile modifiye bitüm olan PA-PACK'in en yüksek tekerlek izine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Khairuddin vd. (2019), yaptıkları çalışmada iki çeşit ılık karışım asfalt (IKA) katkı maddesi olan; Cecabase ve Rediset ile eklenen poliüretan (PU) modifiye bitümün fiziksel, termal ve kimyasal analizleri incelenmiştir. Modifiye bitüm %0,5 ağırlıkta Cecabase ve %0,6 ağırlıkta Rediset ile karıştırılmıştır. Daha sonra penetrasyon, yumuşama noktası, süneklik, viskozite ve depolama kararlılığı testleri; termogravimetri (TGA), Raman spektroskopisi ve Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi analizi kullanılarak bu katkı maddeleri değerlendirilmiştir. Gözlemlenen sonuçlara göre PU'nun bitümün sertliğini Cecabase ve Rediset eklenerek veya eklenmeden artırdığını göstermiştir. Bitüme PU modifikatörünün eklenmesi viskozitesini artırmıştır ve bu da sonuç olarak tekerlek izi direncini iyileştirmiştir. Ancak, B-PU'ya hem Cecabase hem de Rediset eklenmesi viskozitesini düşürmüştür ve bu da karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını azaltırken aynı anda karışımların yorulma direncini artırmıştır. Tüm modifiye bitümler yüksek sıcaklıklarda depolamaya dayanıklı karışımlardır. TGA analizi, PU, Cecabase ve Rediset eklenmesinin bitümün termal kararlılığı üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Raman spektrum analizi, modifiye bitümün saf bitümün düzen yapılarını ve arı yapılarını değiştirmedikçe ortaya koymuştur. Bu, modifiye bitümde kimyasal etkileşimin olmadığını gösteren FTIR spektroskopisi analizinden elde edilen sonuçlarla tutarlıdır.

Pamuk (2019), çalışmasında sıkıştırma sıcaklığının etkisini gözlemleyebilmek için BSK ve dört farklı IKA katkı maddesi ile numuneler oluşturmuştur. IKA örnekleri hazırlanırken Sasobit yani köpürmeyen katkı maddesi ve Advera yani köpüren katkı maddesinin 2 farklı dozajı kullanılmıştır. Sıkıştırma sıcaklığı seçilirken BSK'nın standart sıkıştırma sıcaklığı olan 95°C, 110°C, 125°C ve 140°C seçilmiştir. Bu çalışmada, bağlayıcının performans derecesindeki değişimi sınırlayabilmek için %2 ve %3 Sasobit dozajları belirlenmiştir. Advera ise %0,25 olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda düşük sıcaklıklardaki IKA katkı maddeleriyle hazırlanan kaplamaların, geleneksel sıcaklıklarda hazırlanan BSK kaplamaların performansını karşılayabileceği sonucuna ulaşılmıştır. 95 °C ile 140 °C arasındaki sıkıştırma sıcaklıkları arasında, HMA numuneleri hava boşluklarında %2 azalma gösterirken, IKA numunelerinin hava boşluğu %1-1,5 aralığında azalmıştır. Bu, IKA'ların BSK karışımlarına göre sıkıştırma sıcaklığı değişikliklerine daha az duyarlı olduğunu bize göstermiştir. Dolayısıyla, IKA teknolojileri sayesinde sahada sıkıştırma değişkenliğini sınırlamak mümkün olabilir demektir.

Syed vd. (2019), çalışmalarında IKA'ları çeşitli katkı maddeleriyle modifiye ederek hazırladıkları kaplamaların tekerlek izi direncini incelemiştir. New Mexico'da bulunan uzun süreli kaplama performansı (LTPP) SPS-10 kaplama test bölümlerinden topladıkları tüm karışımları 5 bölümde toplamışlardır. Bu beş farklı bölüm LTPP test bölümleri referans BSK kaplama, Terex katkılı kaplama, Evotherm katkılı kaplama, Cecabase katkılı kaplama ve polimerize Cecabase katkılı kaplama olarak ayrılmıştır. Farklı reolojik tekerlek izi parametreleriyle Hamburg Tekerlek İzi Cihazı (HWD) sonuçları arasındaki ilişki incelenmiştir. Sonuç olarak Cecabase katkısı ve polimer modifikasyonu ile birleştirilmiş karışımın tekerlek izi direncinde kayda değer bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Awazhar vd. (2020), yaptıkları çalışmada 60/70 penetrasyon dereceli bitüm ile çalışmışlardır. Katkı maddesi olarak Cecabase RT 975 ve PU kullanılmıştır ve baz bağlayıcı ile karıştırılmıştır. PU, hurma çekirdeği yağı bazlı monoester poliol (PKO-p) ve 2,4-difenilmetan diizosiyanat (MDI) arasındaki reaksiyonla elde edilmiştir, hurma çekirdeği yağından türetilmiştir. Her iki katkı maddesi de sırasıyla %0,5 ağırlık (Cecabase) ve %3 ağırlık (PU) baz bağlayıcı dozaj oranında harmanlanmıştır. Bu çalışmada, baz bağlayıcı önce akışkan hale gelene kadar 145 °C'de ısıtılmıştır. Daha sonra PKO-p ve MDI, 110 °C'de baz bağlayıcıya eklenerek bir kesme mekanik karıştırıcı kullanılarak 15 dakika boyunca 2000 rpm'de karıştırılmıştır. BPU'nun karıştırılmasının ardından, karışıma Cecabase eklenmiştir ve BPUC elde etmek için on beş dakika daha karıştırılmıştır. BC'yi hazırlamak için benzer

karıştırma parametreleri benimsenmiştir. Cecabase'in IKA katkı maddesi olarak dahil edilmesinin, bağlayıcı sertliğini artırabileceğini göstermiştir. PU'nun eklenmesi, değişen sıcaklıklarda daha yüksek bağlayıcı viskozitesi ile sonuçlanmıştır. Ancak, Cecabase'in eklenmesi, bağlayıcı viskozitesini azaltmıştır. BC'nin düşük viskozitesi, BSK'ya kıyasla düşük sıcaklıkta işlenebilirliği iyileştirmiştir. Aktivasyon enerjisi analizi, PU'nun aktivasyon enerjisini azaltma yeteneğine sahip olduğunu, Cecabase'in eklenmesinin ise daha yüksek bir aktivasyon enerjisine yol açabileceğini göstermiştir. Genel olarak, bu çalışma, bağlayıcı özelliklerinde en büyük iyileştirmenin PU'yu değiştirici olarak kullanıldığında elde edildiğini göstermiştir. PU ve Cecabase, bağlayıcıların düşük sıcaklıkta işlenebilirliğini iyileştirebilmektedir

Bairgi vd. (2021), yaptıkları çalışmalarında farklı IKA katkıları üzerine New Mexico'da uzun süreli kaplama performansı (LTPP) SPS-10 test bölümlerinin bulunduğu araştırmalar yapmışlardır. Saha performansları, tekerlek izi, nem hasarı, çatlama, uluslararası pürüzlülük indeksi (IRI) ve kaplama durum değerlendirmesi (PCR) gibi kriterler üzerinden, lazer tabanlı bozulma değerlendirme teknolojisi olan Mandli kaplama profili tarayıcısıyla analiz etmişlerdir. Çalışmada, Cecabase ve diğer IKA katkı maddelerinin oluşturduğu bölümlerde, BSK ile karşılaştırıldığında tekerlek izinin biraz daha fazla olduğu ancak bu bölümlerin çatlama performansının daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. IRI ve PCR değerleri temel alınarak yapılan değerlendirmeler sonucunda ise IKA karışımlarından oluşan kaplamaların genel durumlarının normal, yani BSK ile eşdeğer olduğu bulunmuştur.

Belc vd. (2021), çalışmalarında yüzey tabakası için asfalt betonu, nominal maksimum agregat boyutu (NMAS) 16 mm olan doğal agregat ile hazırlamışlardır. Asfalt betonu, diyoritten elde edilen doğal kırılmış agregatlar (kırılmış taş %25,6, 4/8 mm kırılmış taş %28,4, 8/16 mm kırılmış taş %25,6 ve 0/4 mm kırılmış kum %25,6), %7,6 doğal kum (0/4 mm), %7,6 filler ve %5,2 saf bağlayıcıdan (50/70 penetrasyon derecesi) oluşmuştur. Tüm yüzdelere asfalt karışımının ağırlığına göre hesaplanmıştır. Asfalt karışımının bağlayıcı içeriği, karışımın toplam ağırlığının %5,2'sinden oluşmaktadır. IKA karışımlarını hazırlamak için kullanılan malzemeler: iki tip organik katkı maddesi (sentetik mum (W1) ve daha yumuşak sentetik mum (W2)), bir kimyasal katkı maddesi (C) ve bir sentetik zeolittir (Z). Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, katkı maddelerinin IKA üretiminde kullanılabileceği yönünde olmuştur ve kimyasal katkı maddesi içeren IKA (C), BSK'a en yakın davranışı göstermiştir. Bu çalışmada kullanılan tüm katkı maddeleri, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını yaklaşık 40 °C kadar

azaltmıştır ve en iyi test sonuçları 120 °C'lik bir karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığında elde edilmiştir.

Jattak vd. (2021) yaptıkları çalışmalarda kömür yanma yan ürünü olan Dip Külü (BA), asfalt karışımı üretmek için kullanıldığında potansiyel bir malzeme olduğunu bulmuşlardır, çalışmalarında bağlayıcı kurs tabakası için asfalt karışımlarının temel mekanik özellikleri aracılığıyla BA'nın Ilık Karışım Asfalt teknolojisindeki uyumluluğunu değerlendirmeyi amaçlamışlardır. İki IKA kimyasal katkı maddesi, (CecabaseRT ve Evotherm 3G) bitüm ağırlığınca %0,3, %0,4 ve %0,5 oranlarında kullanmışlardır. Bağlayıcı özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testleri ile değerlendirilmiştir. Optimum bağlayıcı içeriğini belirlemek için Marshall karışım tasarımı kullanılmıştır. WMA için katkı maddesi dozajı ve üretim sıcaklığı Marshall kararlılığı, akış, hava boşlukları ve özgül ağırlık ile belirlenmiştir. Sonuçlar, katkı maddelerinin bağlayıcı özelliklerini önemli ölçüde etkilemediğini, ancak %0,4 Evotherm 3G'de penetrasyonda %17,5'lik bir düşüş gözlemlendiğini göstermektedir. Cecabase RT, deney sonuçlarında IKA için ümit verici olduğunu göstermiştir fakat taban külü içeren IKA'nın (BAWMA) işlenebilirliğini artırmamıştır. Evotherm 3G üretim sıcaklığını 25°C düşürerek, IKA ve BAWMA'yı %0,4 oranında azaltarak, Sıcak Karışım Asfalt ile karşılaştırılabilir işlenebilirlik göstermiştir.

İbiş (2022), çalışması kapsamında 50/70 penetrasyon dereceli saf bitüm ile SBS ve Elvaloy gibi farklı polimerler, organik ılık karışım asfalt katkısı olan Sasobit ve farklı iki agrega türü (Kireçtaşı ve Bazalt) kullanarak gözenekli asfalt kaplamanın uygulanabilirliğini incelemiştir. Ön tasarım çalışmaları sonucunda sınıflandırma türleri belirlenmiş, Marshall tasarım verilerine ve parçacık kaybı test sonucuna bağlı olarak karışımda kullanılan optimum bitüm oranını belirlemeyi amaçlamıştır. Tasarlanan numunelerin parçacık kaybı, Marshall kararlılığı, dolaylı çekme dayanımı, geçirgenlik ve bitüm drenajı gibi özelliklerinin değerlendirilmesiyle şartnameye uygunlukları incelenmiştir. Sonuçlara göre baz alınan bitüm ve IKA katkı maddesi Sasobit ile hazırlanmış olan karışımların gözenekli asfalt spesifikasyon sınırlarını karşılamadığını, polimer modifiye bitüm ile hazırlanmış karışımların ise geçerli spesifikasyona uyduğunu göstermiştir. Ayrıca, bazalt-kireçtaşı agrega kombinasyonu ile hazırlanan karışımlar, yalnızca kireçtaşı ile hazırlanan karışımlardan daha iyi sonuçlar vermiştir.

Zou vd. (2022) yaptıkları çalışmada üç tip karışım hazırlamışlardır: geleneksel BSK, SSA türevi zeolit içeren ılık karışım asfalt (IKAZ) ve Aspha-min içeren ılık karışım asfalt (IKAA).

Aspha-min dozu, asfalt karışımının toplam kütlesinin %0,3 oranında kullanılmıştır. Aynı dozaj SSA türevi zeolit için de kullanılmıştır. Üç karışımın hepsi aynı karışım tasarımı hazırlanmıştır. IKAZ karışımının sertlik modülü BSK karışımından %15, ICAA karışımından ise %6 daha düşük çıkmıştır. Sertlik modülündeki bu tür farklar yaşlanmadan sonra çok belirsizleşmiştir. Üretilen BSK ve IKA karışımları yorulma çatlamasına karşı çok benzer dirençler göstermiştir ve yorulma ömürlerinde önemli bir fark gözlenmemiştir. IKAZ karışımı, BSK ve ICAA karışımlarına kıyasla daha yüksek mukavemetler göstermiştir. IKAZ, BSK ve ICAA için çekme mukavemeti oranları sırasıyla %82,71, %80,87 ve %82,14 idi ve bu da tüm karışımların nem hasarına karşı benzer iyi bir dirence sahip olduğunu göstermiştir. Her üç karışımın da iz direnci sonuçları olumlu çıkmıştır fakat iki IKA karışımı BSK karışımından daha büyük iz derinliği göstermiştir bu üretim sırasında IKA karışımlarının azalan yaşlanmasından kaynaklanmıştır. ICAA ile karşılaştırıldığında, IKAZ daha iyi iz direnci göstermiştir. SSA kaynaklı zeolitın kilogram başına maliyeti %35,6-%50 oranında azaltabildiğini, bunun da ticari zeolit ürünlerine göre ekonomik açıdan avantajlı olduğunu göstermektedir.

Shekhovtsova vd. (2022) çalışmalarında, DAD-TA, DAD-TA2, Adgezol 3-TD, Azol 1007, Cecabase RT 945, Doros-T ve Amdor TS-1'i içeren yedi farklı katkı maddesi ile IKA karışımları hazırlamışlardır. Bitümün penetrasyonu, kırılgenliği, yumuşama sıcaklığı ve dinamik viskozite dahil olmak üzere işlenebilirlik ve mühendislik özelliklerini karakterize etmek için çok kapsamlı laboratuvar testleri yapılmıştır. Cecabase RT945 bitüm ağırlığının %0,3 oranında eklenmiştir, sıkıştırma sıcaklığı ise 110 °C alınmıştır. Deneysel sonuçlara göre, Adgezol 3-TD, DAD-TA2, Doros-T ve Azol 1007'yi içeren IKA katkı maddeleri, modifiye bitümün dinamik viskozitesinde %30'luk bir azalma sağlamıştır; ancak DAD-TA, Cecabase RT 945 ve Amdor TS-1 gibi IKA katkı maddeleri kullanıldığında modifiye bitümün dinamik viskozitesinde herhangi bir azalma gözlenmemiştir.

Sukhija vd. (2022), çalışmalarında çeşitli WMA katkı maddelerinin enerji gereksinimi ve sera gazı (GHG) emisyonları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. %0,7, %1,35 ve %2,0 oranlarında Sasobit redux, %0,3 Aspha-min, %1, %2 ve %3 oranlarında Sasobit ve %0,2, 50,35 ve %0,5 oranlarında Cecabse RT BIO10 kullanmışlardır. Isı enerjisinin yaklaşık %60'ı agregayı ısıtırken tüketilir, bunu su buharlaşması (%25), asfalt bağlayıcıyı ısıtma (%10), suyu ısıtma (%4) ve buharın uzaklaştırılması (%1) takip eder. IKA katkı maddelerinin eklenmesiyle ısı enerjisindeki azalma, geleneksel BSK'ya göre %3 ile %12 arasında

değişmektedir. Özellikle, organik bazlı katkı maddeleri enerji tüketiminde maksimum azalma (%4-12) göstermiştir, bunu kimyasal (%3-10) ve köpük bazlı katkı maddeleri (%9) takip etmiştir. Kömür kullanarak asfalt karışımları üretmenin genel maliyeti önemli ölçüde daha düşüktür, buna karşın sabit miktarda ısı enerjisi üretmek için gereken kömür miktarı sırasıyla doğal gaz, fırın yağı ve LSHS, dizel, ağır yağ ve LDO'nun yaklaşık 1,73, 1,28, 1,26, 1,25 ve 1,22 katıdır. WMA katkı maddeleri dikkate alındığında, %2 Sasobit redux yakıt türünden bağımsız olarak en yüksek maliyet düşüşünü sağlamıştır.

Anand vd. (2023), çalışmalarında katkı maddesi olarak kullandıkları Cecabase'i bitüm kütlelerinin %0,2, %0,3, %0,4 ve %0,5 oranları olmak üzere 4 farklı seviyede saf bitüme ekleyerek 100°C sıcaklıkta karıştırmışlardır. Marshall tasarım testi yapılarak karışımın optimum bitüm içeriği belirlenmeye çalışılmıştır. IKA örneklerinin BSK örnekleri kadar iyi performans gösterdiklerini gözlemlemişlerdir. Sıkıştırılabilirliğin artması ve bitüm yaşlanmasının azalması sayesinde kaplama performansının arttığını belirtmişlerdir.

Çingiloğlu (2023), çalışmasında shingle atıklarının BSK ve IKA'da kullanımını incelemiştir. Dünya genelinde ve Türkiye'de önemli miktarda bulunan bitüm içeren atık malzemenin, değerlendirilmesi ve çevreye verdiği zararın en aza indirilmesi amacı ile, farklı bitüm içerikleri ve farklı miktarlarda üretim shingle atığı (agrega ağırlığının %1-6'sı) içeren BSK ve IKA numunelerinin mekanik özellikleri Marshall ve ITS testleri ile değerlendirmiştir. Sonuç olarak, IKA karışımları için optimum shingle atık içeriği %2 olarak bulunmuştur. Ayrıca, bulunduğu hava boşluğu sonuçlarından yola çıkarak shingle atık kullanımıyla bitüm içeriğinin azaltılmasının IKA numuneleri için pek mümkün olmadığı sonucuna varmıştır.

Çakı (2024), çalışmasında 50/70 penetrasyon dereceli saf bitüm kullanmıştır. Bitüm ağırlığının %0, %0,3, %0,4 ve %0,5'i kadar olmak üzere dört farklı oranda Cecabase RT BIO10 ekleyerek numuneler hazırlamıştır. Taguchi L16 ortogonal dizisi kullanarak deney planları hazırlamıştır. Karışımlarını 110°C, 120°C, 130°C ve 140°C karıştırma sıcaklıklarında, 15, 20, 25 ve 30 dakikalık karıştırma süresi, 1000, 2000, 3000 ve 4000 RPM karıştırma hızı ile hazırlamıştır. Hazırladığı karışımlara penetrasyon testi, yumuşama noktası testi, parlama noktası testi, dönel ince film etüvü testi (RTFOT), elastik geri dönme testi ve Marshall stabilite testi gibi deneyler uygulamıştır. Deneyler sonucunda bu parametre ve seviyelerin bağlayıcıya olan etkileri gözlemlemiştir. Taguchi Metodu kullanarak hazırlamış olduğu optimizasyonlar sonucunda optimum seviyeleri %0,4 Cecabase RT BIO10 oranı, 140°C karıştırma sıcaklığı, 30 dakika karıştırma süresi ve 1000 RPM karıştırma hızı olarak

belirlemiştir. Kullandığı katkı maddesinin Marshall stabilite değerini %31,913 artırdığı sonucuna varmıştır.

Köse vd. (2024), çalışmalarında katkı maddesi olarak PP atık plastik pirolizi ve Sasobit kullanmışlardır. 50/70 bitüm ile çalışmışlardır. Sasobit bitüm ağırlığına göre %3 oranında 150 °C'de 1 saat boyunca 2000 rpm'de karıştırılmıştır. PP piroliz ürünleriyle hazırlanan IKA karışımları, hem bitüm hem de karışım testleri, Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi ile incelenmiştir. PP 6%C-6%W ve Sasobit® bitümün viskozitesini azaltarak karışımın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür. PP 6%C-6%W'nin eklenmesi, bitümün yüksek ve orta sıcaklıklardaki iz ve yorulma çatlağı direncini hafifçe artırmıştır. Bu arada, bitümün düşük sıcaklıktaki çatlak direncini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Sasobit® bitümün yüksek sıcaklıklardaki performansını önemli ölçüde artırırken, orta ve düşük sıcaklıklarda hiçbir yararlı etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Bitümün fonksiyonel bağ yapısında gözle görülür bir değişiklik olmadığından, katkı maddesi-bitüm modifikasyonu fiziksel harmanlamayı gerektirmiştir. Zeta Potansiyeli ve SEM analizinin bulguları, katkı maddelerinin bitümde düzgün bir dağılıma sahip olduğunu ve kümeleşmediğini veya çökmediğini göstermiştir. PP 6%C-6%W ve Sasobit® karışımın Marshall kararlılığını artırmakla kalmayıp aynı zamanda optimum bitüm içeriğine olan ihtiyacını da azaltmıştır. Ayrıca, IKA-1 (PP 6%C-6%W) ve IKA-2'nin (Sasobit) tekerlek izi direnci HWT testine göre BSK'dan daha yüksektir. IKA-1 ayrıca kırılma sıcaklığı ve kırılma dayanıklılığına göre BSK'dan daha iyi düşük sıcaklık performansı göstermiştir.

Lu vd. (2024), çalışmalarında 60/80 penetrasyon derecesine sahip bitüm gençleştirici olarak hint yağı ve eski asfaltın kompozit modifikasyonu ve gençleştirilmesini elde etmek için Polifosforik asit (PPA), ile birlikte değiştirici olarak kükürt kullanmışlardır. Dönme viskozitesi (RV), asfalt bağlayıcı çatlak cihazı (ABCD), dinamik kesme reometresi (DSR) testleri ve FTIR analizi dahil olmak üzere çeşitli deneyler yapmışlardır. Bu deneylerin sonucunda ise kükürt eklenmesinin asfalt viskozitesini önemli ölçüde azalttığını ve %15 kükürt oranının, karıştırma sıcaklığında 17 °C'lik ve sıkıştırma sıcaklığında 15 °C'lik bir azalma sağladığını gözlemlemişlerdir. PPA içeriğinin artırılması, tekerlek izi oluşumuna karşı direnci ve yorulma ömrünü önemli ölçüde artırmıştır. FTIR sonuçları, biyo-yağ birincil olarak fiziksel karışıma katkıda bulunurken ve PPA kimyasal dönüşümlere uğrarken, yenilenmiş asfalt modifikasyonunda sinerjik etkiler olduğunu göstermektedir. Kükürtün asfaltla kombinasyonu hem fiziksel hem de kimyasal reaksiyonları içermektedir. Optimum sıcak

karışım verimliliği ve yol performansı elde etmek için %15'lik kükürt oranı ve %1,0 PPA oranı eklenmesi önerilmektedir.

2.2. Kuramsal Temeller

2.2.1. Karayolu

Karayolları tanımı, önceden belirlenen geometrik standartlara uygun şekilde tasarlanmış olan bir güzergâhın üzerinde, doğal zeminin istenilen seviyelere getirilmesi ve motorlu araçların belirli hız, güvenlik ve konfor şartları altında manevra yapabilmesini sağlayan yapıların bütünü şeklinde ifade edilebilir. Karayolları, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana bölümde incelenir.

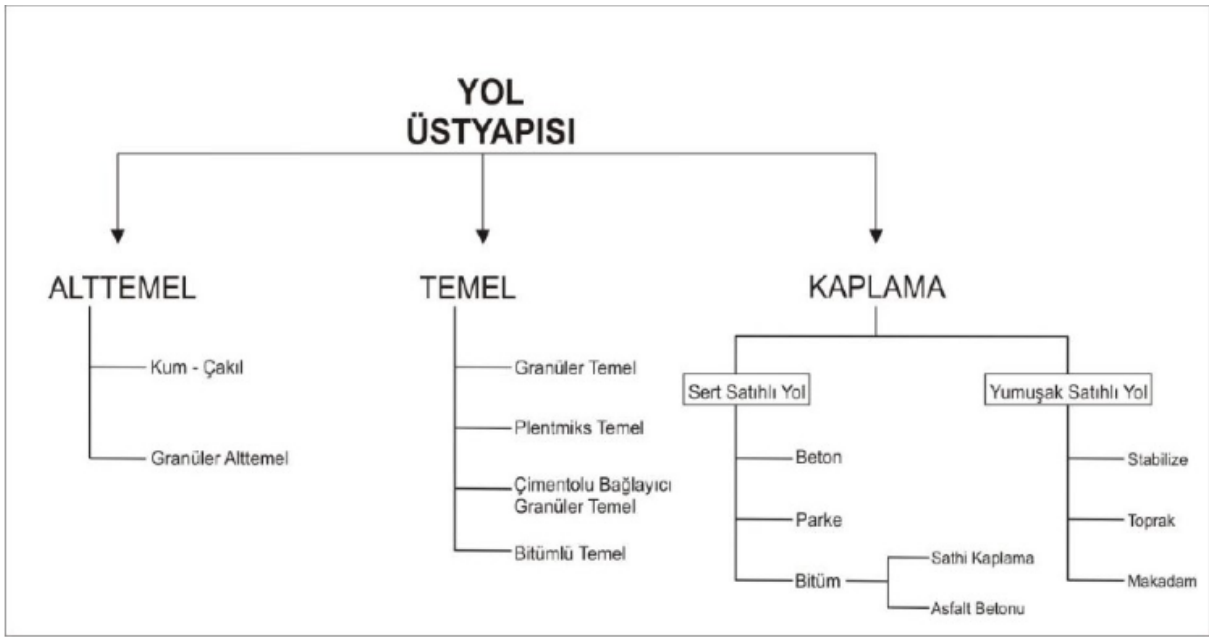
2.2.2. Karayolu altyapısı

Yol enkesitinde yarma ve dolgu işlemleri ile toprak işleri yapılmaktadır. Yolun toprak işleri sonunda daha öncesinde belirlenmiş projesi kapsamında uygun koordinat, enkesitler ve kota getirilmiş hali karayolu altyapısıdır. Kısacası tesviye yüzeyi ile doğal zemin sınırının arasında kalan alan olarak da adlandırılan altyapı yolun esas taşıyıcı kısmını oluşturmaktadır. Altyapılar, yolun dolgu kesimlerinde kullanılan toprak malzemeleri ve yarma kesimlerindeki doğal malzemeleri de kapsar. Yolun uzun süre boyunca sorunsuz hizmet verebilmesi ve işlevini eksiksiz yerine getirebilmesini sağlamak için yapılan menfezler, istinat duvarları, köprüler, viyadükler ve tüneller gibi yapılar da altyapı kapsamına dahildir. Altyapının temel görevleri arasında, istenilen seviyede düzgün bir yüzey oluşturmak ve üstyapıdan gelen yükleri daha geniş bir alana dağıtarak taşımak yer almaktadır. Bu görevleri yerine getirebilmek için altyapının, trafik yüklerine dayanıklı olmasının yanı sıra don ve su gibi olumsuz etkilere karşı da dirençli olması gerekmektedir.

Altyapıda bulunan tabakaların iyi sıkışması, hem kayma direncini hem de taşıma kapasitesini artırmaktadır. Ayrıca, suyun zararlı etkilerine karşı direnci de olumlu şekilde etkilemektedir. Uygun sıkıştırma ile permabilite ve su emme kapasitesi de azalmış olur. Bu nedenle, optimum su içeriğinde maksimum yoğunluğa ulaşana kadar sıkıştırma işlemi sürdürülmelidir (Karakaş 2014; inşaat.com).

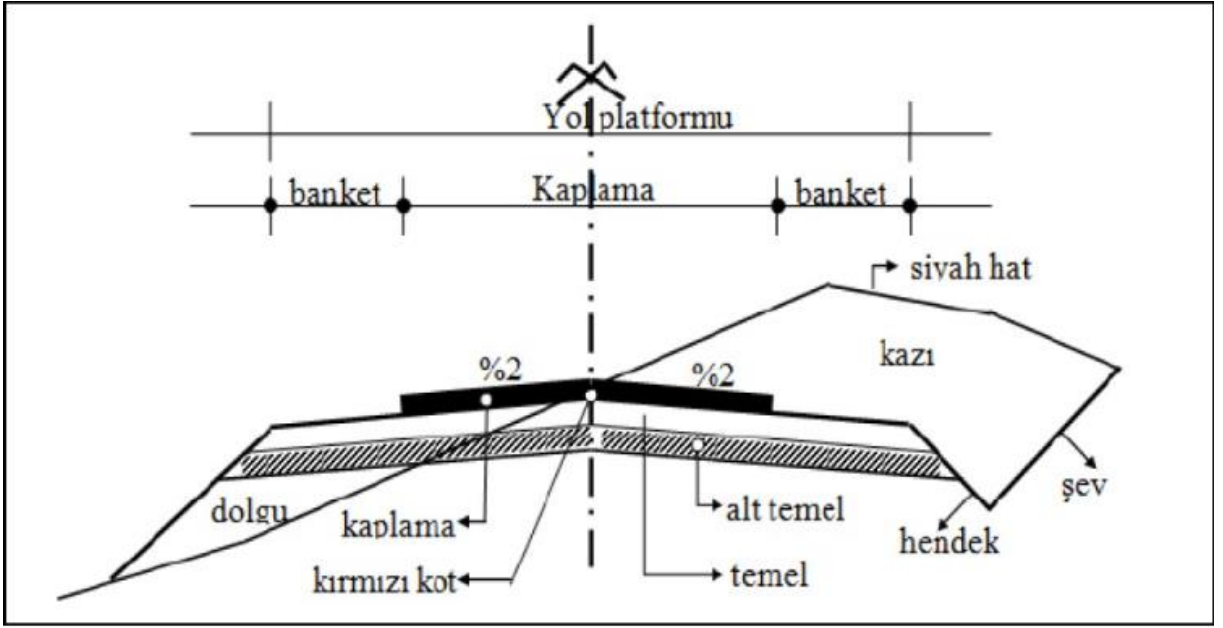
2.2.3. Karayolu üstyapısı

Taban zeminin taşıma gücünü aşmayacak şekilde yola gelen trafik yüklerini taşıyan ve taban yüzeyine dağıtan, kaplama tabakalarından oluşan bölüm karayolu üstyapısı olarak adlandırılır. Üstyapı tipi olan esnek kaplamalar dünya genelinde ve ülkemizde en fazla tercih edilen kaplama türüdür. Kaplama, temel ve alt temel olmak üzere üç ana tabaka esnek kaplamalı üstyapıları (Şekil 2.1) oluşturmaktadır.



Şekil 2.1. Yol üstyapı tabakaları ve türleri

Kaplama tabakasında kullanılan malzemenin niteliğine, türüne ve yapım yöntemine göre sınıflandırılan karayolu üstyapısı; rijit üstyapı (beton yol), esnek üstyapı (asfalt yol) ve yarı rijit üstyapı olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır. Taban zemini, trafik, çevresel şartlar, ekonomik etkenler üstyapı tipi seçilirken karar aşamasında dikkat edilmesi gereken parametrelerdir. Şekil 2.2'de tipik bir karayolu enkesiti görülmektedir.



Şekil 2.2. Tipik karayolu enkesiti

2.2.3.1. Rijit üstyapılar

Portland çimentosu ile yapılan tek tabakalı beton kaplamadan oluşan üstyapı 'Rijit Üstyapı' olarak ifade edilir. Betonun yol kaplaması olarak amacı, trafik yükünü tabana iletmektir ve bu esnada tabanda oluşabilecek deformasyonları önlemektir. Bir beton kaplamasının performansı, kaplama altında bulunan temel ve alttemel tabakaları ile mevcut taban zemininin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Beton yollar, boyuna ve enine derzlerle birbirinden ayrılır ve 20-25 m²'lik plaklar halinde inşa edilir. Taban zemini ile beton plak arasında temel ve alttemel tabakaları olarak oluşturularak kapilarite, tabanda meydana gelen şişme - büzülme ya da donma - çözülme gibi olumsuz etkilerin azaltılması amaçlanır (Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı; Yamanlar 2012).

2.2.3.2. Esnek üstyapılar

Esnek üstyapı, bitümlü kaplama tabakaları ile yapılmış olan üstyapı şekilleri olarak ifade edilir. Tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlayan esnek üstyapı, trafik yüklerini temel, alttemel tabakaları ve kaplama aracılığı ile taban zeminine yayan bir üstyapı türüdür. Stabilesini agrega kenetlenmesi, tane sürtünmesi ve kohezyon vb. faktörler etkilemektedir. Esnek üstyapı, aşınma tabakası, temel tabakası ve alttemel tabakaları olmak üzere üç kısımdan oluşur.

Karayolu üstyapısı, trafiği güvenli ve ekonomik bir şekilde taşınmalıdır. Araç tekerleği ile üstyapı yüzeyi arasındaki sürtünme ile güvenli taşıma sağlanmış olurken kullanılan malzeme, işletme ve araç maliyetleri ekonomi ile ilgilidir. Esnek üstyapı, asfalt çimentosu ve agrega kullanılarak inşa edilir (Avcı, 2009; Yamanlar, 2012).

Esnek üstyapının en üst tabakasında bulunan aşınma tabakası, trafiğin güvenli ve konforlu geçişini sağlayan bir yüzey sunmaktadır. Bu tabaka ile emniyet için gerekli olan kayma direnci sağlanırken, yüzeyinin düzgünlüğü ve konforu ile trafiğin akışını bozmadan geçiş sağlamaktadır. Ayrıca, aşınma tabakasının drenaj özelliği de olmalıdır. Su birikintilerine yol açmadan, araçlardan su sıçramasını engellemelidir. Aşınma tabakası altında, doğal zemini koruyan ve gelen yükleri taşıma kapasitesine uygun olarak dağıtan temel tabakası yer almaktadır. Onun altında bulunan tabaka, alt temel tabakası olarak ifade edilir. Alt temel tabakası, üstteki tabakaların inşası için uygun bir temel sağlar ve kullanılan malzeme genellikle diğer tabakalardan daha düşük kalitelidir. Farklı tabakalarda bulunan malzemeler farklı davranışlar sergilemektedir. Temel ve alt temel tabakalarının yapımında kullanılan malzemeler non-lineer elastik özellik gösterirken, aşınma tabakasında kullanılan visko-elastik özellik gösteren bitümlü karışımlar, sıcaklık ve yükleme hızı değişimlerine göre farklı tepkiler verir (Avcı, 2009; Yamanlar, 2012).

2.2.3.3. Yarı rijit üstyapılar

Tabanında bir veya birden fazla hidrolik bağlayıcıya sahip tabakalardan oluşan, yükleri geniş bir alana dağıtarak zemine aktaran üstyapı türleri, yarı rijit üstyapılar olarak adlandırılır. Üstyapının taşıma gücünü etkileyebilecek bir derinliğe kadar uzanan tesviye yüzeyinin altında yer alan kısım ise, üstyapı tabanı olarak tanımlanır. Üstyapı tabanı için Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değeri, üstyapı tabakalarının kalınlıklarını belirlemede dikkate alınan en önemli faktörlerden biridir.

2.2.4. Esnek üstyapı

Esnek üstyapıda taban üzerinde bulunan bütün tabakaların (alttemel, temel tabakaları dahil) asfalt karışımlar ile tekil edildiği üstyapı şekli kalıcı üstyapıdır (Perpetual Pavement). Esnek üstyapıyı oluşturan katmanlar aşınma tabakası, temel tabakası ve alttemel tabakasıdır (Şekil 2.3) ve üst kısımdan taban zeminine doğru gidildikçe katmanlarda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ve kaliteleri düşmektedir. Bu tabakaları etkileyen faktörler arasında projenin ömrü, trafiğin hacmi, mevcut malzemenin durumu ve taban zemininin dayanımı gibi

kriterler yer almaktadır. Aşınma tabakası esnek üstyapının en üst tabakasıdır. Aşınma tabakasının görevleri arasında trafiğin emniyetli aynı zamanda konforlu geçişini sağlamak, kayma dayanımını yüksek bir yüzey tabakası sağlamak gibi etmenler bulunmaktadır. Aynı zamanda, aşınma tabakasının, araçlardan su sıçramasını ve yol yüzeyinde küçük birikintilerinin oluşmasını önleyebilmek amacıyla drenaj tesislerine de sahip olması gerekmektedir. Aşınma tabakalarında kullanılan malzeme binder tabakasına göre daha ince bir malzemedir. Temel tabakası, üstyapının oturduğu doğal zemini korumaktadır ve aşınma tabakasının altında yer alır. Bu tabaka yani temel tabakası, zeminin yük taşıma kapasitesinin sınırları içinde, bir veya birden çok zeminin yükünü yayar. Temel tabakası, çimento ya da bitüm bağlayıcılı karışımlar, stabilize edilmiş malzemeler ya da dikkatle seçilen granüler malzemelerden oluşmuş olabilir. Trafik hacminin yoğun olduğu bölgelerde bitümlü karışımlar daha çok tercih edilir (Avcı, 2009).



Şekil 2.3. Tipik bir yol kesiti

2.2.5. Esnek üstyapı avantaj ve dezavantajları

Esnek kaplama, trafik için güvenli ve konforlu şartlar sağlarlar. Esnek kaplama, yüzeylerinde oluşan aşınmalara ve araçlar yüklerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı dayanıklıdır. Yüzeylerinin kuru olması sürtünme katsayılarını arttırır. Belirli bir stabilite ve rijitlik gösterdikleri için yükleri alt tabakalara dağıtırlar. Yüzeylerdeki geçirimsizliği sağlarlar ve

kademeli inşaat uygulamalarına uygundurlar. Trafik akışının kesilmesine gerek kalmadan bakım ve onarım işlemleri rahatlıkla yapılabilirdi için bir daha servis yolu açılmaz. İmalatlar tamamlandıktan kısa bir süre sonra trafiğe açılırlar. Diğer kaplama imalatları ile karşılaştırıldığında esnek üstyapı imalatları daha kolaydır (Umar vd., 1991).

Dezavantajlarına bakacak olursak, esnek kaplamaların bağlayıcı malzemesi olarak kullanılmakta olan asfalt, termoplastik özelliğe sahiptir. Sıcaklığın değişmesine bağlı olarak özellikleri de değişmektedir. Bu özellik asfalt karışımlarda da görülmektedir. Bu sebeple asfalt betonunun hazırlanma, döküm ve sıkıştırılma aşamasında şartname sıcaklık derecelerine önem verilmesi gerekmektedir. Şartname sıcaklıklarına uyulması esnek kaplamaların dayanımını ve hizmet süresini uzatacaktır. Esnek kaplamalarda yükleme hızı ve sıcaklığa göre gerilme ve deformasyon özellikleri değişim gösterecektir. Üstyapı projelendirme yöntemleri uygulanırken elastiklik varsayım dikkate alınarak uygulanır. Bu durum esnek üstyapıların projelendirme sürecinin daha karmaşık olmasına sebep olur ve yol takviye edildiği esnada da ortaya çıkar. Yolun takviyesi ile ilgili tasarım yapılırken yolun taşıma kapasitesi açısından en olumsuz koşullar dikkate alınır. Esnek kaplamaların en çok bozulma geçirdiği zamanlar ilkbahar aylarında donların çözüldüğü ve sonbahar aylarında ise fazla yağışın olduğu dönemlerdir. Esnek kaplamalarda asfalt betonunun özelliği sebebiyle yaz aylarında artan sıcaklıklar ile taşıma gücü azalır. Bu nedenle, kaplamalar inşa edilirken o bölgenin özelliklerine göre hangi mevsimde en zayıf durumda olduğu belirlenmelidir. Karışımlarda kullanılan asfalt, kaplama imalatı tamamlandıktan bir süre sonra içerisinde bulunan uçucu maddelerin buharlaşması ve hava koşulları altında okside olmasıyla yapısal olarak bozulma yaşar. Bu olay asfalt yaşlanması olarak ifade edilir. Yaşlanma, bitümde oluşan sertleşme, elastik davranışın azalması ve agregaya olan bağlayıcılık özelliğinin azalması olarak açıklanabilir. Kaplamalarda bitümlü bağlayıcının yaşlanması daha kırılgan ve daha dayanıksız bir yapıya sebep olur. Taşıtlardan yola yakıt maddelerinin dökülmesi de esnek kaplamanın kimyasal özellikleri üzerinde olumsuz etki yaratacaktır. Ayrıca soğuk hava koşullarının sebep olduğu buzlanmayı ve kar birikimini önlemek amacıyla tuz ve benzeri maddelerin kullanılması da, esnek kaplama yüzeylerinde bozulmalara neden olacaktır. Esnek kaplamaların inşa edildiği tabii zeminlerin kuru ya da en çok %2 oranında nem bulundurmalıdır. Bu durum, yağışı fazla alan bölgelerin esnek kaplamalarının, inşaat süresinin kısa olmasına neden olur. Esnek kaplamaların karışım, döküm, serme ve sıkıştırma gibi uygulama süreçlerinde belirli sıcaklık sınırlılıkları olduğu için enerjinin fazla tüketilmesi gerekmektedir (Umar vd., 1991).

2.2.5. Esnek üstyapı elemanları

2.2.5.1. Taban zemini

Altyapı zemininin üst kısmına yani tesviye yüzeyinin altındaki tabakaya oturan yol üstyapısı ve banketler, yarma ya da dolgu bölgelerinde üstyapının taşıma kapasitesini etkileyebilecek bir derinliğe kadar (25-85 cm) uzanır. Bu tabanın CBR (Kaliforniya Taşıma Gücü) değeri, üstyapı tabakalarının kalınlığını belirlerken dikkat edilen en önemli etmenlerden biridir. Taban zemini sıkıştırılmış olan doğal zemin veya dolgu malzemesiyle oluşturulur ve üstyapı için temel görevi görür. Yapısal olarak en önemli tabaka burasıdır sebebi ise trafik yükleri son olarak bu tabakaya aktarılır. Yapılacak olan iyi bir drenaj sistemi bu tabakanın görevini en iyi şekilde yapabilmesini sağlayacaktır. Esnek bir üstyapının performansını taban zemininin taşıma gücü doğrudan etkilemektedir. Taban zeminindeki yeraltı su seviyesi, tesviye yüzeyinden en az 100 cm aşağıda tutulmalıdır ve bunu sağlayabilmek için uygun bir yeraltı drenaj sistemi yapılmalıdır. Su, taban zemininin taşıma kapasitesinin azalmasına sebep olmaktadır, bu yüzden suyun etkili ve kalıcı bir drenaj sistemi ile hem inşaat süresi boyunca hem de yolun hizmet süresi boyunca taban ve üstyapı katmanlarından uzaklaştırılmalıdır. Yol üstyapıları, don yüzünden aşırı kabarması ve taban zeminin donma-çözülme zamanlarında taşıma gücü azaldığı için zarar görebilir. Don olayının yol üstyapısına etkisini azaltabilmek için taban zemininin dona olan duyarlılığının, üstyapının toplam kalınlığının, donma indeksinin ve yeraltı su seviyesinin üstyapı yüzeyinden ölçülen derinliği gibi etmenlerin dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekir.

2.2.5.2. Alttemel tabakası

Alttemelin tesviye yüzeyinin üzerine serilmesinin amacı, trafik yüklerini taban zeminin yüzeyine dağıtmak, ince taneli altyapı malzemelerinin temel tabakasına etki etmesini önlemek ve su ile don etkilerine karşı koyabilmektir (İlıcılı vd., 2001).

2.2.5.3. Temel tabakası

Kaplama ve alttemelin arasında yer alan trafiğin direkt olarak temas etmediği silt, çakıl, doğal kum, bitüm karışımları ve kil gibi malzemelerin oluşturduğu tabakaya temel tabakası denir. Bu tabakanın ana amacı, üst yapının taşıdığı yük kapasitesini artırmaktır. Ayrıca, trafik hareketleri yüzünden doğan yüksek kayma gerilmelerine karşı koyabilmeli, drenaja yardımcı olabilmeli ve don olaylarına karşı da koruma sağlayabilmelidir (İlıcılı vd., 2001).

2.2.5.4. Kaplama tabakası

Kaplama tabakası, araçlara uygun bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak, trafiğin yarattığı aşındırıcı etkilere karşı dayanıklılık göstermek ve yüzey suyunun yapıya sızmasını ve temel tabakaya iletilen kayma gerilmelerini azaltmak amacıyla temel tabakasının üzerine yerleştirilen bir tabakadır (İlıcılı vd., 2001).

Kaplama tabakası, üstyapıda trafik yüklerinden doğrudan etkilenen en üst tabakadır ve bu nedenle trafik yüklerinin yarattığı basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede görülmesi nedeniyle, diğer tabakalara göre daha yüksek elastikiyet özelliğine sahip olmalıdır. Kaplama tabakası; trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı koymak, sürüş güvenliği ve konforunu sağlamak ve kalıcı bozulmalara karşı yolu korumak gibi önemli işlevler taşımaktadır (KGM 2000).

2.2.6. Bitüm

Bitüm, doğal ya da pirojenik kökenli hidrokarbonların karışımından veya bunların her ikisinin de bir kombinasyonu olarak tanımlanır. Genellikle sıvı, yarı katı veya katı halde olabilen, metal içermeyen türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özelliği olan ve karbon disülfürde tamamen çözünebilen madde şeklinde tanımlanabilir.

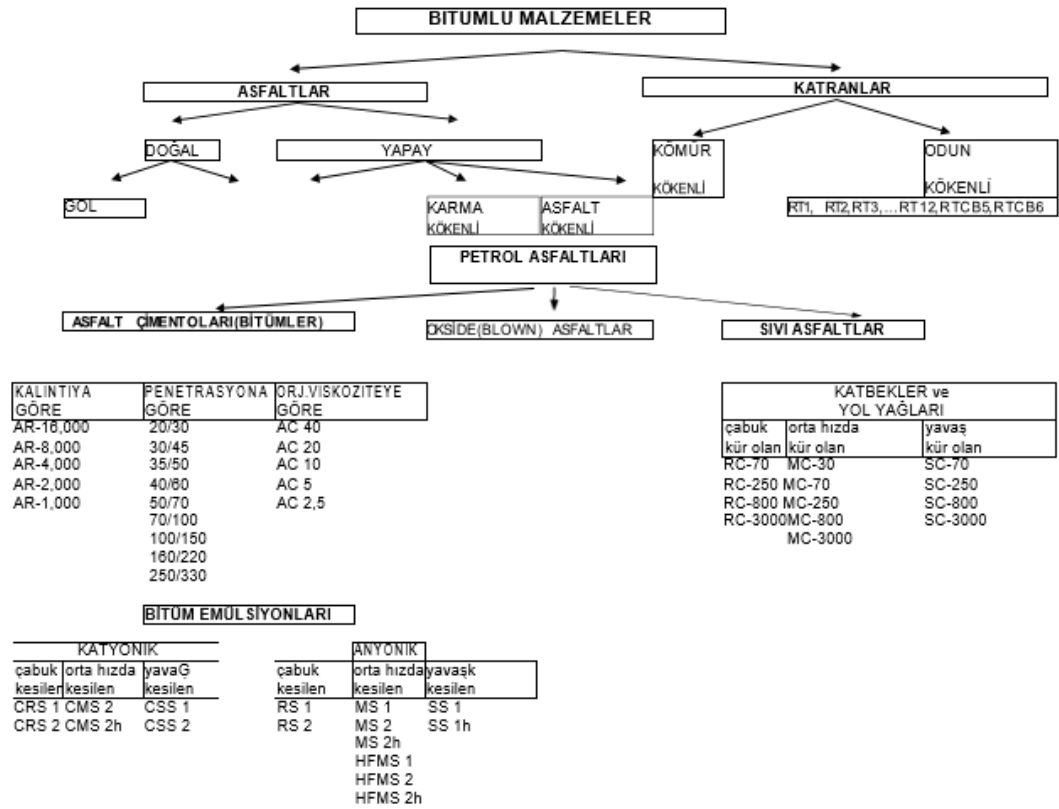
Bitüm, hidrokarbonlardan oluşmaktadır ve trikloretilen maddesinin içerisinde çözünebilir. Bitüm, ısıtılınca yumuşar ve uçucu bir özelliği yoktur. Bitüm, petrolün rafinerilerde damıtılmasıyla elde edilir.

2.2.7. Bitümlü bağlayıcılar

Bitümlü bağlayıcılar temel olarak iki kısımda incelenirler: Asfalt ve katranlar. Asfaltlar ise kendi içerisinde doğal ve yapay asfaltlar olarak iki gruba ayrılabilir. Mineral maddeler ile karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltlarına doğal asfaltlar denir. Yapay asfaltlara bakacak olursak ham petrolün arıtılması ile elde edilirler. Şekil 2.4’de bu akış ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bitümlü bağlayıcılara yapılan bazı deneyler ise aşağıda verilmiştir:

- Penetrasyon deneyi (TS EN 1426)
- Yumuşama noktası deneyi (TS EN 1427)
- Fraass kırılma noktası deneyi (TS EN 12593)
- Dönen ince film ısıtma kaybı deneyi (RTFOT) (TS EN 12607-1)
- Çözünürlük deneyi (TS EN 12592)

- Parafin mumu içeriği deneyi
- Cleveland açık kap metodu (TS EN ISO 2592)
- Pensky-Martens kapalı kap yöntemi ile parlama noktası deneyi
- Tag kapalı kap cihazı ile parlama noktası deneyi (TS 1171)
- Bitümün leke bırakma eğiliminin bulunması deneyi (TS EN 13301)
- Kül tayini deneyi (TS EN ISO 6245)
- Brookfield viskozite deneyi (ASTM D 4402)
- Modifiye bitümlere uygulanan deneyler (TS EN 14023)



Şekil 2.4. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması

2.2.8. Sıcak karışım asfalt (BSK)

140-160°C sıcaklıkta karıştırılmış agregayla yine aynı sıcaklıkta ısıtılmış olan asfalt çimentosunun eşit dağılımlı olarak karıştırılmasıyla elde edilmesidir. Bitüm, ısıtılıp uygun akıcılığa geldikten sonra yine ısıtılmış olan agregaya ile bir asfalt plenti tesisinde karıştırılır. Bu karışım, sıcak karışım asfalt (BSK) olarak adlandırılır (Orhan, 2012).

Bitümlü sıcak karışımların tasarımını oluşturmaya yardımcı olan iki deney yöntemi bulunmaktadır: Superpave ve Marshall. Ülkemizde en yaygın olarak kullanılanı Marshall tasarım yöntemidir. Yapılan bu çalışmada Marshall tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bruce Marshall, tekerlek yüklerine karşı koyabilmek için Marshall yöntemini bulmuştur. Marshall yöntemi, Superpave yöntemi ile karşılaştırıldığında daha kullanışlı ve daha hızlı bir deney yöntemidir. Akma, stabilite, pratik özgül ağırlık, bitüm oranı, boşluk oranı, bitümle dolu boşluk oranı, agregalar arası boşluk oranı gibi değerler Marshall tasarım yöntemi sayesinde tespit edilebilir. Marshall ve Superpave tasarım yöntemleri arasında bulunan en büyük farklılıklar agrega gradasyonları, bitüm seçimi ve sıkıştırma tekniklerinden kaynaklanmaktadır. Marshall yönteminin aksine, Superpave tasarım yöntemi sürekli gradasyon yerine sınırlı gradasyon kullanmaktadır. Ayrıca, Superpave yönteminde bitüm seçimi, Marshall tasarım yöntemine göre daha hassastır ve malzeme özelliklerinin yanı sıra iklim koşulları ve coğrafi enlem gibi faktörleri de önemli ölçüde göz önünde bulundurmaktadır. Karışımların sıkıştırılması sırasında Marshall yöntemi darbeli sıkıştırma yaparken, Superpave yöntemi yoğurmalı sıkıştırma uygulamaktadır. (Namlı vd., 2007).

2.2.9. Bitümlü sıcak karışımlardan beklenen özellikler

Bitüm, inşaat ve endüstri alanlarında yapım malzemesi olarak sıkça kullanılmaktadır. Fakat bitüm çelik ya da çimento betonu gibi malzemelerle aynı mekanik özellikleri göstermemektedir. Yoğun gradasyonlu asfalt kaplama karışımının, hizmet ömrü boyunca istenen performansı gösterebilmesi için uygun şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu amaçla, karışımın rijitlik, stabilite, dayanıklılık, yorulma direnci, esneklik, kayma direnci, geçirgenlik ve işlenebilirlik gibi özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. En uygun şartların sağlanabilmesi için karışımlar hazırlanırken bu özelliklere dikkat edilmesi gerekmektedir.

2.2.9.1. Bitümlü sıcak karışımların rijitliği

Bitüm, visko-elastik ve termoplastik malzeme olduğu için mekanik özellikleri belirlenirken Rijitlik Modülünden yararlanılır. Elastik malzemelerin elastikiyet modülüne benzeyen Rijitlik modülü (R_m), ısı ve yükleme hızına bağlı olarak aşağıda verilen (2.1) bağıntı ile bulunur:

$$R_m(t, \dot{\epsilon}) = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.1)$$

σ : Gerilme,

ϵ : Şekil değiştirme (deformasyon).

Burada t , ısıyı, t ise yükleme süresi ya da hızını ifade etmektedir. Bitümlü sıcak karışımların yükleme süresi ya da hızı ve ısı etkisi altındaki gerilme ve bozulmalar arasındaki ilişkiyi ifade etmek için rijitlik kavramı kullanılır. Rijitliğe genel anlamıyla bakarsak yükleme süresi ve ısı ile ters, yükleme hızı, karışımın yoğunluğu ve asfaltın viskozitesi ile doğru orantılıdır.

2.2.9.2. Bitümlü sıcak karışımların dayanıklılığı (Durabilitesi)

Asfalt kaplama karışımlarının, hava, su, sıcaklık ve trafik gibi dış etmenlerin aşındırıcı etkilerine karşı direnç gösterme yeteneğini ifade eden bir özelliktir. Bu etkiler arasında, asfaltın okside olması, buharlaşması gibi kimyasal değişiklikler ve aynı zamanda suyun donma çözülmesi ile kaplama ve agrega üzerinde meydana gelen değişiklikler de yer almaktadır. Dayanıklılık özelliği çoğu zaman yüksek asfalt içeriği, yoğun ya da iyi derecelenmiş agrega gradasyonu ve iyi sıkıştırılmış geçirimsiz karışımlar sayesinde artmaktadır. Karışımında bulunan asfalt miktarının artırılması agrega danelerini saran ince film tabakasını kalınlaştıracak ve bu dadaha kalın asfalt filmlerin yaşlanmaya (sertleşmeye) karşı dirençlerinin artmasını sağlayacak aynı zamanda boşluk miktarını azaltacağı için karışıma hava ve su girmesini zorlaştıracaktır. Fakat, daha kalın asfalt filmi tekerlek izi deformasyonu ve sıcak havalarda kuma oluşumuna daha yatkın olduğu unutulmamalıdır. Suyun etkilerine karşı koyabilmek için aynı koşulların yanında daha yoğun bir karışım kullanarak asfaltın agregadan soyulmasına karşı daha yüksek direnç göstermesi sağlanacaktır. Karışımlarda kullanılan yetersiz oranlardaki asfalt, trafiğin sebep olduğu aşındırma etkisiyle agreganın yüzeyden ayrılmasına neden olacaktır. Ayrıca, sıcak karışım sırasında asfaltın aşırı ısıtılması, yaşlanma etkisiyle ilerleyen safhalarda asfaltın kırılganlaşmasına ve bunun sonucunda ise ayrışmaların ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Karışımın aşınma direnci doğal olarak kullanılan agreganın dayanıklılığına bağlı olduğundan, sıcak karışımında kullanılan agreganın kırılmış, elenmiş ve aşınmaya, soyulmaya, ufalanmaya karşı dirençli olması gerekmektedir.

2.2.9.3. Bitümlü sıcak karışımların stabilitesi

Stabilite, asfalt kaplama karışımlarının, etki eden yükler yüzünden bünyesinde oluşabilecek bozulmalara karşı koyabilme yeteneğidir. Stabilitenin yetersiz olduğu kaplamalarda çökme, tekerlek izi ve ondülasyon gibi bozulmalar meydana gelir. Yüksek stabiliteye sahip kaplamalar, düşük stabiliteye sahip kaplamalar gibi yük altında esnek davranmadıkları için çatlama eğilimi gösterir ve bu nedenle tercih edilmez. Kaplama tabakasının stabilitesi, sıcak karışımın içsel sürtünme direnci ve kohezyonuna bağlıdır. Sıcak asfalt karışımlarının stabilitesini etkileyen faktörler arasında karışımın kayma mukavemeti, sıcaklık ve karışımındaki

agregaların yer değiştirmeye karşı koyma direnci olan eylemsizlik (atalet) yer alır. Sıcak asfalt karışımlarının kayma mukavemeti (τ) aşağıdaki (2.2) bağıntısı ile hesaplanır.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.2)$$

Burada ϕ , agrega daneleri arasında bulunan içsel sürtünme açısını, c , agrega ile asfalt arasındaki bağ (adezyon) kuvvetini ifade eden kohezyon, σ ise normal gerilmeyi ifade eder. İçsel sürtünme açısını etkileyen parametreler arasında agreganın yüzey dokusu, gradasyonu, dane şekli, karışımın yoğunluğu ve asfalt miktarı ile tipi vardır. Kohezyon ise yükleme hızı, yüklenen alan ve sıcaklık ile ters orantılı olan asfalt viskozitesinin etkisiyle doğrudan değişkenlik gösterir ve agreganın porozitesi, karışımdaki asfalt miktarı, asfaltın viskozitesi ve sıcaklığı, yükleme hızı ile filler/asfalt oranına bağlıdır. Sonuç olarak;

Agreganın pürüzlülüğünün, köşeliliğinin ve yoğunluğunun artması,

Karışımın boşluk oranının azalması ve yoğunluğunun artması,

Asfaltın viskozitesinin artması ya da katılaşması,

Isının azalması ve yükleme hızının artması,

Asfalt tabakasının kalınlığının artması, sıcak asfalt karışımların stabilitesi de artıracaktır.

2.2.9.4. Bitümlü sıcak karışımların yorulma mukavemeti

Yorulma, malzemelerin çekme mukavemetinden daha düşük bir değerdeki tekrarlı gerilmeler altında kırılma meydana gelmesi olarak tanımlanır. Yorulma mukavemeti ise, bitümlü sıcak kaplamaların tekerlek yüklerinin yarattığı tekrarlı gerilmelere karşı, çatlak oluşmadan önce esneyerek ya da geçici bozulmaların oluşmasına izin vererek dayanabilme yeteneğidir. Yapılan araştırmalara göre, kaplama karışımlarının yorulma direnci üzerinde asfalt içeriği büyük bir öneme sahiptir. Deneyler, asfalt karışımlarında yoğun gradasyonun açık gradasyona göre daha yüksek yorulma mukavemeti sağladığını göstermiştir. Karışımların içerisinde, sıkıştırılmış kaplamada yüzeye çıkmaya neden olmayacak şekilde daha fazla asfalt içeriğine izin verecek iyi derecelenmiş agregalar tercih edilmelidir. Yorulma mukavemeti; kaplamanın rijitliğinin, yoğunluğunun ve kalınlığının artması, eğilme gerilmesinin azalması ve asfaltın yumuşayıp miktarının artmasıyla birlikte yükselmektedir. Bir kaplamanın yorulma ömrü, aşağıdaki (2.3) bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$N_f = K \left(\frac{1}{\epsilon} \right)^k \quad (2.3)$$

N_f : Yorulma çatlağının meydana gelmesi için gerekli olan tekrarlı yük uygulama sayısı yani yorulma ömrü,

ϵ : Uygulanmış olan şekil değiştirmenin maks değeri,

K ve k ise bitümlü karışımların özelliklerine ve kompozisyonuna bağlı olan katsayılar demektir.

Genel olarak, karışımın boşluğu azaldıkça, rijitliği ve kalınlığı arttıkça, ayrıca asfalt miktarı ve yumuşaklığı yükseldikçe yorulma ömrü de artar.

2.2.9.5. Bitümlü sıcak karışımların esnekliği (Fleksibilitesi)

Esneklik, bitümlü sıcak karışım kaplamaların trafik ve çevre gibi etkiler ile çatlamaya uğramadan hafifçe eğilebilmesi, temel ve alttemel tabakalarının aşamalı oturmalarına uyabilmesi yeteneği olarak ifade edilir. Asfalt kaplama karışımlarının esnekliği, asfalt içeriğinin yüksek olması ve nispeten açık gradasyonlu ya da boşluklu agregalarla geliştirilebilir. Fakat, kaplamaların esnekliğindeki artış ile stabilitenin azalacağı göz önünde tutulmalıdır.

2.2.9.6. Bitümlü sıcak karışımların geçirgenliği (Permeabilitesi)

Geçirgenlik, bitümlü sıcak karışım kaplamalarının içine doğru ya da içinden hava ve suyun geçmesine karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Kaplamalardaki boşluk miktarıyla boşlukların birbiriyle bağlantısı, kaplama yüzeyinde bulunan su, hava ve gazların geçmesini sağlayacak gerekli koridorları oluşturur. Kaplamalardaki geçirgenliğin artması ile içeri girmiş olan hava ve su asfaltın yaşlanması hızlandırır, soyulma mukavemeti azalış gösterir ve donma-çözülme tekrarları ile de kaplamada bozulmalar başlar. Kaplamadaki geçirimsizliği artıran karışımın asfalt miktarının, yoğunluğunun ve sıkıştırmasının artması ve boşlukların azalmasıdır. Fakat kaplamalardaki stabilite ihtiyacı, sıcak havalarda kuma ve trafik altında sıkışmaya izin vermek amacı ile bir miktar boşluk bırakılması gerekmektedir. Bunun yanı sıra, karışımın içsel sürtünme açısının azalmasını önleyebilmek ve kaplamanın geçirgenliğini azaltıp asfaltın yaşlanmasını geciktirebilmek için boşluk miktarı sınırlandırılmalıdır.

2.2.9.7. Bitümlü sıcak karışımların kayma direnci

Kayma direnci, asfalt kaplamalarının üzerinden geçen taşıtarın frenleme esnasında güvenli bir şekilde durabilmesi ve kurbalarda merkezkaç kuvvetinden kaynaklanan savrulmaların önlenmesi için tekerlek ile kaplama arasındaki gerekli sürtünme direnci olarak ifade edilmektedir. Genel olarak kayma direnci; düşük asfalt miktarı, cilalanma direnci yüksek, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega ile açık ve kaba gradasyonlu karışım kullanılarak artırılabilir.

2.2.9.8. Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği

İşlenebilirlik, karışım serilip sıkıştırıldığı esnada gösterdiği kolaylığın derecesi olarak ifade edilir. İşlenebilirlik, karışım tasarım parametrelerinde, agrega kökeni ya da gradasyonunda yapılacak değişikliklerle artırılabilir. İşlenebilirlik genel olarak;

- Kaba agrega miktarının ve agrega maksimum dane boyutunun artması,
- Kırmataş agrega kullanılması ve agrega kırılmışlığı ile yüzey pürüzlülüğünün artması,
- Karışım ısısının düşmesi,
- Asfaltın katılaşması ya da viskozluğunun artması,
- Filler miktarı ve ara boyutlu malzeme miktarının aşırı artması ile azalış gösterecektir.

Düşük işlenebilirlikteki karışımlar, serme ve en önemlisi sıkıştırma zorlukları yaratacaklarından, genellikle homojen yapıya sahip olmayan ve stabilitesi düşük olan kaplamalar meydana getirecektir.

2.2.10. Esnek üstyapılarda meydana gelen deformasyon tipleri

Esnek üstyapıların servis sürelerince maruz kaldıkları etkiler yüzünden yapısal ve işlevsel açıdan beklenen performansları karşılayamadıkları zamanlarda, üstyapı bütünlüğünde, sürekliliğinde ve de direncinde meydana gelen kayıplar “bozulma” olarak ifade edilir. Esnek üstyapıda meydana gelen deformasyonların önlenmesi için deformasyonların nedenlerinin iyi bilinmesi gerekmektedir (Yarcı, 2021).

Bu deformasyonların çok çeşitli sebepleri olabilir: Proje veya yapım sırasında yapılan hatalardan dolayı meydana gelen bozulmalar, az ya da çok kullanılan bitüm miktarı, alt

tabakaların sıkışma derecesi, kullanılacak agregaların standartlara uygunluğu, bitüm cinsinin istenilen amaca uygunluğu, yapım esnasındaki iklimin durumu gibi etkenler örnek verilebilir.

Bu tür deformasyonlar; çatlama, çökme, kuma veya kayganlık olarak ortaya çıkabilir. Bu deformasyon tiplerini oluşum zamanlarına göre sınıflandıracak olursak, imalattan hemen sonra oluşan bozulmalar ve uzun vadede oluşan bozulmalar olmak üzere 2 kategoride inceleyebiliriz (Ayçiçek, 2011).

2.2.10.1. Terleme (Kuma)

Karışım içinde bulunan asfaltın, sıcaklığın etkisiyle yükselip yüzeye doğru çıkması ve yüzey üzerinde oldukça kalın bir asfalt film oluşturmaya kuma denir. Kuma yüzünden yüzeyde bulunan agregalar tamamen asfalt filmiyle kaplanacağı için bu durum sürtünme katsayısını düşürecektir.

Kusmanın sebepleri arasında karışım içerisindeki yüksek asfalt miktarı ve sıcak havalara gösterilebilir. Diğer bir sebebi ise ağır dingil yükleri altında basınç ile asfaltın yüzeye doğru çıkmasıdır. Eğer karışımlarda bulunan asfalt yüzdesi yüksek ve boşluk yüzdesi çok düşük ise sıcak havalara etkisi ile genişleyen ve boşluk bulamayan asfalt yine yüzeye doğru çıkacaktır. Kalın serilen astar ya da yapıştırma tabakaları da kusmanın sebepleri arasında gösterilebilir. Bu tip bozukluklar kusmanın görüldüğü yerler ile ilgili granülometriye uygun boyutta agrega serilip gerekirse silindir ile sıkıştırılarak giderilebilir.



Şekil 2.5. Yüksek şiddette kuma örneği

2.2.10.2. Tekerlek izi (Oluklanma)

Yoldan geçen araç tekerleklerinin yolun yüzeyine değdiği kısımlarda, yol eksenini boyunca oluşan düşey kalıcı bozulmalar olarak tanımlanabilir. Ticari araçların olağan sınırının üzerinde bir yük ile yüklenmesi bu araçların düşük hızla hareket etmesi, ağır ve yüksek sayıda tekrar eden yükler, trafik yüklerine ve iklim koşullarına uygun olarak seçilmeyen malzeme kullanımı ayrıca bitüm yüzdesinin yüksek kullanılması, karışımın yetersiz sıkışması gibi tasarım ve yapım sırasında oluşan hatalar bu bozulmanın sebepleri olarak sıralanabilir. Tekerlek izi oluşumu yolun enine düzgünlüğünü olumsuz etkiler.

Enine düzgünlük, kabul edilebilir sınırların üzerinde bozulduğunda, yol hem konfor hem de güvenlik açısından ciddi sorunlara neden olur. Farklı sebeplere bağlı olarak 4 çeşit tekerlek izi oluşum şekilleri vardır. Bunlar;

- Yapısal tekerlek izleri,
- Akma tekerlek izleri,
- Aşınma tekerlek izleri,
- Oturma (konsolidasyon – sıkışma) tekerlek izleri (Kutluhan vd., 2011).



Şekil 2.6. Tekerlek izi(oluklanma) örneği

2.2.10.3. Çatlaklar

Çatlaklar genelde dingil yükleri ve bunların fazla tekrarı yüzünden oluşur. Dingil yüklerinin kaplama tabakasında oluşturduğu gerilmeler, kaplama malzemesinin mukavemetini aştığında çatlamalar oluşmaktadır. Ayrıca araçların ani hız yapmaları veya yavaşlamaları sonucunda ortaya çıkan yatay kuvvetler de çatlaklara neden olabilir. Bu etmenlerin haricinde; nem ve sıcaklıktaki değişimler, agreganın fazla kullanılması, asfaltta bulunan uçucu maddelerin buharlaşması, kireç ile stabilizasyonu yapılırken veya çimentoyla kür olurken

oluşan hacim değışiklikleri vb. bir takım dış etkenler kendi başlarına veya trafiğın etkisiyle birlikte çatlaklıklara neden olabilir. Çatlamalarda, en önemli rolü asfaltın çekme mukavemeti oynar. Soğuk havalar çekme mukavemetini artırırken yavaş yüklemeler düşmesine sebep olur. Trafik etkeni ve hacim değışikliklerinin dışında, çatlamaya neden olan faktörler şunlardır (İlcalı vd., 2001):

- Fazla miktardaki yük tekrarı (yorulma),
- Kaplama (satih) tabakası kalınlığının yetersizliğı,
- Kaplama altındaki tabakaların kalınlığının yetersizliğı,
- Kaplama altında bulunan tabakaların yüksek deformasyonları sebebiyle, malzemelerin dağılımı veya ayrışımı,
- Drenaj yetersizliğı,
- Don tesirine karşı duyarlı olan temel ve alttemel malzemeleri,
- Satih ve banketlerde meydana gelen nem farklılıkları,
- Yanal desteklerin (banketlerin) yetersiz oluşu,
- Araçların ani hızlanma veya yavaşlamalarından kaynaklanan yatay kuvvetler,
- Karışım tipi kaplamalarda yapım esnasında finişerin sık sık durması,
- Yol kaplama yapımında derzlerin (ek yerlerinin) dikkatsiz yapılmasıdır.

Çatlaklar aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

1)Timsah sırtı çatlakları (Yorulma çatlakları)

2)Yansıma çatlakları

3)Büzölme çatlakları

4)Kenar çatlakları

5)Kaplama, banket ekyeri çatlakları

6)Şerit derzleri boyunca oluşan çatlaklar

7)Kayma çatlakları



Şekil 2.7. Timsah sırtı çatlağı örneği



Şekil 2.8. Yansıma çatlağı örneği

2.2.10.4. Ondülasyonlar

Bitümlü sıcak karışımların stabilitelerinin yetersiz olmasından kaynaklanan trafik akışının doğrultusunda asfalt kaplamalarda oluşan enine ve aralıklı kabarmalardır. Bu tür deformasyonlar tekerleklerin özellikle de sıcak havalarda mekanik etkisiyle ötelenerek yol eksenine dik veya paralel yönde oluşan yüzey bozulmalardır. Yolun yüzeyinde dalgalanmalar, tepcikler, çukurlaşmalar ve düzensizlikler görülür. Bu saptamalar sürüş konforuna ve sürüş güvenliğine olumsuz yönde etkilere neden olurlar. Bunların nedeni olarak; asfalt karışım

stabilitesinin yetersiz oluşu, karışımların serim esnasında yapılan serme ve sıkıştırma hataları, kavşaklar, trafik ışıkları ve duraklarda duruş ve kalkış hareketlerinin etkisi, üstyapı tabakaları arasındaki bağlantının yetersiz oluşu, yoğunlaştırma tabakasının yanlış uygulanması, temel tabakasında bulunan stabilite bozukluklarının yüzeye yansması, ağır trafik altında suya doygun granüler tabakaların varlığı gibi etkenler bulunmaktadır (Arık, 1998).

2.2.10.5. Bölgesel çökme (Oturmalar)

Bu tip deformasyonlar 0.5-2 m yarıçapında dairesel ya da daireye yakın şekillerde bölgesel çökme ya da oturmalar olarak görülür. Bölgesel şeklinde oldukları için tamirleri kolay ve mümkündür.



Şekil 2.9. Bölgesel çökme örneği

2.2.10.6. Ayrışmalar

Bu tip bozulmalara, aşınma tabakasından küçük parçalar halinde trafiğin ve iklimin etkisiyle agrega tanelerinin koparak ayrılması sebep olur. Genel olarak ayrışmalara su ve trafiğin etkisi, bitümlü sıcak karışım içindeki kil toprakları ya da kille kaplanmış agrega taneciklerinin olması, yetersiz sıkıştırma, boşluk yüzdesinin yüksek olması, yetersiz bitüm yüzdesi, yaşlanma sebebi ile oluşan asfalt sertleşmesi gibi sorunlar yol açar.

2.2.11. Modifiye bitüm

Karayolu üstyapıları esnek ve rijit olmak üzere iki şekilde inşa edilmekte olup, bağlayıcı olarak bitümlü malzemeler kullanılmaktadır. Yüksek konfor sunması ve yapımının kolay olması gibi nedenlerden dolayı esnek üstyapılar, rijit üstyapılara kıyasla daha fazla tercih edilmektedir. Son yıllarda dünya genelinde karayollarına olan talep hızla artmış; trafik yoğunlaşmış, dingil yükleri ve lastik basınçları yükselmiştir, saf bitüm ve yoğun gradasyonlu standart asfalt betonunun ihtiyaçları karşılamakta yetersiz kaldığını ve beklenen performansı gösteremediği görülmüştür. Bu yetersizlikler, tekerlek izi oluşumları (kalıcı deformasyon), yorulma çatlakları ve termal çatlakların hızla oluşmasına yol açarak kaplamaların hizmet ömrünü kısaltmıştır. Kaplamaların hizmet ömrünü uzatmak, oluşabilecek deformasyonları engellemek veya geciktirmek için değişik katkıları kullanılmaktadır. Bu katkıları bitüme ya da agrega-asfalt karışımına eklenerek kullanılırlar (Alataş vd. 2012).

Yol üstyapılarında kullanılan bağlayıcıların ya da karışımların performansını iyileştirmek amacıyla bağlayıcıların içerisine çeşitli katkı maddelerinin belirli oranlarda ve koşullarda karıştırılması modifikasyon olarak ifade edilmektedir (Işıkyakar, 2009).

2.2.12. Modifiye Bitümlerin Kullanım Amaçları

- Bitümün servis sıcaklığı aralıklarını genişletebilmek, yumuşama noktasını yükseltebilmek ve penetrasyon değerini ise düşürebilmek, (Işıkyakar 2009)
- Bitümün sıcaklık değişimlerine olan duyarlılığını azaltmak (Penetrasyon indeksini yükseltmek),
- Bitümün reolojik ve mekanik özelliklerini geliştirmek. Geniş sıcaklık ve yükleme hızı aralıklarında kalıcı deformasyona ve kırılmalara karşı mukavemeti artırabilmek,
- Tekrarlı yükler altında yorulma mukavemeti artırabilmek,
- Yaşlanmayı yavaşlatabilmek (Işıkyakar 2009),
- Düşük sıcaklıklarda daha yumuşak karışımlar elde edebilmek ve çatlakları azaltabilmek,
- Yüksek sıcaklıklarda daha sert karışımlar elde edebilmek ve tekerlek izinde oturmaya azaltabilmek,
- Yapım sıcaklıklarında viskoziteyi azaltmak,
- İşlenebilirliği ve sıkışmayı iyileştirebilmek,

- Karışımların dayanımını ve stabilitesini artırabilmek,
- Karışımların aşınma dayanımını iyileştirebilmek ve agrega kopmasını azaltabilmek,
- Kaplamaların düşük sıcaklık maliyetini azaltabilmek,
- Karışımların yorulma dayanımını iyileştirebilmek.
- Asfalt çimentolarının kalitesini yükseltebilmek,
- Yaşlanmış olan asfalt bağlayıcıyı gençleştirmek,
- Asfalt bağlayıcı ömrünü uzatabilmek,
- Agreganın üzerinde daha kalın asfalt filmi oluşturabilmek,
- Yapışmayı geliştirmek ve agrega yüzeyinden asfalt çimentosunun soyulmasını azaltmak,
- Kusmayı azaltmak.
- Geliştirilmiş çatlak dolgusu sağlayabilmek,
- Yaşlanmaya ya da oksidasyona karşı dayanım sağlamak.
- Kaplama tabakalarının kalınlığını azaltabilmek,
- Kaplamaların ömür döngü maliyetini azaltabilmek,

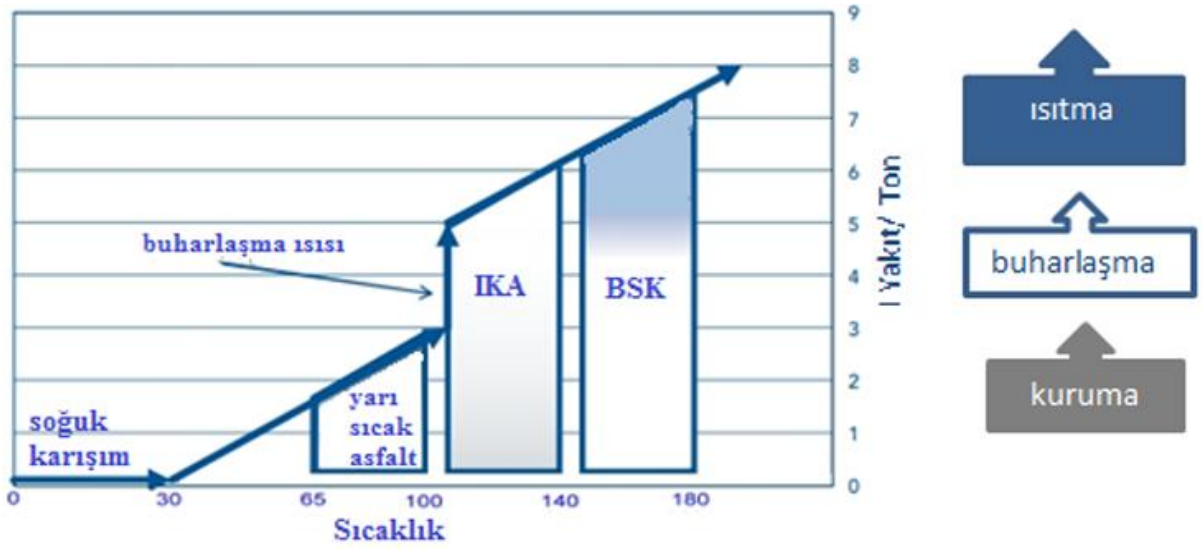
Gibi faktörler bulunmaktadır.

2.2.13. Ilık karışım asfalt (IKA)

Son yıllarda çevre bilincinin artmasıyla doğal kaynakların korunması, enerji tasarrufu ve sera gazlarının azaltılması gibi konular, avantajlarından dolayı çevre dostu ılık karışım asfaltlara olan ilgiyi artırmıştır.

Ilık karışım asfaltların kullanım amacı üretimde enerji tasarrufu sağlayabilmek, çevre ve işçi sağlığına zararlı olan emisyonları azaltabilmek için karışım sıcaklığını en az 20-40°C düşürmeyi sağlamaktır. IKA'lar hazırlanırken düşük sıcaklıkta agreganın tamamen kaplanabilmesini ve karışımın sıkıştırılabilirliğini sağlayabilmesi için bağlayıcının viskozitesini düşürmeye yarayan çeşitli teknikler ve katkı maddeleri kullanılmaktadır.

IKA teknolojilerini üretim sıcaklıklarına göre sınıflandırdığımızda; 0-30 °C arası sıcaklıkta üretilenler soğuk karışım, 65-100 °C arası yarı ılık karışım asfalt, 110-140 °C arası ılık karışım ve 140-180 °C arası sıcak karışım asfalt olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.10'da, bu karışımlar üretim sıcaklıklarına göre sınıflandırılmış şekilde gösterilmiştir. (D'Angelo vd., 2008).



Şekil 2.10. Karışımların üretim sıcaklıklarına göre sınıflandırılması (D'Angelo ve ark., 2008).

2.2.14. IKA üretim teknolojileri

Üç ana gruptan oluşmaktadır. Bunlar;

- Organik katkılar (örn. Sasobit),
- Kimyasal katkılar (örn. Rediset, Cecabase, Revix, Iterlow),
- Köpüklendirme teknikleri (örn. Aspha-Min, Advera [Yapay zeolit]) dir.

2.2.14.1. Organik katkılar

Organik bazlı teknolojiler (örneğin: sasobit, sasobit redux, vb.), genellikle katkı maddesinin erime noktasının üzerindeki sıcaklıklarda asfalt bağlayıcının viskozitesini azaltır (Sukhija vd. 2024)

Bu teknolojiye sahip mumlar, 80-120 °C 'lık bir erime noktasına sahip yüksek moleküler hidrokarbon zincirleridir ve orijinal bağlayıcının özelliklerini değiştirebilirler. Karışıma toplam bitüm ağırlığının %2-4 oranında eklenir. Bu mumların eklenmesiyle genellikle elde edilen sıcaklık düşüşü 20-30 °C 'dır. Asfaltın deformasyon direncini arttırmaya yardımcı olurlar (Rubio vd., 2012).

2.2.14.2. Kimyasal katkıları

Kimyasal katkıları bitümün viskozitesini değıştirmezler daha ziyade daha düşük bir karıştırmaya sıcaklığında bağlayıcının kaplama kapasitesinin geliştirilmesine dayanır. Bu katkıları, agrega ile bitümün ara yüzeyi arasında, yüzey aktif madde olarak iğöre yaparak bağlayıcı ile agrega arasındaki sürtünme kuvvetlerini azaltır, bu da kaplamayı iyileştirir ve üretim sıcaklıklarını düşürür. Standart olarak, 85°C ile 140°C'lik sıcaklık aralığında, ara yüzeylerdeki sürtünme kuvvetlerini düzenlemekte ve azaltmaktadırlar. Bu sayede, bitüm ve agrega düşük sıcaklıklarda karıştırılır ve hazırlanan karışımın sıkıştırılması mümkün olur. Kimyasal katkıları karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını yaklaşık olarak 20 - 40°C azaltabilirler (EAPA, 2016).

Kimyasal İKA katkıları doğrudan bitüme eklenir ve daha sonra bu karışım agrega ile karıştırılır.

2.2.14.3. Köpüklendirme teknikleri

Asphamin gibi köpürtücü malzemenin karışımaya bağlayıcı ile aynı anda eklenmesiyle, kristal suyun tamamı açığa çıktığı için çok ince bir su spreyi oluşur, bu da bağlayıcıda hacim genişlemesine neden olur, böylece karışımın düşük sıcaklıklarda işlenebilirliği ve uyumluluğu artar.

Köpükleme teknikleri, %2-5 oranında soğuk su ekleyerek bitümün durumunu geçici olarak sıvıdan köpüğe dönüştüren tamamen farklı bir yaklaşım izler. Su kaynar ve bitüm içinde sıkışıp kalarak geleneksel sıcak karışım asfalttan daha düşük bir sıcaklıkta agrega ile karıştırılabilen köpüğü oluşturur. Bu İKA tekniklerinin nihai amacı, asfaltın üretim sıcaklığını düşürerek asfaltın sürdürülebilirliğini arttırmaktır, bu da sera gazı emisyonlarının ve yakıt tüketiminin azalmasına yol açar (Abed vd., 2020).

2.2.15. İKA faydaları

İKA katkıları, asfalt bağlayıcının viskozitesini düşürüp minimum ısı kullanarak karışımın işlenebilirliğini arttırmaya yardımcı olur. Karıştırma, taşıma ve serme işlemlerinin daha düşük sıcaklıkta yapılmasını sağlar. Daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı ise daha az emisyon, enerji maliyetinde tasarruf, daha uzun inşaat sezonu ve daha az koku sağlar.

2.2.15.1. Çevresel faydalar

Küresel ısınmanın giderek artması ve yeşil alanların azalması dünya genelini çevre dostu teknolojilere yönlendirmektedir. BSK'lar üretilirken çevresel anlamda karşılaşılan en büyük sorun bitümün üretilmesi, plente taşınması, plente karıştırılması, üretilen asfalt karışımların sahaya taşınması ve serilmesi işlemi sırasında açığa çıkan gaz emisyonlarının (NO_x, CO₂, CO, HC gazları ile toz ve uçucu parçacıklar) doğaya salınmasıdır. Serme ve sıkıştırma sıcaklıklarının düşürülmesi istenmeyen bu gazların ortaya çıkmasını da önemli derecede azaltacaktır (D'Angelo vd. 2008). Bu sayede, asfalt üretiminde çalışan işçilerin daha düşük sıcaklıklarla çalışması sağlanarak insan sağlığına zararlı bu gazları soluma riskleri minimuma indirilecektir.

2.2.15.2. Ekonomik faydalar

IKA'nın temel ekonomik faydası enerji tasarrufundan gelir. Düşük enerji tüketimi düşük sıcaklıklarla sağlanacaktır bu da daha az yakıt/enerji maliyeti anlamına gelmektedir ve IKA üretimi sırasında harcanan enerji BSK üretimi sırasında harcanan enerjinin yüzde 60-80'i kadar olduğu belirlenmiştir (Rubio vd., 2012). Yapılan diğer çalışmalar, IKA teknolojileri sayesinde %20-35 oranında yakıt tasarrufu sağlandığını göstermektedir (D'Angelo vd., 2008). Bazı saha uygulamalarında ise üretim sıcaklığında 17°C'lik bir düşüşe bağlı olarak yakıt tüketiminde %10-30 arasında azalma rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, yakıt tasarrufu oranının doğrudan üretim sıcaklığının düşürüldüğü dereceyle ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. (Kaya, 2014).

2.2.15.3. Üretim faydaları

Düşük sıcaklıkta karıştırma, bitümlü bağlayıcının daha az yaşlanması sağlayarak karışımın daha yüksek performans göstermesine ve servis ömrünün uzamasına katkıda bulunmaktadır. Düşük sıcaklıkta üretilen ve daha kısa ısıtma süresi nedeniyle bu karışımların emisyon değerleri de daha azdır. Düşük sıcaklıkta üretilmesi, üretim ekipmanlarında daha az termal yorulmaya neden olmaktadır. Ayrıca, IKA teknikleri asfaltın geri kazanımına da uygundur.

2.2.15.4. Uygulama kolaylığı

Plentten alınan BSK'lar, nakliye esnasında serim alanına gelene kadar soğudukları için uygulama sıcaklığının çok altında kalırlar bu yüzden gerekli boşluğu elde edememektedirler. Ancak, IKA'ların düşük sıkıştırma sıcaklıklarına sahip olmaları bu sorunu en aza

indirmektedir. Ayrıca, yapılan çalışmalar İKA'ların uzun mesafelere taşınmaları sırasında gerekli işlenebilirlik ve sıkıştırılabilirlik özelliklerini daha kolay koruduğunu göstermiştir (Kaya, 2014).

WMA teknolojilerinde, sıkıştırmanın sonunda bitümlü malzemenin sıcaklığı HMA'ya göre daha düşük olması servis sıcaklığına daha yakın olmasını sağlar bu da WMA kullanımı sayesinde trafiğe daha hızlı dönüş sağlanır.

Yine daha düşük sıcaklık ve daha kısa ısıtma süresi sayesinde azaltılmış toz üretimi; uzatılmış asfaltlama sezonu (yani, daha soğuk havalarda asfaltlama) sağlanır. Uzatılmış karışım taşıma mesafesi (ortam sıcaklığı ile karışım sıcaklığı arasındaki farkın daha az olması nedeniyle) ile böylece genişletilmiş pazar alanları sağlanır.



3. YÖNTEM

3.1. Materyal

Çalışmada kullanılan Cecabase RT 945, ARKEMA firmasından temin edilmiştir. Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü 164. Şube Müdürlüğü'nden temin edilmiş olan kalker esaslı kırmataş agregası kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak 70/100 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır.

3.1.1. Bitüm

Çalışmada 70/100 saf bitüm kullanılmıştır. Bitüm özellikleri geleneksel yöntemler aracılığı ile belirlenerek modifiye bitüm ile karşılaştırma yapılabilmesi için Tablo 3.1'de verilmiştir.

3.1.2. Bitüm özgül ağırlık deneyi

Bu deney yapılırken TS EN 15326+A1 ve ASTM D70 standartları dikkate alınmıştır. Deney 50 ml hacmindeki 2 adet cam piknometreler aracılığıyla yapılır. Deneye başlarken önce piknometreler temizlenip boş olarak hassas bir terazi yardımı ile tartılıp (W_p) not edilir. Piknometrelerin içerisine su doldurulup ağzı kapatılır ve dışı kurulanır daha sonra tekrar tartılıp (W_{p+s}) not edilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Su doldurulmuş piknometrenin tartımı

Akışkan hale gelene kadar ısıtılmış olan bitüm, piknometrelerin içerisine yerleştirilirken bir huni ile doldurularak tartılır (W_{p+b}) not edilir. Piknometrenin içindeki bitümün buharlaşmasını engellemek için ağzı kapatılmadan önce üzerine damıtılmış su doldurularak

ağızı kapatılır. Piknometreler sıcaklığı $25 \pm 0,5$ °C de olan su banyosu içerisinde 30 dakika bekletilir. Bu sürenin sonunda ise su banyosundan çıkarılır ve dış kısmı kurulanır tekrar ayrı ayrı tartılıp (W_{p+s+b}) not edilir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Bitüm ve su doldurulmuş piknometreler

Not edilmiş olan tartım sonuçları, aşağıda verilen (3.1) ve (3.2) bağıntılar ile iki numune için ayrı ayrı özgül ağırlık değerleri hesaplanır. İki numunenin özgül ağırlığının ortalaması alınarak bitüm özgül ağırlığı bulunmuş olur.

$$G_{sb} = \frac{W_b}{[(W_{p+s} - W_p) - (W_{p+s+b} - W_{p+b})]} \quad (3.1)$$

$$W_b = W_{p+b} - W_p \quad (3.2)$$

Burada;

G_{sb} : Bitüm özgül ağırlığını (g/cm^3),

W_p : Piknometre ağırlığını (g),

W_{p+s} : Piknometre + su ağırlığını (g),

W_{p+b} : Piknometre + bitüm ağırlığını (g),

W_{p+s+b} : Piknometre + su + bitüm ağırlığını (g),

Wb: Bitüm ağırlığını (g) ifade etmektedir.

Kullanılan Bitümün Özellikleri:

Tablo 3.1. B 70/100 penetrasyon dereceli saf bitümün özellikleri

B 70/100				
Yapılan Deneyler	Birim	Deney	Şartname	Ölçülen
		Standardı	Limitleri	Değerler
Penetrasyon	0,1 mm	TS-EN-1426	70-100	83,3
Yumuşama Noktası	°C	TS-EN-1427	43-51	45,5
Parlama Noktası	°C	TS-EN-22719	min 230	302
Özgül Ağırlık	g/cm ³	TS-EN-15326+A1	1,0-1,1	1,02

3.1.3. Agregat ve filler

Bu tez çalışmasında, Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü 164. Şube Müdürlüğü'nden temin edilen kalker esaslı kırmataş agregası kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır. Kullanılan agregalar Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan agregalar

3.1.4. Kaba agreganın özgül ağırlık deneyi

Bu deney yapılırken ASTM C127, AASHTO T 85-14 ve TS EN 1097-6 standartları dikkate alınmıştır. Özgül ağırlık, agreganın birim hacimdeki ağırlığının yine aynı hacimde ve 25°C sıcaklıktaki suyun ağırlığına oranı alınarak bulunur. Kaba agrega yapı malzemelerinin dayanıklılık, taşıma kapasitesi vb. özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Numuneler hazırlanırken 4,75 mm'lik eleğin üzerinde kalan kaba agregalardan, kullanılacak gradasyonun agrega dane dağılımını gösterecek şekilde 1 kg'dan oluşan iki adet numune tartılır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Deney numuneleri

Agregaların tartımı yapıldıktan sonra bir tepsi içerisine konularak yıkanır ve agregaların üzerini geçecek şekilde su eklenir. Hazırlanan numuneler 24 saat süresince su içerisinde tepside bekletilir.



Şekil 3.5. 24 saat su içinde bekletilmiş agregalar

24 saat bekletilen agregalar suyun içerisinde çıkarılır ve havlu ya da peçete kullanılarak kurutulur yüzey kuru suya doymuş (W_{doygun}) hale getirilip tartılarak not edilir. Numuneler 5 cm'den az olmayacak şekilde su yüzeyine kafes örgülü tel sepet içerisinde daldırılır. Taneler arasında kalabilecek hava kabarcıklarını önleyebilmek için numune kovanın içerisinde en az 10 defa sağa sola sallandıktan sonra su yüzeyine çıkartılır ve sudaki ağırlığı (W_{su}) tartılır. Numuneler sudan çıkarılır ve kuruması için 110°C sıcaklığa ayarlanmış etüvde 24 saat bekletilir. Numunenin havadaki kuru ağırlığı (W_{hava}) tartılmadan önce oda sıcaklığına gelene kadar soğutulur ve tartım yapılır. Bir numunenin kaba agrega hacim özgül ağırlığı, zahiri özgül ağırlığı, efektif özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi not edilen bu sonuçlarla aşağıda verilen (3.3), (3.4), (3.5) ve (3.6) formülleri kullanılarak bulunur. İki numunenin ortalaması alınarak hesaplamalar yapılır.

$$G_{sb} = \frac{W_{hava}}{W_{doygun} - W_{su}} \quad (3.3)$$

$$G_{sa} = \frac{W_{hava}}{W_{hava} - W_{su}} \quad (3.4)$$

$$G_{se} = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2} \quad (3.5)$$

$$S(\%) = \frac{W_{doygun} - W_{hava}}{W_{hava}} \times 100 \quad (3.6)$$

Burada;

G_{sb} : kaba agrega hacim özgül ağırlığı,

G_{sa} : kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı,

G_{se} : kaba agrega efektif özgül ağırlığı,

$S(\%)$: kaba agreganın su emme kapasitesi,

W_{hava} : kaba agreganın havadaki kuru ağırlığı,

W_{su} : kaba agreganın sudaki ağırlığı,

W_{doygun} : kaba agreganın suya doymuş yüzey kuru ağırlığı olarak ifade edilmektedir.

3.1.5. İnce agreganın özgül ağırlık deneyi

Bu deney yapılırken ASTM C128, AASHTO T 84-13 standartları dikkate alınmıştır. Özgül ağırlık agreganın birim hacimdeki ağırlık miktarının aynı hacimde ve 25°C sıcaklıktaki suyun ağırlığına oranı alınarak hesaplanır. İnce agregalar dayanıklılık, taşıma kapasitesi vb. özellikler açısından çok önemlidir. Numuneler hazırlanırken 4,75-0,075 mm elekleri arasında kalan ince agregalardan, kullanılacak gradasyonun agrega dane dağılımını gösterecek şekilde 1 kg'dan oluşan iki adet numune tartılır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Deney numuneleri

Agregaların tartımı yapıldıktan sonra bir tepsi içerisine konulur ve agreganın üzerine gelecek şekilde su eklenir. Hazırlanan numuneler 24 saat süresince su içerisinde tepside bekletilir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. 24 saat su içinde bekletilmiş agregalar

24 saatin sonunda tepsilerde bulunan fazla su boşaltılır. Numuneler sıcak hava kaynağı kullanılarak yüzey kuru suya doymun hale getirilerek (W_{doymun}) tartılır. Yüzey kuru suya doymun hal koni metodu yardımıyla bulunur. Metal koni kalıp içerisindeki numuneler 3 tabaka halinde doldurularak her seferinde 25 vuruş ile sıkıştırılır. Sıkıştırılan numune koninin ters çevrilmesi ile tepsiye konulur. İnce kesitli bir mala yardımı ile agrega yığını iki parçaya ayrılır. Agregaya hala kendini tutuyorsa kurutma işlemi sürdürülür, agrega yığını dağılırsa yüzey kuru suya doymun hale gelmiş demektir. Yüzey kuru suya doymun hal elde edildikten sonra iki adet piknometre kabı temizlenip kurulanıp boş ağırlıkları (W_p) ölçülür. Piknometre çizgisine kadar saf su eklenir ve tartılarak W_p+s bulunur. Piknometreler boşaltıldıktan sonra etüvde kurumaya bırakılır. Etüvden çıkartılıp bir huni yardımıyla numuneler piknometreye yerleştirilir ardından tartılarak W_p+a ağırlıkları bulunur. Numunelerin üzerine su ilave edilerek tamamen doldurulur boşluk kalmaması için sarsılarak bir peçete ile üzerinde oluşan köpükler temizlenir. Tekrar tartılarak W_p+a+s ağırlığı bulunur. Tartım işlemi bittikten sonra numuneler piknometreden bir tepsiye boşaltılır kuruması için 110 °C'lik etüve bırakılır. Kuruma işlemi bittikten sonra kuru agregaya (W_{hava}) tartılır. Not edilen sonuçlar ile aşağıdaki verilen (3.7), (3.8), (3.9) ve (3.10) formülleri kullanılarak her bir numunenin ayrı ayrı ince agregaya hacim özgül ağırlığı, zahiri özgül ağırlığı, efektif özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi bulunur.

$$G_{sb} = \frac{W_{hava}}{W_{doymun} + W_s - W_{p+a+s}} \quad (3.7)$$

$$G_{sa} = \frac{W_{hava}}{W_{hava} + W_{p+s} - W_{p+a+s}} \quad (3.8)$$

$$G_{se} = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2} \quad (3.9)$$

$$S(\%) = \frac{W_{doymun} - W_{hava}}{W_{hava}} \times 100 \quad (3.10)$$

Burada;

G_{sb} : ince agregaya hacim özgül ağırlığını,

G_{sa} : ince agregaya zahiri özgül ağırlığını,

G_{se} : ince agregaya efektif özgül ağırlığını,

$S(\%)$: ince agreganın su emme kapasitesini,

Whava: ince agreganın havadaki kuru ağırlığını,

Wdoygun: agreganın suya doymun yüzey kuru ağırlığını,

Wp+s: piknometre + su ağırlığını,

Wp+a+s: piknometre + ince agrega + su ağırlığını ifade etmektedir.

3.1.6. Fillerin özgül ağırlık deneyi

Bu deney yapılırken ASTM C854 ve TS EN 1097-7 standartları dikkate alınır. Filler agregaların yalnızca zahiri (görünen) özgül ağırlığı bulunur. Zahiri özgül ağırlık, belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirimsiz boşluklarını içeren bitüm hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacimdeki suyun ağırlığına oranı olarak hesaplanır. Agrega dane dağılımını temsil edecek şekilde 0,075 mm elekten geçen agregadan 100 gram olacak şekilde numune tartılır ve iki adet deney numunesi hazırlanır. Deneyin sonunda ise elde edilen verilerin ortalaması alınır. İki adet piknometre kabı temizlenir daha sonra boş ağırlıkları (Wp) tartılır. Piknometre çizgisi seviyesine kadar saf su doldurulur ve tekrar tartılıp ağırlığı (Wp+s) bulunur. Piknometreler boşaltılarak etüve kuruması için bırakılır. Piknometreler kuruyunca etüvden çıkartılır, numuneler bir huni yardımıyla piknometrelere boşaltılır ve ağırlığı (Wp+a) tartılır. Daha sonra numunelerin üzerine bir miktar su eklenir, iyice sarsılarak boşluk kalmaması sağlanır ve tamamen su doldurulur daha sonra peçete yardımıyla üzerinde oluşan köpük temizlenir. Bu şekilde tekrar tartılarak ağırlığı (Wp+a+s) not edilir. Tartımdan sonra numuneler piknometreden bir tepsiye boşaltılır ve kuruyabilmesi için 110°C sıcaklıktaki etüve konur. Kuruma işleminden sonra kuru agrega ağırlığı (Whava) tartılır. Not edilen tartım sonuçları ile aşağıda verilen (3.11) formülü kullanılarak her bir numunenin zahiri özgül ağırlığı hesaplanır.

$$G_{sa} = \frac{W_{hava}}{(W_{p+s} - W_p) - (W_{p+a+s} - W_{p+a})} \quad (3.11)$$

Burada;

Gsa: filler zahiri özgül ağırlığını,

Whava: fillerin havadaki kuru ağırlığı,

Wp: piknometrenin boş ağırlığı,

Wp+s: piknometre + su ağırlığı,

Wp+a: piknometre + filler ağırlığı,

Wp+a+s: piknometre + filler + su ağırlığı olarak ifade edilmektedir.

Bu deneyler neticesinde bulunan sonuçlara göre bu çalışmada kullanılacak agregaların fiziksel özellikleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.

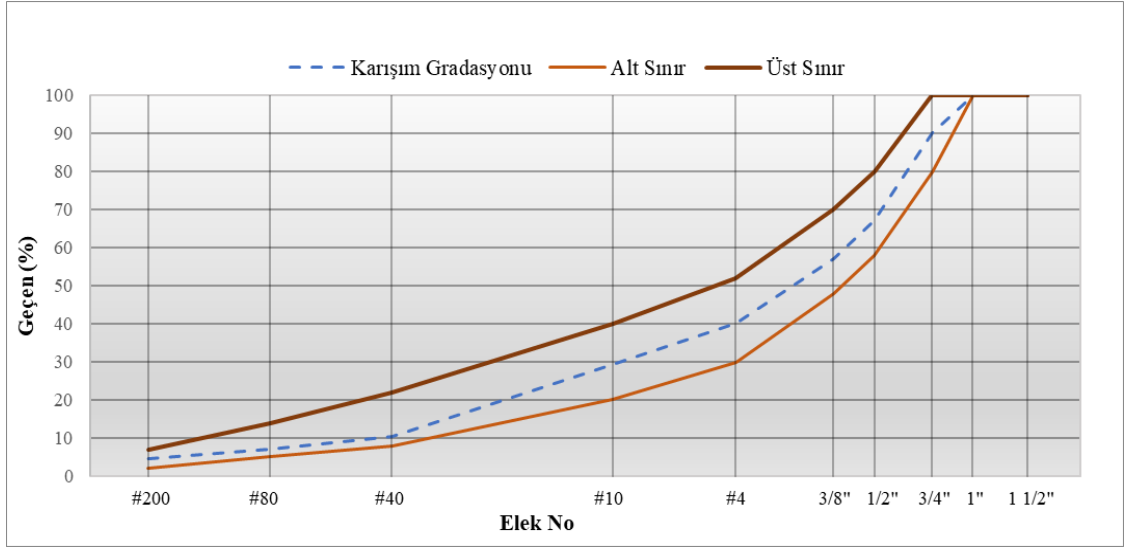
Tablo 3.2. Kaba agreganın, ince agreganın ve fillerin fiziksel özellikleri

Deneyler	Kaba Agregası	İnce Agregası	Filler
Hacim Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	2.654	2.477	-
Zahiri Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	2.674	2.54	2.717
Su Emme (%)	0.28	1.00	-

Karışımlarda kullanılan agregalara elek analizi uygulanmıştır ve tüm eleklerle ayrı ayrı eleme yapıldıktan sonra aşağıda Tablo 3.3’de verilen gradasyon elde edilmiştir. Şekil 3.3’ de ise bu gradasyona ait eğri verilmiştir.

Tablo 3.3. Agregaların elek analizi

Elek Açıklığı		Geçen %	Binder Şartname Limitleri	
mm	inch			
37,50	1 1/2"	100	100	100
25,40	1"	100	100	100
19,10	3/4"	91	80	100
12,70	1/2"	71,2	58	80
9,52	3/8"	59,8	48	70
4,76	No.4	44,6	30	52
2,00	No.10	30,1	20	40
0,42	No.40	11,5	8	22
0,177	No.80	6,9	5	14
0,075	No.200	5,1	2	7



Şekil 3.8. Karışımın gradasyon eğrisi

3.1.7 Cecabase RT 945

Cecabase, Arkema Group Fransa'nın bir ürünüdür ve IKA teknolojilerinin üretiminde kullanılan 25°C'de sıvı halde olan kimyasal bir katkı maddesidir (Şekil 3.9). Cecabase RT 945, mineral agrega ile asfalt arasındaki arayüzde, bir yüzey aktif maddenin asfaltın reolojik özelliklerini önemli ölçüde değiştirmeyen su ile asfalt arasındaki arayüzde hareket etmesine benzer şekilde hareket eder. Cecabase RT 945, asfalt karışım, üretim ve serme sıcaklığını 20°C ile 40°C düşürmeyi sağlamaktadır ve standart bir BSK ile aynı mekanik özellikleri korur. Üretici firma tarafından modifiye bitümler hazırlanırken Cecabase RT 945 katkı maddesinin saf bitümün %0,2-0,5 oranında kullanılması tavsiye edilmektedir.



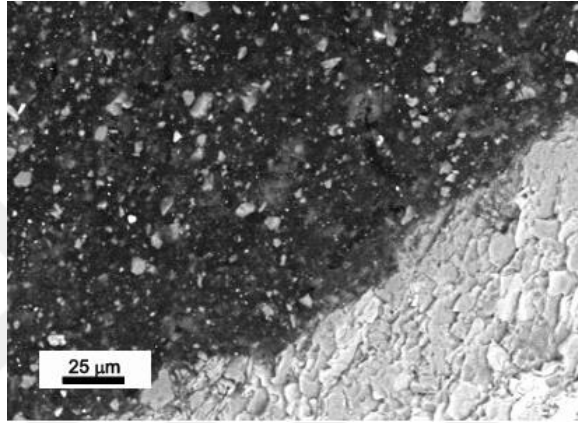
Şekil 3.9. Cecabase RT 945 katkı maddesinin görünümü

3.1.8. Cecabase RT 945'in fiziksel özellikleri

Tablo 3.4. Cecabase RT 945'e ait fiziksel özellikler

Viskozite (25°C)(cP)	Yoğunluk (25°C)(g/cm ³)	Donma Noktası (°C)	Parlama Noktası (°C)
500	600	-10	178

Yoğunluğu 0.997 veya 8.30 lbs.gal olup parlama noktası 390F'ın üzerindedir. Asfalt bağlayıcıda kolayca çözünür. Agregaların (ince olanların dahil) daha iyi kaplanmasını ve homojen dağılmasını sağlar.



Şekil.3.10. Cecabase RT945 maddesi ile hazırlanmış IKA' ın elektron mikroskobu altındaki görünüşü

3.2. Yöntem

Çalışmanın bu bölümünde karışımlarda kullanılan 70/100 saf bitüm ve Cecabase RT945 katkı maddesiyle modifiye edilen bitümün özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneyler ve yöntemler tanıtılmıştır.

Cecabase RT945 katkı maddesi farklı seviyelerde bitüm içerisine eklenerek farklı sıcaklık, hız ve sürelerde High Shear Mixer'de karıştırılmasıyla modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Penetrasyon, yumuşama noktası, RTFOT parlama noktası deneyleri ile modifiye bitümün fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bitümün yorulma dayanımını tespit etmek için elastik geri dönme deneyi uygulanmıştır. Katkı maddesinin bitümün performans özelliklerine etkisini inceleyebilmek için Marshall tasarım yöntemi kullanılarak saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar ile karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu çalışmada Taguchi metodu kullanılarak

zamanın ve ekonominin doğru şekilde kullanılabilmesi, deneysel süreçlerin optimize edilmesi ve ürün kalitesinin artırılması amaçlanmıştır.

3.2.1. Taguchi metodu

Taguchi metodunun, Dr. Genichi Taguchi tarafından 1940'lı yılların sonlarına doğru ortaya atıldığı bilinmektedir ve imal edilen ürünlerin kalitesini artırmak için geliştirilen, daha yakın zaman dilimlerinde mühendislik, biyoteknoloji, pazarlama ve reklamcılık alanlarında kullanılan bir yöntemdir (Karadede, 2023).

Bu çalışmada, klasik yöntemle yapılmış olan deney planına göre 256 farklı deney yapılmalıdır ve sonuçların doğru yorumlanabilmesi için ise her deneyden en az 2 defa yapılmalıdır. Bu yöntem süre ve maliyet açısından bakıldığında dezavantaj oluşturmaktadır fakat bu deney planı Taguchi yöntemi ile hazırlandığı için 16 farklı deney yapmak yeterli olacaktır. Taguchi optimizasyonundaki parametreler ve seviyeler Tablo 3.5'de sunulmuştur. L16 ortogonal dizisinin oluşturduğu deney planı ise Tablo 3.6' da verilmiştir. Performans istatistikleri sayesinde de tahminler %95 güven seviyesinde yapılmıştır. Böylelikle hem zamandan hem de maliyetlerden kaçınmak hedeflenmiştir.

Ortogonal dizilerin hedefi, kontrol edilemeyen faktörlerin etkilerini minimal seviyeye indirmektir ve daha az deney ile amaca ulaşmayı sağlamaktır. Ortogonal diziler, deneysel tasarımdan türetilmiştir. Deneysel tasarımda full faktöriyel tasarıma göre, 2 kademeli bir deneysel tasarım için 2k adet deneyin gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Fakat Taguchi'nin geliştirdiği standart deneme tasarımına göre, eşzamanlı birkaç faktörün planlı bir şekilde kademe sayısını değiştirerek, çok az deney sayısı ile aynı sonuca varılabilir. Her faktörde eşit adette farklı kademe olduğu için bu dizilere ortogonal diziler denilmektedir. N ortogonal dizideki deneme sayısını, S deneydeki faktör seviyelerini ve r ise faktör sayısını ifade etmektedir ve $LN(Sr)$ ile gösterilmektedirler. $LN(Sr)$ ortogonal dizisi, $N \times r$ boyutundaki bir matristen oluşmaktadır.

Taguchi metodu iki amacı kapsamaktadır ve kapsadığı bu iki amaç çok önemlidir. Bunlar; minimum sapmayı sağlayabilmek ve ürünün karakteristik değerini hedefe olabildiğince yaklaştırmaktır. Bu amaçlardan ikincisi bu zamana kadar açıklanmış olan yöntemlerle gerçekleştirilebilirken, minimum sapma için ise bir değişim ölçüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. Veri noktaları arasındaki farkı minimuma indirgeyebilmek için Taguchi tarafından İşaret Gürültü (Signal to Noise, S/N) Oranı gerçekleştirilmiştir. Her faktörün farklı seviyeleri için

hesaplanan S/N oranlarına analiz gerekmektedir. Parametrelerin S/N oranları arasındaki fark anlamlı olursa, bu parametrelerin kalite üzerinde etkisi olduğunu söyleyebiliriz. S/N oranları arasındaki farkları ve anlamlılığını değerlendirebilmek için uygun istatistiksel analiz yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. ANOVA analizi sayesinde faktörlerin etkisi değerlendirilir. Faktörlerin etkisi, varyansın hangi kısmının faktörlere ve hangi kısmının hata veya gürültüye ait olduğunu belirlemeye yardımcı olur. Faktörlerin etkisinin anlamlı olup olmadığını belirlemek için p-değerleri kullanılmalıdır. Anlamlı p-değerleri, faktörlerin kalite üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Eğer faktörlerin etkisi anlamlı ise, optimum parametre kombinasyonunu belirlemek için S/N oranlarına dayanarak analiz yapılır. En yüksek S/N oranına sahip parametre ayarlar seçilerek sürecin kalitesi optimize edilmelidir. S/N oranı kalitenin karakteristiğine göre hesaplama biçiminde değişiklik gösterebilmektedir. Taguchi, uygulamada bulunan problemleri, hedef türünü baz alarak üçe ayırmış ve her bir tür için değişik bir S/N oranını tanımlamıştır. İlki ölçüm değeri küçüldükçe iyileşmenin arttığı karakteristik tip En Küçük – En İyi olarak tanımlanır; bu tip problemler için, kalite değişkeninin yani Y'nin hedef değeri sıfır olmaktadır. Bu durumdaki S/N oranı, n bir denemede ki katsayı ve Y gözlem değeri olmak üzere şu şekilde tanımlanır:

$$S/N \text{ Oranı} = -10 \cdot \log(\Sigma Y^2/n) \quad (3.12)$$

Bunlardan ikincisi, ölçüm değeri büyüdükçe iyileşmenin arttığı karakteristik tip En Büyük – En İyi olarak tanımlanır; bu tip problemlerde, kalite değişkeninin yani Y'nin hedef değeri sonsuzdur. Bu koşulda sinyal/gürültü oranı;

$$S/N \text{ Oranı} = -10 \cdot \log[\Sigma (1/Y^2)/n] \text{ 'dir.} \quad (3.13)$$

Sonuncu hedef türü ideal değer nominal değer olduğu durum Hedef Değer – En İyi olarak tanımlanır; bunun gibi sorunlarda sapma sağdan ya da soldan gerçekleşebilir. Varyans analizi kullanılarak hesaplanan S/N oranı şu şekilde bulunur;

$$S/N \text{ Oranı} = 10 \cdot \log(Y^2 / S^2) \quad (3.14)$$

Burada Y veri grubu ortalaması ve S grubun standart sapmasıdır. Bu üç problemde de, amacımız S/N oranının maksimize edilmesidir. Varyans analizi (F analizi) ise yapılan testler sonucunda çıkan performanslar arasındaki farklılıklar gösterir (Karadede, 2023).

Tablo 3.5. Deney parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Seviye			
	1	2	3	4
(A) Cecabase RT 945 (%)	0.0 (A1)	0.30 (A2)	0.40 (A3)	0.50 (A4)
(B) Sıcaklık (°C)	120 (B1)	130 (B2)	140 (B3)	150 (B4)
(C) Süre (dakika)	5 (C1)	10 (C2)	15 (C3)	20 (C4)
(D) Hız (RPM)	1000 (D1)	2000 (D2)	3000 (D3)	4000 (D4)

Tablo 3.6. Deney planı

Deney No	Cecabase RT 945 (%)	Sıcaklık (°C)	Süre (dak.)	Hız (RPM)
1	0,00	120	5	1000
2	0,00	130	10	2000
3	0,00	140	15	3000
4	0,00	150	20	4000
5	0,30	120	10	3000
6	0,30	130	5	4000
7	0,30	140	20	1000
8	0,30	150	15	2000
9	0,40	120	15	4000
10	0,40	130	20	3000
11	0,40	140	5	2000
12	0,40	150	10	1000
13	0,50	120	20	2000
14	0,50	130	15	1000
15	0,50	140	10	4000
16	0,50	150	5	3000

3.2.2. Modifiye bitümün karıştırılması

Cecabase RT945 katkı maddesi 70/100 penetrasyonlu saf bitüme ilave edilerek ılık karışım asfalt numuneleri hazırlanmıştır. 25°C sıcaklıkta katı halde çıkarılan bitümlerin ağırlıkları tartılmıştır. Çıkarılan bitüm ağırlıkları baz alınarak Cecabase RT945 katkı maddesinin miktarları tespit edilmiştir. Tartılan bitüm hazırlanacak numunenin parametresine göre bir etüvde karıştırma sıcaklığına getirilip yine sıcaklığı önceden karıştırma sıcaklığına ayarlanmış High Shear Mikser içerisine (Şekil 3.11) yerleştirilmiştir, bitüm ağırlığına göre tespit edilen miktarda katkı maddesi de katılarak numunelerin parametrelerine göre önceden belirlenmiş olan karıştırma süresi ve hızlarında karışımlar yapılmıştır. Tablo 3.6’da belirtilen 16 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Karışımları tamamlanan numuneler mikserden alınarak yapılacak olan deneyler için ayrı ayrı kaplara konulmuş ve etiketlenmiştir. Katkı maddesiyle hazırlanan numunelere penetrasyon, parlama noktası, yumuşama noktası, RTFOT ve elastik geri dönme deneyleri uygulanmıştır. RTFOT ile yaşlandırılmış numunelere tekrar yumuşama

noktası ve penetrasyon deneyleri yapılmıştır. Marshall ve diğer deneyler için de karışım numunelerinden yedekler alınmıştır.

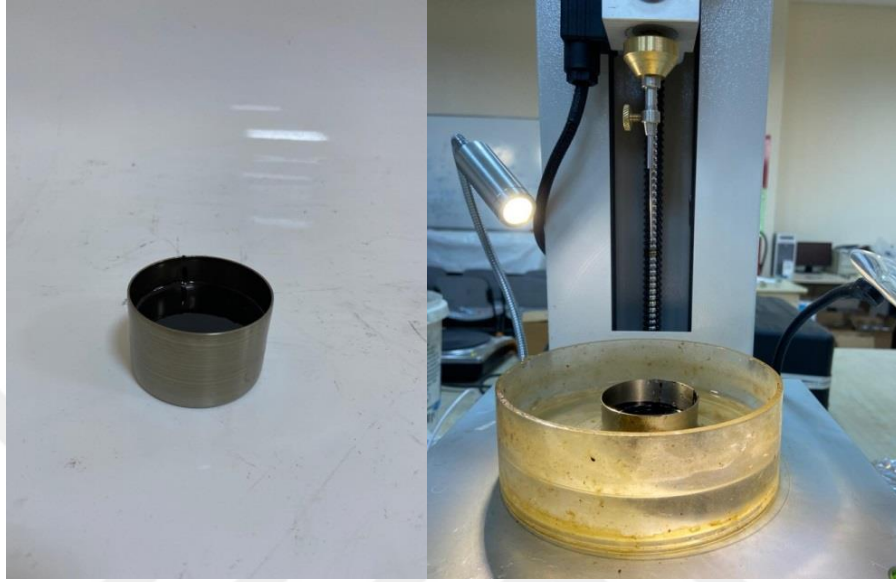


Şekil 3.11. Kendinden ısıtıcılı High Shear Mikser

3.2.3. Penetrasyon deneyi

Bu deney bitümün sertlik ve kıvamlılığını ölçmek için yapılır ve yapılırken TS EN 1426 ve ASTM D5 standartları dikkate alınmaktadır. Hazırlanan karışımlardan penetrasyon deneyi için ayrılmış numune önce oda sıcaklığında 1 saat bekletilir daha sonra 25°C sıcaklığa ayarlanmış su banyosunda bir saat daha bekletilir. Deneye başlamadan önce penetrasyon iğnesi uygun bir çözücü ile temizlenir. Penetrasyon iğnesi cihazın ucuna takılarak ve vidası sıkılır ve tam yerleşmesi sağlanır. Numunenin sıcaklığının değişmesini engellemek için taşıma kabına eklenen bir miktar 25°C sıcaklıktaki su ile beraber numune su banyosundan çıkarılır. Taşıma kabı penetrometre cihazının içerisine yerleştirilir. Cihazda takılı bulunan penetrasyon iğnesinin yüksekliği numunenin yüzeyine sıfır olacak şekilde ayarlanır ve cihaz sıfırlanır. İğne belirli bir yük (100 gr) altında 5 saniye içerisinde serbest düşmesi için dikey doğrultuda numuneye bırakılır. Aralarında ortalama 1'er cm'lik uzaklık bulunacak şekilde serbest bırakılan iğne ile en az 3 değer okunur. Bu okumalar en kısa sürede yapılmalıdır. Her batırmanın sonunda iğne, çözücü yardımı ile temizlenerek deney tekrarlanır. Penetrasyon değeri, üç ayrı batmanın sonunda okunan değerlerin birbirine yakın olması ve ortalamasının

alınmasıyla bulunur. Her bir penetrasyon değeri 0,1mm'lik batmaya denk gelmektedir. Penetrasyon değerinin yükselmesi bitümün yumuşadığı ve daha akışkan hale geldiği anlamına gelir. Asfalt çimentoları penetrasyon değerlerine göre kategorilenir ve kullanılır. Penetrasyon deneyleri numunelere RTFOT öncesi ve sonrası olmak üzere 2 defa yapılmıştır.



a) Oda sıcaklığında bekletilmiş numune b) Penetrasyon deney cihazı
Şekil 3.12. Penetrasyon testi

3.2.4. Yumuşama noktası deneyi

Yumuşama noktası deneyi TS EN 1427 ve ASTM D36 standartlarına göre, bitümün sıcaklığa göstermiş olduğu hassasiyetini (asfaltın akmaya başladığı sıcaklık değerleri) ve kıvamlılığını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Akıcı haldeki karışımdan alınan numuneler 2 adet pirinç halka içerisine doldurulur ve oda sıcaklığında yaklaşık 30 dakika bekletilir. Yumuşama deney setindeki 3,5 gram ağırlığında olan çelik bilyeler pirinç halka içerisinde yer alan bitümün üzerine yerleştirilir. Daha sonra pirinç halkalar sehpaye bırakılarak su banyosuna konulur. Su banyosunun sıcaklığı ilk 3 dakika süresince 5°C'de sabit tutulur daha sonra ise sıcaklığı her bir dakikada 5°C artacak şekilde kontrollü olarak ısı verilir. Bilyelerin ve artan sıcaklığın etkisiyle bitümde yumuşama meydana gelir. Bilyelerin pirinç halkaların içerisinde geçerek en alta temas ettiği noktada cihazın ekranında gözükten sıcaklık değeri iki bilye için de not edilir ve sıcaklıkların ortalaması alınarak yumuşama noktası bulunmuş olur.



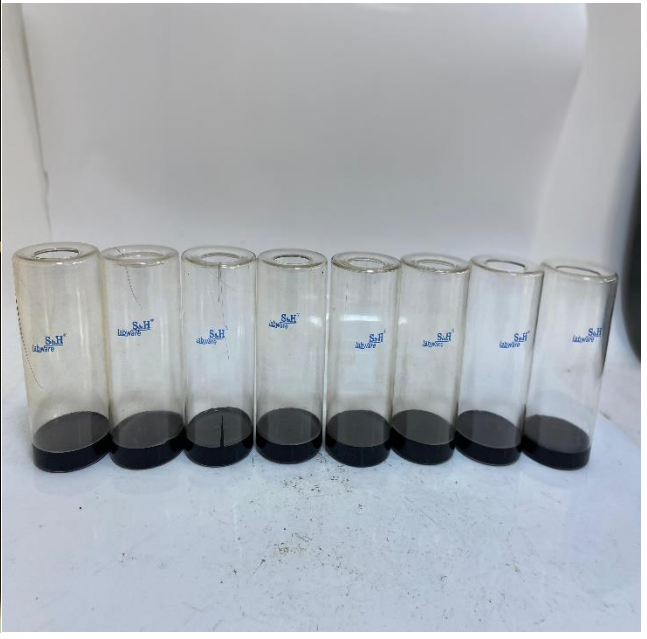
Şekil 3.13. Oda sıcaklığında bekleyen numuneler Şekil 3.14. Yumuşama Deneyi Cihazı

3.2.5. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) deneyi

Bitümlü bağlayıcıların agrega ile karıştırılması sırasında oluşan kısa dönem yaşlanma RTFOT Deneyi (Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi) ile laboratuvara taşınmış olur. RTFOT, TFOT yönteminin en uygun biçimde değiştirilmiş halidir. Ilık karışım asfaltlar modifiye edildikten sonra fiziksel özellikleri ve kütle kaybı gözlemlenir. Deneyde TS EN 12607-1 standardı kullanılır. 8 adet boş cam şişe temizlenerek hazırlanır, akıcı kıvamda bulunan İKA numuneleri bu cam şişelerin içerisine 35 gram olacak şekilde doldurulur daha sonra etüv içerisinde bulunan dönel tablaya yerleştirilir. RTFOT cihazı ve deney öncesi içerisine bitüm doldurulmuş şişelerin durumu Şekil 3.15.'de verilmiştir.



a) RTFOT Cihazı



b) İçerisine Bitüm Doldurulmuş Numuneler

Şekil 3.15. RTFOT testi

8 adet deney şişesi 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilerek düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 85 dakika boyunca döndürülmektedir. Dönme sırasında cihazın tabanındaki bir hava üfleyici yardımı ile şişelere, akışı 4000 ± 200 mL/dak. olacak şekilde hava verilir. Sıcaklık, hava ve sürekli olarak hareket etmenin etkisi ile bitüm, şişeleri tam olarak kaplayacak şekilde ince bir film tabakası oluşturmaktadır ve bunun sayesinde yaşlanmanın oluşması kolaylaştırılmaktadır. TFOT yönteminde kullanılan 3,2 mm.'lik film kalınlığı RTFOT yönteminde 1,25 mm.ye indirilmiştir. Bu sürenin sonunda RTFOT etüvünden çıkarılan sekiz adet numunenin ağırlıkları ölçülerek not alınır. İki adet numune 60 dakika soğutulduktan sonra oluşan kütle kaybını belirlemek için kullanılırken geriye kalan altı adet numune ise bitümlü malzemenin yaşlanma gerçekleştikten sonraki fiziksel özelliklerini belirlemek için kullanılır. Kütle kaybı aşağıdaki verilen bağıntı (3.16) ile belirlenmektedir. Denklemden bulunan M1 ifadesi yaşlanmadan önceki ağırlığı, M2 ifadesi ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı tanımlar.

$$\text{Kütle Kaybı } \% = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.15)$$



Şekil 3.16. Soğutulmaya bırakılan iki adet numune

3.2.6. Elastik geri dönme deneyi

Bitümün yorulma dayanımını belirlemek için yapılan elastik geri dönme deneyi, yapılırken TS EN 13398 standardı dikkate alınır. Deneye başlarken önce $10,0 \pm 0,1$ mm kalınlığındaki kalıplar bir yağ yardımı ile yağlanır. Akışkan oluncaya kadar ısıtılmış bitüm bu deney kalıplarına doldurulur. Dolu kalıplar 25°C de oda sıcaklığında 60 dakika boyunca bekletilir. Fazla bitüm bir bıçak yardımıyla alınarak yüzeyi düzleştirilir. Numuneler tekrar 25°C sıcaklıktaki bir su banyosu içerisinde 90 dakika boyunca tutulur. Bu sürenin sonunda numunelerin taban plakası çıkartılarak düktilite cihazına yerleştirilir(Şekil 3.17). Cihaza yerleştirilen kalıplar $50 \pm 2,5$ mm/dak. hızla 200 ± 1 mm'ye kadar çekilerek uzatılır. Çekme işleminin sonunda bitüm iplikleri ortadan kesilerek iki adet yarı iplik(Şekil 3.18) elde edilmiş olur. Bitüm ipliklerinin kesimi sonrasında 30 dakika beklenir ve elde edilen yarım ipliklerin iki uçları arasındaki mesafe mm cinsinden ölçülerek kaydedilir. Ölçülen bu değerler her numune için %1 yaklaşımla aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$R_E = \frac{d}{L} \times 100 \quad (3.16)$$

Buradaki; R_E değeri elastik geri dönmeyi, d değeri yarım ipliklerin arasındaki mesafeyi (mm), L değeri ise germe uzunluğunu yani 200 mm'yi ifade etmektedir. Elde edilen elastik

geri dönme değerleri arasındaki fark %5'ten fazla değilse, bu değerlerin ortalaması alınarak tek bir sonuç elde edilir.



Şekil 3.17. Düktilite cihazına yerleştirilmiş numune



Şekil 3.18. Ortadan kesilmiş bitüm iplikleri

3.2.7. Parlama noktası deneyi

Bir maddenin buharının alev teması sırasında geçici olarak parladığı ancak yanmayı sürdürmediği en düşük sıcaklık parlama noktası olarak ifade edilir. Parlama noktası deneyinin yapılaş amacı bitümlü bağlayıcıların uygulama sırasında ısıtılırken oluşacak herhangi bir

tutuşma ya da alev alma tehlikesinin önüne geçebilmek için önemlidir. Parlama noktası deneyi yapılırken TS EN 22719 ve TS 1171 standartları dikkate alınmıştır. Saf bitüm uygun bir akıcılığa gelene kadar ısıtıldıktan sonra, kabın çentik ile belirlenen kısmına kadar yüzeyinde hava kabarcığı olmayacak şekilde bitüm ile doldurularak cihaza yerleştirilir. Parlama noktasına yaklaşıncaya kadar sıcaklığın hızı dakikada 5 – 17 °C olmalıdır. Alevin kabın yüzeyinden geçmesi yaklaşık bir saniye sürmelidir (Şekil 3.19) . Numunenin yüzeyinin herhangi bir alanında, parlamanın görüldüğü anda termometrede okunan sıcaklık değeri parlama noktası olarak kabul edilmektedir. Deney alevciğinin etrafında oluşan mavimsi yalancı parlama ile gerçek parlamanın karıştırılmaması gerekmektedir. Alevin temas ettiği numunenin 5 saniyeden fazla yandığı an termometrede okunan sıcaklık değeri yanma noktası olarak not edilir.



Şekil 3.19. Parlama noktası deneyinin yapılışı

3.2.8 Marshall tasarım deneyi

Marshall tasarım deneyi yapılırken TS EN 3720/12697, AASHTO T 245, ASTM D 1559 standartları dikkate alınır. Marshall deneyi, çevrenin ve iklimin şartlarına karşı dayanıklı (sağlam), trafik yükleri altında kalıcı bozulmalar göstermeyecek kadar yeterli dayanıma ve

esnekliğe sahip, tekerlek yüklerinin etkisi ile oluşabilecek az miktardaki sıkışmayı bitümün kusması, akma ve stabilite sorunu olmadan sağlayabilecek, bunun için de geçirimsizliğini azaltmayacak veya içerisinde rutubetin oluşmasına müsaade etmeyecek şekilde yeterli bir hava boşluğuna sahip uygun bir kaplama karışımı için ihtiyaç duyulan optimum bitüm miktarını belirlerken kullanılır. Ayrıca bu deneyin diğer bir amacı segregasyona izin vermeden uygun serim ile sıkıştırma imkanı sağlayabilecek işlenebilirliğe sahip agrega gradasyonu ile ekonomik bir karışım elde etmektir.

Tablo 3.3’de elek analizi ile belirtilen granülometriye uygun her deney briketi için 1150 gramdan oluşan agrega karışımları hazırlanmıştır (Şekil 3.20). Briketlerin yüksekliği $63,5 \pm 1,27$ mm’dir. Bitüm oranı ise agrega ağırlığının %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6 ve %6,5 ‘u olacak şekilde kullanılmıştır. Belirlenen bitüm yüzdeleri için 3 adet briket hazırlanmıştır. Optimum bitüm oranını bulabilmek için 7 set Marshall deney numune malzemesi hazırlanmıştır.



Şekil 3.20. Agrega karışımlarının hazırlanma aşaması

Deneye başlamadan önce agregalar ayrı ayrı kaplara konup 24 saat boyunca 160°C ’lik etüvde bekletilmiştir. Deneyde kullanılacak bitüm, briket kalıpları, karıştırma şişi, karıştırma kabı vb. deney sırasında kullanacağımız malzemeler yine bir etüvde 160°C ’ye gelene kadar ısıtılmıştır. Etüvden çıkartılan agrega yine öncesinde ısıtılmış karıştırma kabının içerisine dökülür ve karıştırıcı yardımı ile karıştırılır. Agreganın içine bir çukur açılarak agrega ağırlığına göre ayarlanmış bitüm çukura ilave edilir ve homojen dağılabilmesi için karıştırıcıyla (Şekil 3.21) karıştırmaya devam edilir.



Şekil 3.21. Elektrikli karıştırıcı

Kalıplar yağlandıktan sonra çaplarına uygun olarak önceden hazırlanmış uygun bir kağıt kalıbın dibine yerleştirilir. Karıştırıcıdaki malzeme kalıba döküldükten sonra ayrışma olmamasına dikkat edilerek ortası ve kenarları şişlenir. Kalıp 45,7 cm'lik bir yükseklikten düşüş gerçekleştiren 4,536 kg'lık sıkıştırma tokmağı ile (Şekil 3.22) 75 vuruş yapılarak sıkıştırılır ve ters çevrilerek 75 vuruş daha yapılması sağlanır. Toplam 150 vuruş sonrasında sıkıştırma işlemi tamamlanmış olur.



Şekil 3.22. Sıkıştırma tokmağı kullanımı

Sıkıştırılmış numunelere numara verilir ve yeterli stabiliteye ulaşabilmesi ve silindirik olan şeklini koruyabilmesi için briketler kalıptan hemen çıkarılmaz ve soğumaya bırakılır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Soğumaya bırakılmış numuneler

Soğuma işlemi bittikten sonra numuneler kriko yardımıyla kalıptan çıkartılıp düz bir zemin üzerine konur ve soğuyabilmesi için bir gece bekletilir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Kriko kullanımı

Briketlerin Yükseklik ve Çapının Belirlenmesi;

Briketler, minimum 61.0 mm, maksimum 66.0 mm ve çapı ise ortalama 100 mm olacak şekilde ortalama 63.5 mm yüksekliğinde üretilmektedir. Briketler soğuduktan sonra köşeleri törpülenerek düzeltilir daha sonra bir kumpas yardımıyla üç farklı noktadan yükseklikleri ölçülür. Bu yüksekliklerin ortalaması Marshall deney formuna not edilir.

Briketlerin Hacimlerinin Belirlenmesi;

Her bir briket önce havada tartılır sonrasında su içerisine bırakılarak bir süre suyu emmesi için beklendikten sonra sudaki ağırlığı hassas bir şekilde tartılarak belirlenir ve sudaki ağırlık, doymuş yüzey- kuru ağırlığından çıkartılarak 3.17'deki gibi briketin hacmi belirlenir. Bu değerler Marshall deney formuna not edilerek briketlerin yoğunlukları ve boşluk oranları bulunur.

$$V = B - C \quad (3.17)$$

Burada:

V: Numunenin hacmini,

C: Numunenin sudaki ağırlığını,

B: Numunenin doymuş yüzey-kuru ağırlığını ifade etmektedir.

Sıkıştırılmış Briketlerin Özgül Ağırlıklarının Belirlenmesi;

Briketin özgül ağırlığı bulunurken havadaki ağırlığı hacmine oranı alınır:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (3.18)$$

Burada:

G_{mb} = Sıkıştırılan briketin özgül ağırlığını,

A = Kuru briketin havadaki ağırlığını (g),

B = Briketin kuru yüzey doymuş ağırlığını (g),

C = Sudaki briketin ağırlığını (g) ifade etmektedir.

Aynı set içerisinde bulunan briketlerin özgül ağırlıkları arasındaki farkın 0.02 den fazla olmamasına dikkat edilmelidir.

Karışımın Maksimum Özgül Ağırlığının Belirlenmesi;

ASTM D2041/D2041M-11 standartları dikkate alınarak aşağıda belirtilen bağıntı kullanılarak bulunur:

$$G_{mm} = \frac{A}{A-(B-C)} \quad (3.19)$$

Burada:

G_{mm} : Maksimum özgül ağırlığı,

A: Gevşek karışımın havadaki ağırlığını (g),

B: Su doldurulmuş piknometre ve gevşek karışımın ağırlığını (g),

C: Su dolu piknometrenin ağırlığını (g) ifade etmektedir.

Belirlenen bitümün yüzdesi için G_{mm} değerinin biliniyor olması bize farklı oranlarda bitüm barındıran karışımların en yüksek özgül ağırlıklarının da bulunmasına yardımcı olacaktır. Agregaya yığınlarının efektif özgül ağırlığı sabit olmakla beraber ve bitümün emme potansiyeli içeriğinde bulunan bitüm yüzdesinden bağımsızdır. Agregaya efektif özgül ağırlığı, G_{se} şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\left(\frac{P_{mm}}{G_{mm}}\right) - \left(\frac{P_b}{G_b}\right)} \quad (3.20)$$

Burada:

P_{mm} : Toplam gevşek karışım yüzdesini,

P_b : Karışımda bulunan asfalt yüzdesini,

G_{mm} : Karışımın maksimum özgül ağırlığını,

G_b : Bitümün özgül ağırlığını ifade etmektedir.

Herhangi bir bitüm yüzdesi ile hazırlanmış olan karışımların maksimum özgül ağırlığı aşağıda verilen 3.21 bağıntısı ile hesaplanmaktadır:

$$G_{se} = \frac{P_{mm}}{\left(\frac{P_s}{G_{se}}\right) + \left(\frac{P_b}{G_b}\right)} \quad (3.21)$$

Burada:

G_{mm} : Karışımın maksimum özgül ağırlığını,

Pmm: Toplam gevşek karışımın yüzdesini,
Pb: Karışımındaki asfalt yüzdesini,
Ps: Karışımındaki agreg a yüzdesini,
Gse: Agregaların efektif özgül ağırlığını,
Gb: Bitümün özgül ağırlığını ifade etmektedir.

Hava Boşluklarının Bulunması

Sıkıştırılmış olan bitümlü sıcak karışımların içerisinde asfalt ile kaplanmış agreg a parçacıkları arasında oluşan hava kabarcıklarına hava boşlukları denilir. Asfalt kaplamaların durabilite özelliği, içindeki hava boşluğuna bağlıdır. Yoğunluk ve hava boşluğu arasında doğrudan ilişki bulunmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda yoğunluk artmasıyla hava boşluğu azalır.

Karışımındaki toplam hava boşluğu oranı yani VTM aşağıda verilen 3.22 bağıntısı ile hesaplanır:

$$VTM = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (3.22)$$

Burada:

VTM: Karışımındaki toplam hava boşluğu oranını,

Gmm: Karışımın maksimum özgül ağırlığını,

Gmb: Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığını ifade etmektedir.

Mineral Agregalar Arasındaki Boşluk Yüzdesi (VMA)

Sıkıştırılmış karışımların agreg a taneciklerinin arasındaki boşluk alanı hacmi, mineral agregalar arasındaki boşluk olarak ifade edilir. VMA bitümlü sıcak karışımların durabilitesini etkileyen önemli faktörlerden birisidir. VMA, hava ve bitüm boşluğu ile dolu olan alanların bütününe kapsar ve karışımın toplam hacminin bir yüzdesi olarak tanımlanır. VMA aşağıda verilen 3.23 bağıntısı ile hesaplanır:

$$VMA = 100 \left[1 - \frac{G_{mb}(1 - P_b)}{G_{sb}} \right] \quad (3.23)$$

Burada:

VMA: Mineral agregalar arasındaki boşluk yüzdesini,

Gsb: Agreg a karışımının özgül ağırlığını,

Gmb: Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığını

Pb: Karışımdaki asfalt yüzdesini ifade etmektedir.

Bitüm İle Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA)

VFA, sıkıştırılmış karışımdaki agrega parçacıkları arasındaki bitümle dolu boşluklar olarak tanımlanır. Karışımdaki VFA'ya olan ihtiyacın amacı, mineral agregalar arasındaki en yüksek boşluğu ve buna bağlı olarak da asfalt içeriğini sınırlayabilmektir. VFA yüzdesi aşağıda verilen 3.24 bağıntısıyla hesaplanır:

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} \times 100 \quad (3.24)$$

Burada:

VFA: Karışımdaki bitüm ile dolu boşluk (%) oranı

VMA: Mineral agregalar arasındaki boşluk (%) oranı

VTM: Toplam karışımın boşluk oranını ifade etmektedir.

Marshall Stabilite ve Akma Değerlerinin Tespiti;

Stabilite ve akma değerleri bulunurken ilk olarak havadaki ve sudaki ağırlıkları belirlenmiş numuneler, sıcaklığı $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ olan su banyosuna yerleştirilerek 30 dakika boyunca bekletilir. Su banyosu yerine hava banyosuna yerleştirilmek istenirse aynı sıcaklıkta 2 saat bekletilmelidir. Sıvı petrol asfaltı ile yapılan deney numuneleri $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki hava banyosuna yerleştirilir ve en az iki saat bekletilir. Su banyosunda bekletilen briketler Şekil 3.25'de görülmektedir.



Şekil 3.25. Su banyosuna bırakılan briketler

30 dakikanın sonunda numuneler su banyosunun içerisinde alınıp bir havlu yardımı ile kurulur. Marshall Stabilite cihazındaki çelik halkanın iki segmanı yağlanarak briket bu iki halka arasına yerleştirilir. Flowmetre sıfırlandıktan sonra numune yüke maruz bırakılır (Şekil 3.26). Sabit olan üst segmandır ve alt segman dakikada 51 mm hızla yükselir. Basınç uygulandıkça stabilometrede okunan değer artarak maksimum bir noktaya ulaşır ve daha sonra düşmeye başlar. Düşmeye başladığı noktada numune deforme olmuş sayılır ve böylece deney tamamlanmış olur. Stabilometrede okunan maksimum değer yardımı ile BSK'nın stabilitesi bulunur. Stabilite, kg cinsinden numunenin kırılmasını sağlayan toplam yük miktarıdır. Deneyin sağlıklı sonuçlar verebilmesi için numunenin su banyosundan çıkarıldığı andan kırıldığı ana kadar 30 sn içerisinde deney tamamlanmalıdır. Akma ise kırılma esnasında numunede meydana gelen plastik deformasyon olarak ölçülür. Deney sonunda 63,5 mm yüksekliğindeki numuneler için bulunan değerler gerçek değerler olarak kabul edilir. Eğer bu yükseklikten farklı numuneler varsa bunlar için Marshall stabilite düzeltme faktörleri kullanılmalıdır. Aynı bitüm yüzdesindeki üç numunenin akma ve stabilite değerlerinin ortalaması alınarak Marshall deney formuna not edilir.



Şekil 3.26. Marshall stabilite cihazı

Stabilite ve akma ortalamaları not edilerek yapılan üç numunenin de değerleri karşılaştırılır. Eğer aradaki fark stabilite değerinde %15, akma değerinde ise %20'nin üzerindeyse o numune

değerlendirilmeye alınmaz. Kalan diğer numunelerin ortalamaları hesaplanır ve sapma miktarları belirlenir. Stabilite değerinde %15, akma değerinde ise %20 oranında sapma varsa deney iptal edilerek yeni bir set hazırlanmalıdır.

3'lü gruplar halinde 7 farklı bitüm oranına göre dökülen 21 briketle Marshall stabilite testi yapılarak yoğunluk ölçümleri sonucunda elde edilen D_p (pratik yoğunluk gr/cm³), Stabilite(kg), Akma(mm), VFA(%), Boşluk (%), VMA(%) değerleri şartnamelerle karşılaştırılarak uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şartname sınırları içerisinde kalan değerlere göre optimum oran belirlenmiştir. Tablo 3.7 incelendiğinde binder gradasyonu için Karayolları Teknik Şartnamesinde bulunan Marshall tasarım kriterleri görülecektir.

Tablo 3.7. Marshall tasarım kriterleri

Tasarım Kriteri	Deney Standardı	Binder
Sıkıştırma, her bir yüzey için darbe sayısı	TS EN 12697-30	75
VMA(%)	TS EN 12697-8	13-15
VFA(%)	TS EN 12697-8	60-75
Boşluk(%)	TS EN 12697-8	4-6
Akma(mm)	TS EN 12697-34	2-4
Stabilite(kg)	TS EN 12697-34	min 750

Agrega ağırlığına göre hesaplanan %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6 ve %6,5 bitüm oranları ile hazırlanan numunelerin test sonuçlarına göre optimum bitüm içeriği %4 olarak belirlenmiştir. Optimum bitüm içeriği bulunduktan sonra bu oranda 3 adet numune daha dökülerek sonuçlar kontrol edilmiştir. Şekil 3.27'de 7 set ve son olarak optimum orana göre hazırlanmış briketler görülmektedir.



Şekil 3.27. Marshall deney numuneleri

Optimum bitüm oranı hesaplanırken Tablo 3.8’de bulunan formüller kullanılır. Sonuçlar optimum değeri sağladıktan sonra deney planında verilen 16 set üçer adet numune ile toplam 48 adet Marshall numunesi hazırlanmıştır.

Tablo 3.8. Optimum bitüm %’sinin formül tablosu

Kısaltma	Açıklama	Formül
W_a	Agrega oranına göre bitüm %’si	$W_a = (W_B/W_A) \times 100$
W_b	Karışım oranına göre bitüm %’si	$W_b = [(W_B/W_A + W_B)] \times 100$
W_A	Agreganın toplam ağırlığı	1150 g
W_B	Bitüm ağırlığı (seçilen %’ye göre)	
W_{hava}	Havadaki kuru ağırlık(g)	Tartım ile elde edilen ağırlık değeri
W_{su}	Sudaki ağırlık (g)	Tartım ile elde edilen ağırlık değeri
W_{doygun}	Doygun yüzey kuru ağırlık (g)	Tartım ile elde edilen ağırlık değeri
V	Numune hacmi	$V = W_{doygun} - W_{su}$
D_p	Numune pratik hacim özgül ağırlığı	$D_p = W_{hava} / V$
D_{port}	Numune ortalama pratik hacim özgül ağ.	$D_{port} = (D_{p1} + D_{p2} + D_{p3}) / 3$
D_t	Numune teorik maksimum özgül ağ.	$D_t = 100 / [(100 - W_b / G_{se}) + (W_b / G_b)]$

Tablo 3.8. (Devamı)

Kısaltma	Açıklama	Formül
V _b	Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si	$V_b = (P_b \times D_{port}) / G_b$
V _a	Numunedeki agregacı hacmi %'si	$V_a = 100 - (V_h + V_b)$
V _{ma}	Agregalar arası boşluk %'si	$V_{ma} = 100 - V_a = (V_h + V_b)$
V _{fa}	W _{ma} 'nın bitümle dolu boşluk %'si	$V_{fa} = (V_b / V_{ma}) \times 100$
P _{be}	Agrega ağırlığına göre efektif bitüm %'si	
G _{sb}	Agrega hacim özgül ağırlığı	$G_{sb} = 100 / [(\%K / G_{k-h}) + (\%I / G_{i-h}) + (\%F / G_{f-z})]$
G _{sa}	Agrega zahiri özgül ağırlığı	$G_{sa} = 100 / [(\%K / G_{k-z}) + (\%I / G_{i-z}) + (\%F / G_{f-z})]$
G _{se}	Agrega efektif özgül ağırlığı	$G_{se} = (G_{sb} + G_{sa}) / 2$
%K	Karışımındaki % kaba agregacı	
%İ	Karışımındaki % ince agregacı	
%F	Karışımındaki % filler	

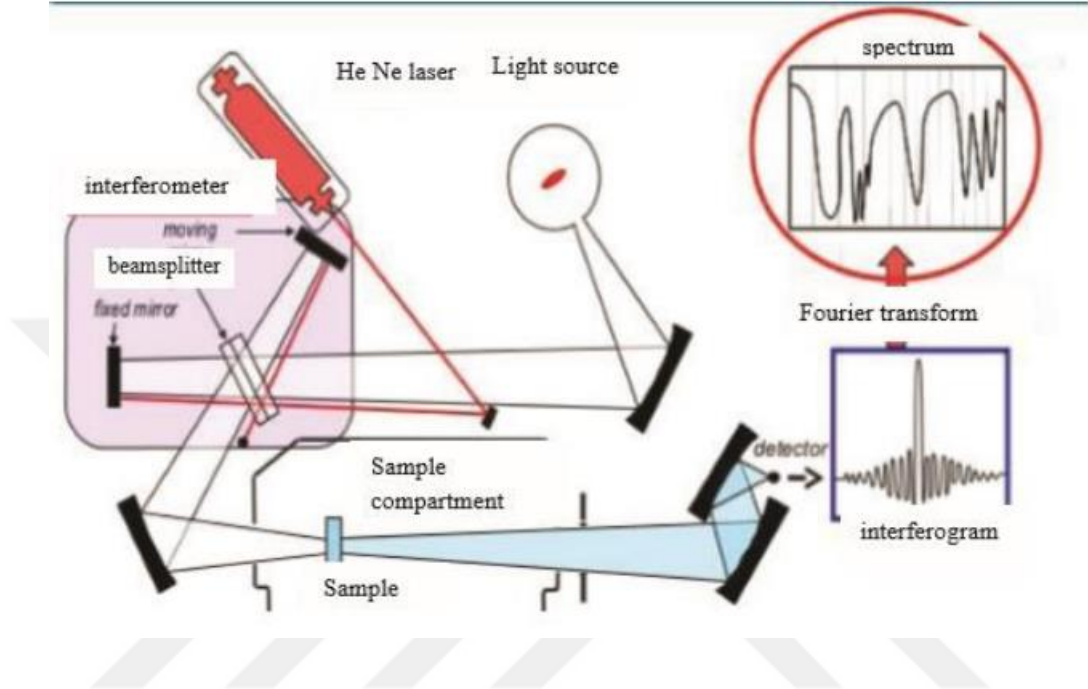
Yapılan stabilite deneyleri sonrası Taguchi metodu ile stabilite değerini maksimum yapan optimum seviyeler bulunmuş ve doğrulama yapılabilmesi için 3 adet kontrol numunesi hazırlanarak stabilite deneyi yapılmıştır.

3.2.9 Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) deneyi

FT-IR yani Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi kimyasal bir analizdir ve infrared yoğunluğuna karşı dalga sayısı ölçer. FT-IR spektroskopisi inorganik ya da organik bileşiklerin karakterize edilebilmesi amacı ile kullanılan bir cihazdır. Spektrumlar yüksek çözünürlüğe sahip olup, analiz edilen numunelerdeki atomlar arasında bulunan bağların titreşim frekanslarına göre absorpsiyon piklerini göstermektedir. Bu pikler, analiz edilen numunelerin parmak izi bilgilerini gösterir. Optik izomerler dışındaki her madde kendine özgü spektrumlara sahiptir (Yaman, 2019).

Elektromanyetik ışık dizisinin kızıl ötesi bölgesi 14000 cm⁻¹ ile 10 cm⁻¹ arasında bulunmaktadır ve üç ana kısma ayrılır. Bunlar: Yakın dalga boylu kızıl ötesi (NIR;

4000~14000 cm^{-1}), orta dalga boylu kızıl ötesi (MIR; 400~4000 cm^{-1}) ve uzak dalga boylu kızıl ötesi (FIR; 4~400 cm^{-1})'dir. Kızıl ötesi radyasyonu kimyasal bağların bükülme, bükülme ve gerilme gibi çeşitli titreşim hareketleriyle absorbe edilirler. Kızıl ötesi bölgesinde kimyasal bağların titreşimlerindeki değişim ve absorpsiyon özellikleri spektral piklerin oluşmasına neden olur (Kılıç vd., 2010).



Şekil 3.28. Fourier Dönüştümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi Çalışma Prensibi (Güngör 2017).

4. BULGULAR

4.1 Saf Bitüm Deney Sonuçları

Bu çalışmada kullanılan saf bitüme ait özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Saf bitüm deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Sonuçlar
RTFOT öncesi penetrasyon	83,3
RTFOT sonrası penetrasyon	50,5
RTFOT öncesi yumuşama noktası	45,5 °C
RTFOT sonrası yumuşama noktası	53,0 °C
RTFOT öncesi penetrasyon indeksi	-1,367
RTFOT sonrası penetrasyon indeksi	-0,453
Parlama noktası	302°C
Elastik geri dönme yüzdesi	9 (%)
RTFOT kütle kaybı	0,5213(%)
Marshall stabilitesi	1.153,08 kg

4.2. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deneyi Sonuçları

RTFOT öncesi yapılan penetrasyon deneyleri sonucunda elde edilmiş olan değerler ve L16 ortogonal dizisi yardımıyla Taguchi Metodu ile bulunmuş olan S/N değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir. En büyük en iyi performans istatistiği penetrasyon değerinin maksimum yaparken kullanılmıştır. Optimum seviyeleri belirlemek için S/N değerleri hesaplandıktan sonra hesaplanan ortalama S/N etkileri ise Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.2. RTFOT öncesi penetrasyon ve S/N değerleri

Deney No	1. Numune (0.1mm)	2. Numune (0.1mm)	3. Numune (0.1mm)	Ortalama (0.1mm)	S/N
1	75.90	78.50	78.70	77.70	37.81
2	77.90	81.60	75.70	78.40	37.89
3	85.80	86.10	93.00	88.30	38.92
4	85.50	87.50	88.30	87.10	38.80
5	82.10	84.60	79.60	82.10	38.29
6	79.60	79.70	83.20	80.83	38.15
7	95.30	96.00	93.10	94.80	39.54

Tablo 4.2. (Devamı)

Deney No	1. Numune (0.1mm)	2. Numune (0.1mm)	3. Numune (0.1mm)	Ortalama (0.1mm)	S/N
8	85.40	84.60	83.00	84.33	38.52
9	97.30	97.70	99.90	98.30	39.85
10	101.10	102.40	102.90	102.13	40.18
11	78.30	78.50	80.20	79.00	37.95
12	81.20	83.50	84.30	83.00	38.38
13	91.20	90.30	87.00	89.50	39.04
14	94.30	92.60	96.90	94.60	39.52
15	84.60	82.00	84.80	83.80	38.46
16	76.20	73.80	74.70	74.90	37.49

Tablo 4.3. RTFOT öncesi penetrasyon ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase RT 945	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	38.354	38.746	37.851	38.811
2. Seviye	38.624	38.935	38.255	38.349
3. Seviye	39.092	38.718	39.202	38.720
4. Seviye	38.627	38.298	39.389	38.817

RTFOT öncesi penetrasyon için optimum seviyeler Tablo 4.4'te verildiği gibi A3, B2, C4 ve D4 olarak bulunmuştur. Penetrasyona en yüksek etkiye sahip parametreler incelenecek olduğunda sırasıyla süre, katkı oranı, sıcaklık ve hız olmuştur. Cecabase RT 945, S/N oranına 0.418 katkıda bulunurken, sıcaklık 0.261, süre 0.715 ve hız 0.143 katkı sağlamaktadır. Tüm faktörlerin toplam S/N katkısı 1.536 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, tüm faktörlerin bir arada değerlendirildiğinde performansa nasıl etki ettiğini gösterir. Ortalama performans istatistiği (S/N) 38.674'tür, bu da deneylerin genel başarı düzeyini özetler. Tablo 3.6'daki deney planı göz önünde bulundurulduğunda optimum değerlere sahip deneyin olmadığı görülmektedir. Bu yüzden sonucu doğrulamak için ilgili parametre değerlerine (A3, B2, C4, D4) göre numune hazırlanarak doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyinin sonunda ise 104.2 (0.1 mm) penetrasyon değeri elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri 40.357'tir. Bu değer %95 güven seviyesinde 39.884 ile 40.538 aralığındadır (Tablo 4.4.). Bu aralık, modelin

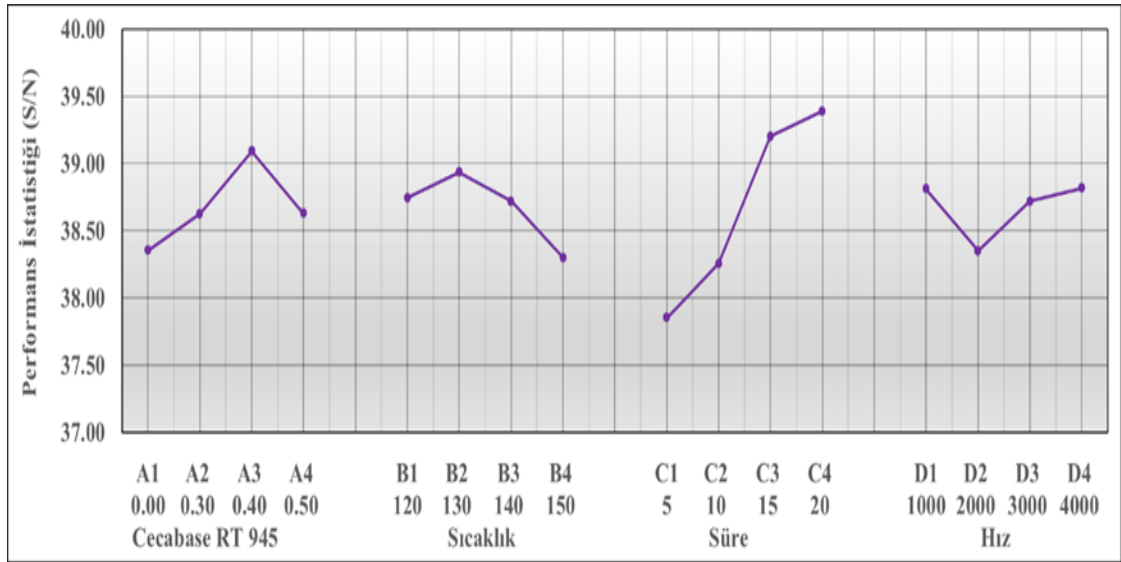
güvenilirliğini ve elde edilen sonuçların belirli bir hata payı içinde güvenilir olduğunu ifade etmektedir.

Tablo 4.4. RTFOT öncesi penetrasyon performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
Cecabase RT 945	A3	0.418
Sıcaklık	B2	0.261
Süre	C4	0.715
Hız	D4	0.143
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1.536
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		38.674
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (0.1 mm)		40.211 / 102.454
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (0.1 mm)		40.357 / 104.200
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		39.884 / 40.538

Şekil 4.1'den görüldüğü üzere bitümün penetrasyon değeri Cecabase RT 945 katkı oranının %0,40 seviyesinde (A3) en yüksek S/N değerine ulaşmıştır, ancak daha yüksek oranda (A4) bu değer düşüyor görülmektedir. Bu, daha fazla katkı maddesi kullanımının performansı olumsuz etkileyebileceğini işaret etmektedir. Süre ve hızın artması ile penetrasyon değeri artmış, sıcaklık arttıkça ise penetrasyon değeri azalma göstermiştir. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde en yüksek penetrasyon değerinin saf bitüme kıyasla %22.605 artışla 102.13 (0.1 mm) olduğu görülmüştür. Penetrasyon değerini en yüksek yapan optimum seviyelere göre hesaplanan penetrasyon değeri ise saf bitüme kıyasla %22.989 artışla 102.454 (0.1mm) olmuştur.

Oliveira vd. (2012) çalışmalarında, Cecabase RT katkı maddesinin IKA numunelerine etkilerini araştırırken 50/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda kullandıkları katkı maddesinin bu çalışmada %0,3 oranına kadar %8,47'lik bir artış gösterdiği daha sonra ise değer değişmediği görülmüştür.



Şekil 4.1. RTFOT öncesi penetrasyonun tüm seviyeler için performans istatistikleri

Varyans analizi (ANOVA) uygulanarak penetrasyon deneyleri sonuçlarının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını gözlemlenmiştir. Deney planındaki her bir parametrenin F değeri, optimizasyonu üzerindeki etkisini göstermektedir ve özetle sapmaların karesinin (squared deviation) ortalama karesel hataya (mean of the squared error) oranı olarak bulunmaktadır (Roy, 2010). F değerinin yüksek olması, penetrasyon üzerindeki etkilerin daha güçlü olduğunu ifade eder. Deney planında belirlenen parametre ve seviyelerin en uygun kombinasyonu, ANOVA istatistiksel testi ve performans istatistikleri kullanılarak öngörülebilir. Penetrasyonu artırmaya yönelik ANOVA sonuçları Tablo 4.5'te verilmiştir. (3,3) için F tablo değeri %95 güven seviyesinde 9.277'dir. Tüm faktörler için F değeri, %95 güven aralığı için tablodan çıkarılan F değerinden daha büyüktür. Bu durum tüm faktörlerin varyansının hatanın varyansına göre anlamlı yani istatistiksel olarak geçerli olduğunu göstermektedir. Son olarak istatistiklere bakıldığında penetrasyon değeri üzerinde en fazla katkıyı %71.508 ile sürenin yaptığı görülmektedir. Bunu sırasıyla Cecabase oranı, sıcaklık ve hız takip etmektedir.

Tablo 4.5. RTFOT öncesi penetrasyon ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Cecabase							
RT 945	3	1.129	0.376	31.087	1.093	12.277%	0.009
Sıcaklık	3	0.866	0.289	23.857	0.830	9.422%	0.014

Tablo 4.5. (Devamı)

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Süre	3	6.575	2.192	181.061	6.539	71.508%	0.001
Hız	3	0.588	0.196	16.198	0.552	6.397%	0.023
Hata	3	0.036	0.012			0.395%	
Toplam	15	9.195				100.000	

4.3 RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneyi Sonuçları

RTFOT sonrası yapılan penetrasyon deneyinin sonuçları ve hesaplanmış olan S/N değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir. En büyük en iyi performans istatistiği penetrasyon değerini maksimum yaparken kullanılmıştır. Optimum seviyeleri belirleyebilmek için hesaplanan ortalama S/N etkileri ise Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.6. RTFOT sonrası penetrasyon ve S/N değerleri

Deney No	1. Numune (0.1mm)	2. Numune (0.1mm)	3. Numune (0.1mm)	Ortalama (0.1mm)	S/N
1	49.60	51.00	50.80	50.47	34.06
2	53.00	51.80	51.20	52.00	34.32
3	55.20	56.80	56.50	56.17	34.99
4	51.70	56.50	54.90	54.37	34.71
5	55.20	51.50	56.80	54.50	34.73
6	48.10	47.80	48.20	48.03	33.63
7	61.30	57.30	59.80	59.47	35.49
8	49.50	51.70	54.20	51.80	34.29
9	61.60	62.70	59.10	61.13	35.73
10	65.90	69.60	64.30	66.60	36.47
11	54.30	51.50	57.10	54.30	34.70
12	53.60	54.30	52.60	53.50	34.57
13	63.20	61.90	64.50	63.20	36.01
14	55.60	56.20	52.60	54.80	34.78
15	52.90	53.10	50.10	52.03	34.33
16	47.50	48.20	50.10	48.60	33.73

Tablo 4.7. RTFOT sonrası penetrasyon ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase RT 945	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	34.519	35.132	34.030	34.722
2. Seviye	34.533	34.799	34.485	34.829
3. Seviye	35.365	34.874	34.944	34.980
4. Seviye	34.712	34.323	35.669	34.597

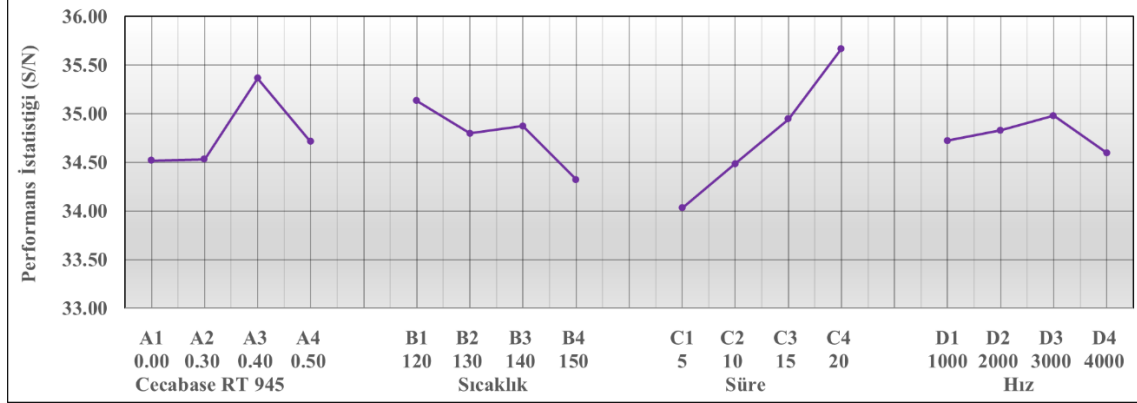
RTFOT sonrasında yapılan penetrasyon deneyi için optimum seviyeler Tablo 4.8’de verildiği gibi A3, B1, C4 ve D3 olarak bulunmuştur. Penetrasyon üzerinde en fazla etkiyi sağlayan parametreler incelendiğinde sırasıyla süre, Cecabase RT 945 katkı oranı, sıcaklık ve hız olmuştur. Optimum seviyelere (A3, B1, C4, D3) göre numuneler hazırlanarak doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyinin sonucunda 70.90 (0.1 mm) penetrasyon değerine ulaşılmıştır. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri 37.013’tir. Bu değer %95 güven seviyesinde 36.567 ile 37.031 arasında olmalıdır (Tablo 4.8.). Dolayısıyla sonucun %95 güven aralığı içinde doğru olduğu kabul edilebilir.

Tablo 4.8. RTFOT sonrası penetrasyon performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N’ e olan katkıları
Cecabase RT 945	A3	0.582
Sıcaklık	B1	0.350
Süre	C4	0.887
Hız	D3	0.198
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		2.017
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		34.782
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (0.1 mm)		36.799 / 69.176
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (0.1 mm)		37.013 / 70.900
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		36.567 / 37.031

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi bitümün penetrasyon değeri Cecabase RT 945 oranının %0,40 seviyesinde (A3) en yüksek S/N değerine ulaşmıştır, ancak daha yüksek oranda (A4) bu değer düşmektedir. Bu daha fazla katkı maddesi kullanımının performansı olumsuz etkileyebileceğine işaret etmektedir. Sıcaklık artışı penetrasyon değerinde azalışa, süre artışı ise penetrasyon değerinde artışa neden olmuştur. Buna göre katkı maddesi bitümü

yumuşatmıştır sonucuna ulaşabiliriz. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde en yüksek penetrasyon değeri saf bitüm ile karşılaştırıldığında %31.881 artış ile 66.60 (0.1 mm) olmuştur. Penetrasyon değerini maksimum yapan optimum seviyelere göre hesaplanan penetrasyon değeri ise saf bitüme göre %36.990 artışla 69.176 (0.1mm) olmuştur.



Şekil 4.2. RTFOT sonrası penetrasyonun tüm seviyeler için performans istatistikleri

Penetrasyonu artırmaya yönelik ANOVA sonuçları Tablo 4.9'da sunulmuştur. (3,3) için F tablo değeri %95 güven seviyesinde 9.277'dir. Tüm faktörler için F değerleri, %95 güven aralığındaki tablo F değerinden büyüktür. Ayrıca, tüm faktörlerin P-değerleri 0.05'ten küçüktür; bu da modelin anlamlı olduğunu gösterir. Penetrasyon değerine en fazla katkıyı sağlayan parametre %61.95 ile süre olmuştur bu parametreyi sırasıyla katkı maddesi, sıcaklık ve hız takip etmiştir.

Tablo 4.9. RTFOT sonrası penetrasyon ANOVA tablosu

Factors	DOF	Sums of Squares	Variance	F-Value	Pure Sum	Contribution	P-Value
Cecabase RT 945	3	1.902	0.634	103.805	1.884	20.082%	0.002
Sıcaklık	3	1.367	0.456	74.599	1.349	14.432%	0.003
Süre	3	5.867	1.956	320.224	5.849	61.950%	0.000
Hız	3	0.317	0.106	17.282	0.298	3.343%	0.021
Error	3	0.018	0.006			0.193%	
Total	15	9.471				100.000	

4.4 RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

RTFOT öncesinde yapılan yumuşama noktası deneyi sonuçları ve hesaplanmış olan S/N değerleri Tablo 4.10'da verilmiştir. Yumuşama noktası değerini minimum yapan en küçük en iyi performans istatistiği kullanılmıştır. Optimum seviyeleri belirlenmek amacıyla hesaplanmış olan ortalama S/N etkileri Tablo 4.11.'de verilmiştir.

Tablo 4.10. RTFOT öncesi yumuşama noktası değerleri ve S/N değerleri

Deney No	1. Numune (°C)	2. Numune (°C)	Ortalama (°C)	S/N
1	46.80	47.20	47.00	-33.44
2	47.00	47.00	47.00	-33.44
3	48.30	47.70	48.00	-33.62
4	48.10	48.10	48.10	-33.64
5	46.30	45.70	46.00	-33.26
6	46.80	46.20	46.50	-33.35
7	47.60	48.20	47.90	-33.61
8	47.50	47.50	47.50	-33.53
9	46.00	46.00	46.00	-33.26
10	45.20	45.40	45.30	-33.12
11	46.30	48.30	47.30	-33.50
12	47.40	47.80	47.60	-33.55
13	45.80	46.20	46.00	-33.26
14	46.90	46.90	46.90	-33.42
15	48.20	48.80	48.50	-33.71
16	47.60	47.80	47.70	-33.57

Tablo 4.11. RTFOT öncesi yumuşama noktası ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase RT945	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	-33.538	-33.302	-33.465	-33.506
2. Seviye	-33.436	-33.334	-33.491	-33.432
3. Seviye	-33.357	-33.611	-33.459	-33.393
4. Seviye	-33.491	-33.575	-33.407	-33.490

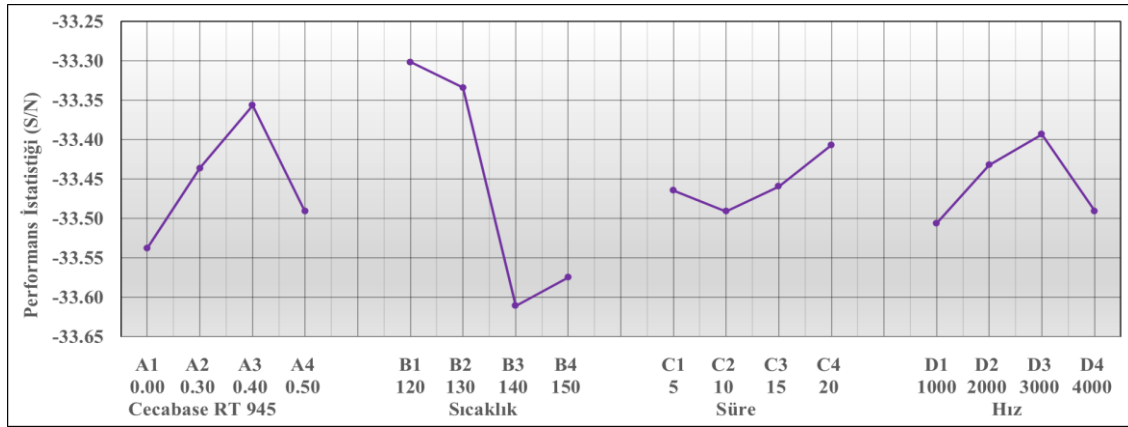
RTFOT öncesi yumuşama noktası sonuçları için optimum seviyeler Tablo 4.12’de verildiği gibi A3, B1, C4 ve D3 olarak bulunmuştur. Yumuşama noktası üzerinde en büyük katkıyı sağlayan parametreler sırasıyla sıcaklık, katkı, hız ve süre olmuştur. Optimum seviyelere göre

numune hazırlanarak doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyinin sonunda 45.4 °C yumuşama değeri elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık olarak gelen S/N değeri -33.141'tir. Bu değer %95 güven seviyesinde -33.149 ile -33.034 aralığında olmalıdır. Bu nedenle sonucun %95 güven aralığı içinde doğru olduğu kabul edilebilir.

Tablo 4.12. RTFOT öncesi yumuşama noktası performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
Cecabase RT 945	A3	0.099
Sıcaklık	B1	0.154
Süre	C4	0.049
Hız	D3	0.062
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0.363
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-33.455
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (°C)		-33.092 / 45.144
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (°C)		-33.141 / 45.400
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-33.149 / -33.034

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi bitümün yumuşama noktası değeri Cecabase RT 945 katkı oranının %0.40 seviyesine (A3) kadar azalmıştır, daha yüksek oranda (%0.50) bu değer arttığı görülmüştür. Sıcaklık artışı ile yumuşama noktası değeri artmıştır. Süre parametresinin ikinci seviyesi yumuşama noktası değerinde artışa, diğer seviyeler ise azalışa neden olmuştur. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde en düşük yumuşama noktası değerinin saf bitüme kıyasla %0.44 azalışla 45.30 °C olduğu görülmüştür. Yumuşama noktası değerini en küçük yapan optimum seviyeler ile hesaplanan yumuşama noktası değeri ise saf bitüme kıyasla %0.791 azalarak 45.144 °C olmuştur.



Şekil 4.3. RTFOT öncesi yumuşama noktası tüm seviyeler için performans istatistikleri

Oliveira vd. (2012) çalışmalarında, Cecabase RT katkı maddesi kullanarak IKA numuneleri hazırlamışlardır ve bu katkının bitüme olan etkilerini incelemişlerdir. 50/70 penetrasyon dereceli bitüme ağırlıkça %0,2 ile 0,5 oranlarında ekledikleri katkı maddesinin yumuşama noktası değerleri üzerine gözlemler yapmışlardır. Yumuşama noktası değerinin katkı maddesinin oranı arttıkça %2,89 kadar azaldığı gözlemlenmiştir.

Ouni vd. (2014) çalışmalarında, 35/50 performans dereceli saf bitüme katkı maddesi olarak ağırlıkça %0,3 oranında Cecabase RT ekleyerek IKA numuneleri hazırlamışlardır. Baz alınan numuneler (BSK) için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı 160°C olarak alınırken, IKA numuneleri için 110°C olarak alınmıştır. IKA numunelerde penetrasyon derecesi değişmemiştir fakat yumuşama noktası değeri % 0,38 azalmıştır.

En küçük en iyi performans istatistiği ile yumuşama noktası değerini minimize eden ANOVA sonuçları Tablo 4.13'te sunulmuştur. (3,3) için F tablo değeri %95 güven seviyesinde 9.277'dir. Tüm faktörler için F değeri, %95 güven aralığı için tablodan elde edilen F değerinden daha büyüktür. Ayrıca tüm faktörlerin P-değeri 0.05'ten küçüktür yani bu modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Yumuşama noktası değerini %71.59 ile en fazla etkileyen parametre sıcaklık olmuştur bu parametreyi sırasıyla katkı oranı, hız ve süre takip etmiştir.

Tablo 4.13. RTFOT öncesi yumuşama noktası ANOVA tablosu

Factors	DOF	Sums of Squares	Variance	F-Value	Pure Sum	Contribution	P-Value
Cecabase RT 945	3	0.073	0.024	64.872	0.072	16.979%	0.003
Sıcaklık	3	0.307	0.102	273.518	0.306	71.590%	0.000
Süre	3	0.015	0.005	13.344	0.014	3.493%	0.031
Hız	3	0.033	0.011	29.329	0.032	7.676%	0.010
Error	3	0.001	0.000			0.262%	
Total	15	0.429					

4.5 RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

RTFOT sonrası gerçekleştirilen yumuşama noktası deneyi sonuçları ve hesaplanan S/N değerleri Tablo 4.14'te verilmiştir. Yumuşama noktası değerini minimum yapan en küçük en iyi performans istatistiği kullanılmıştır. Optimum seviyeleri belirlemek için hesaplanan ortalama S/N etkileri Tablo 4.15.'de sunulmaktadır.

Tablo 4.14. RTFOT sonrası yumuşama noktası değerleri ve S/N değerleri

Deney No	1. Numune (°C)	2. Numune (°C)	Ortalama (°C)	S/N
1	51.50	52.50	52.00	-34.32
2	53.70	54.30	54.00	-34.65
3	55.40	56.20	55.80	-34.93
4	55.60	55.60	55.60	-34.90
5	51.90	52.10	52.00	-34.32
6	52.80	52.60	52.70	-34.44
7	54.00	54.00	54.00	-34.65
8	55.30	54.70	55.00	-34.81
9	53.10	52.90	53.00	-34.49
10	51.00	51.20	51.10	-34.17
11	52.70	53.30	53.00	-34.49
12	54.90	55.40	55.15	-34.83
13	52.00	52.00	52.00	-34.32
14	54.60	54.80	54.70	-34.76
15	56.50	56.50	56.50	-35.04
16	53.60	52.40	53.00	-34.49

Tablo 4.15. RTFOT sonrası yumuşama noktası ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase RT 945	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	-34.701	-34.361	-34.432	-34.640
2. Seviye	-34.553	-34.503	-34.710	-34.565
3. Seviye	-34.493	-34.777	-34.746	-34.477
4. Seviye	-34.652	-34.756	-34.509	-34.716

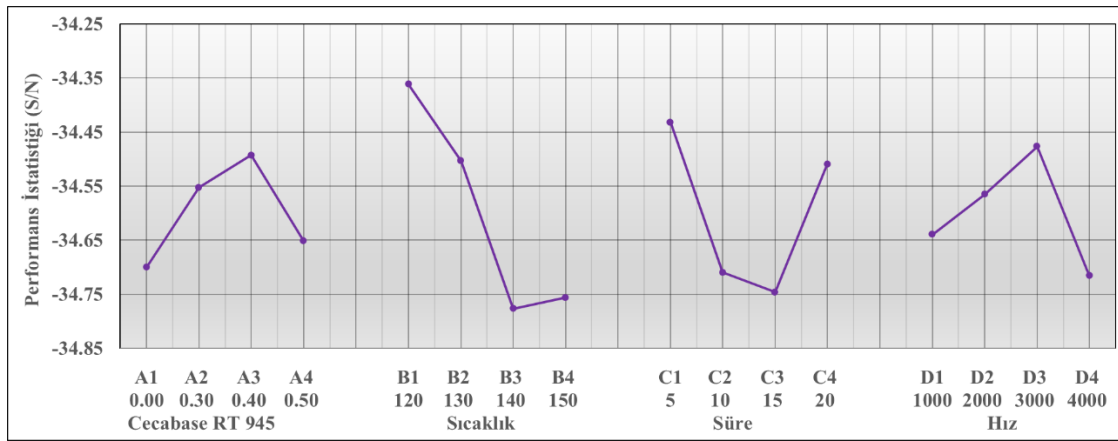
RTFOT sonrası yapılan yumuşama noktası deneyi değerleri için optimum seviyeler Tablo 4.16’da verildiği gibi A3, B1, C1 ve D3 olarak belirlenmiştir. Yumuşama noktası üzerinde en büyük katkıyı sağlayan parametreler sırasıyla sıcaklık, süre, hız, ve katkı oranı olmuştur.

Optimum seviyelere göre numune hazırlanarak doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyinin sonunda 50.8 °C yumuşama değeri elde edilmiştir. Bu değere karşılık olarak gelen S/N değeri -34.117'tir. Bu değer %95 güven seviyesinde -34.137 ile -33.792 aralığında olmalıdır. Bu nedenle sonucun %95 güven aralığı içinde doğruluğu kabul edilebilir.

Tablo 4.16. RTFOT sonrası yumuşama noktası performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
Cecabase RT 945	A3	0.107
Sıcaklık	B1	0.238
Süre	C1	0.168
Hız	D3	0.123
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0.635
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-34.599
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (°C)		-33.964 / 49.913
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (°C)		-34.117 / 50.800
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-34.137 / -33.792

Şekil 4.4'den görüleceği üzere bitümün yumuşama noktası değeri Cecabase RT 945 katkı oranının %0.40 (A3) seviyesine kadar azalmıştır, %0.50 (A4) seviyesinde ise bir miktar artmıştır. Sıcaklık arttıkça yumuşama noktası değeri artmıştır. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde en düşük yumuşama noktası değerinin saf bitüme kıyasla %3.585 azalarak 51.10 °C olarak bulunmuştur. Yumuşama noktası değerini en küçük yapan optimum seviyelere göre hesaplanan yumuşama noktası değeri ise saf bitüme kıyasla %5.83 azalarak 49.913 °C bulunmuştur.



Şekil 4.4. RTFOT sonrası yumuşama noktası tüm seviyeler için performans istatistikleri

Tablo 4.17'de, en küçük en iyi performans istatistiği ile yumuşama noktası değerini minimize eden ANOVA sonuçları sunulmuştur. (3,3) için %95 güven seviyesinde F tablo değeri 9.277'dir. Tüm faktörlerin F değerleri, %95 güven aralığı için belirlenen F değerinden büyüktür. Ayrıca, tüm faktörler için P-değerleri 0.05'ten küçüktür, bu da modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Yumuşama noktası değerine en fazla etkiyi %48.315 ile sıcaklık parametresi yapmıştır. Bunu sırasıyla süre, hız ve katkı oranı takip etmiştir.

Tablo 4.17. RTFOT sonrası yumuşama noktası ANOVA tablosu

Factors	DOF	Sums of Squares	Variance	F-Value	Pure Sum	Contribution	P-Value
Cecabase RT 945	3	0.106	0.035	10.462	0.096	10.506%	0.043
Sıcaklık	3	0.488	0.163	48.116	0.478	48.315%	0.005
Süre	3	0.280	0.093	27.600	0.270	27.714%	0.011
Hız	3	0.126	0.042	12.409	0.116	12.461%	0.034
Error	3	0.010	0.003			1.004%	
Total	15	1.010				100.000	

4.6 Penetrasyon İndeksi

Bitümün sıcaklığa olan duyarlılığını belirlemek için penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilmiş sonuçlar aşağıda verilen 4.1 ve 4.2 bağıntıları kullanılarak Penetrasyon İndeksi (PI) bulunmuştur.

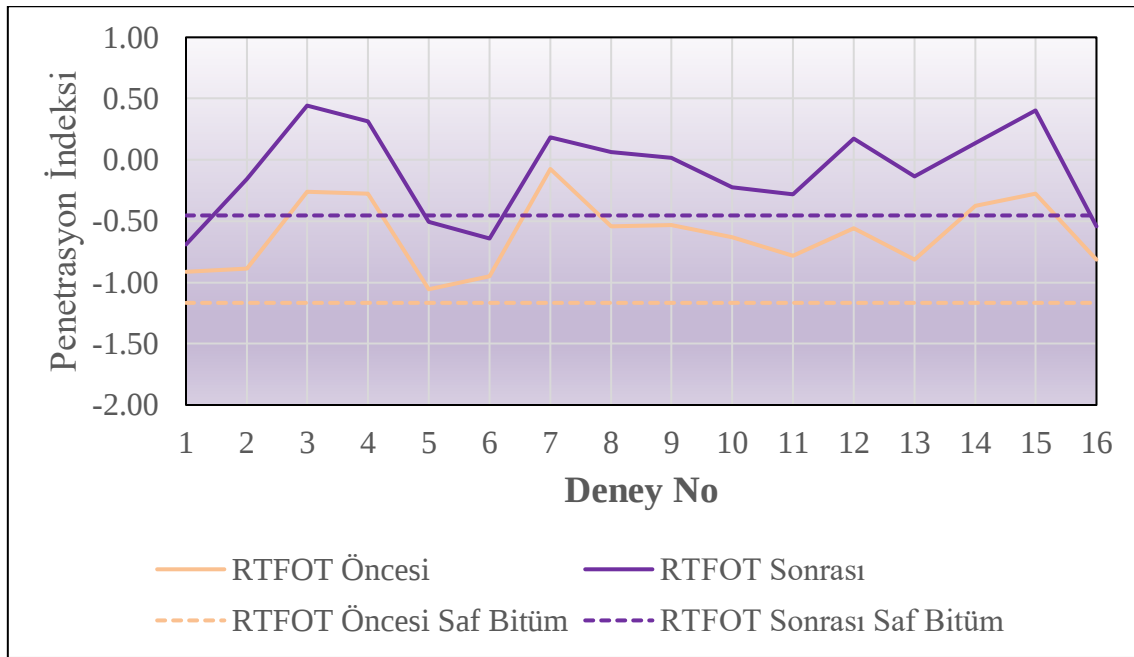
$$A = \frac{\log_{10} 800 - \log_{10} P_{25}}{T_{SP} - 25} \quad (4.1)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (4.2)$$

Formüllerdeki P_{25} ifadesi bitümün 25 °C'deki penetrasyonunu, T_{SP} ifadesi ise yumuşama noktasını ifade etmektedir. -2 değerinden küçük olan bir PI değeri yüksek ısı duyarlılığını, 2 değerinden büyük olan PI değeri ise düşük ısı duyarlılığı anlamına gelmektedir (Geçkil, 2019). Penetrasyon İndeksi sonuçları Tablo 4.18. ve Şekil 4.5.'de gösterilmektedir.

Tablo 4.18. Penetrasyon indeksi sonuçları

Deney No	RTFOT Öncesi	RTFOT Sonrası
Saf Bitüm	-1.367	-0.453
1	-0.913	-0.690
2	-0.889	-0.153
3	-0.262	0.443
4	-0.274	0.316
5	-1.056	-0.508
6	-0.951	-0.640
7	-0.074	0.182
8	-0.540	0.063
9	-0.530	0.019
10	-0.630	-0.222
11	-0.782	-0.279
12	-0.557	0.176
13	-0.811	-0.136
14	-0.375	0.135
15	-0.275	0.403
16	-0.813	-0.543



Şekil 4.5. Saf bitüm ve deney sonuçlarının penetrasyon indeksi karşılaştırması

Şekil 4.5.'de verildiği üzere 70/100 penetrasyon dereceli saf bitüme eklenen Cecabase RT 945 katkı maddesinin tüm oranlarındaki yaşlanma sonrası PI değerlerinde artış olmuştur.

Cecabase RT 945 katkısı, özellikle yaşlanma sonrası bitümün sıcaklığa olan duyarlılığını azaltmıştır. Daha yüksek PI değerlerine sahip karışımlar, kalıcı deformasyonun yanı sıra düşük sıcaklıktaki çatlamaya karşı daha dirençlidir (Sengoz vd., 2008).

4.7 RTFOT Kütlesel Kayıp Sonuçları

RTFOT kütlesel kayıp değerleri ve en küçük en iyi performans istatistiği ile hesaplanmış olan S/N değerleri Tablo 4.19.'da sunulmuştur. Ortalama S/N etkileri ise Tablo 4.20'de sunulmuştur.

Tablo 4.19. RTFOT kütle kaybı değerleri ve S/N değerleri

Deney No	M1 (gr)	M2 (gr)	Kütle Kaybı (%)	S/N
1	148.20	148.14	-0.1800	-25.11
2	147.80	147.74	-0.1625	-24.21
3	148.56	148.52	-0.1048	-20.41

Tablo 4.19. (Devamı)

Deney No	M1 (gr)	M2 (gr)	Kütle Kaybı (%)	S/N
4	148.22	148.20	-0.0682	-16.67
5	147.88	147.84	-0.1032	-20.27
6	147.99	147.94	-0.1416	-23.02
7	148.34	148.30	-0.1194	-21.54
8	148.10	148.07	-0.0964	-19.68
9	147.93	147.92	-0.0408	-12.22
10	147.59	147.58	-0.0308	-9.78
11	148.18	148.11	-0.1885	-25.51
12	147.73	147.71	-0.0721	-17.16
13	147.80	147.77	-0.0865	-18.74
14	147.80	147.78	-0.0705	-16.97
15	148.06	148.02	-0.1142	-21.15
16	148.13	148.10	-0.0851	-18.60

Tablo 4.20. RTFOT ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase RT 945	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	-21.600	-19.086	-23.059	-20.192
2. Seviye	-21.129	-18.496	-20.699	-22.036
3. Seviye	-16.167	-22.152	-17.319	-17.266
4. Seviye	-18.865	-18.027	-16.683	-18.266

RTFOT kütle kaybı yüzdesini minimum yapan optimum seviyeler Tablo 4.21’de görüldüğü üzere A3, B4, C4, D3 olarak belirlenmiştir. Kütle kaybı üzerinde Cecabase RT 945 katkısının kayda değer bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Katkı oranının artması ile kütle kaybında azalma görülmüştür.

Goh vd. (2013), çalışmalarında 100°C, 115°C ve 130°C olacak şekilde üç farklı sıcaklık seviyesinde hazırlanan 5E3 Superpave karışımlarına %0,2, %0,35 ve %0,5 oranlarında Cecabase RT eklemişlerdir. Kontrol karışımı olarak BSK baz alınmıştır. Karışım numunelerinin tamamı 58-34 performans sınıflı bağlayıcı kullanılarak hazırlanmış ve farklı sıcaklıklarda modifiye etmişlerdir. %0,2, %0,35 ve %0,5 oranlarında Cecabase RT ile yapılan IKA’nın ve kontrol BSK’nın reolojik ve yaşlanma özelliği Dinamik Kesme Reometresi (DSR)

ile test edilmiştir. Sonuçlardan, IKA'nın, baz alınan BSK ile kıyaslandığında önemli ölçüde daha düşük yaşlanma faktörüne sahip olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.21. RTFOT kütle kaybı performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
Cecabase RT 945	A3	3.274
Sıcaklık	B4	1.414
Süre	C4	2.757
Hız	D3	2.174
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		9.618
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-19.440
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (‰)		-9.822 / 3.098
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (‰)		-12.204/ 4.076
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-12.59 / -7.185

Bitümün uğramış olduğu oksidatif yaşlanmanın ve sertleşme miktarının önemli bir belirtisi olarak RTFOT kütle kaybı gösterilir. Katkı maddesi ile saf bitüm yaşlanmaya karşı daha dirençli hale gelerek kaplama performansı artmış, durabilite ve esnekliği iyileştirmiştir.

4.8 Elastik Geri Dönme Deneyi Sonuçları

Tablo 4.22'de en büyük en iyi performans istatistiğine göre hesaplanan S/N değerleri ve elastik geri dönme deneyi sonuçları verilmiştir. Elastik geri dönme yüzdesi (R_E) değeri aşağıda verilen 4.3 bağıntısı yardımı ile bulunmuştur. R_E 'nin %0 olması demek malzemenin elastik davranış göstermediği anlamına gelmektedir. R_E 'nin %100 olması ise malzemenin ilk haline tekrar geri dönebildiğini ifade etmektedir (Błażejowski vd., 2014).

Formülasyonda bulunan d değeri kesilen numunenin iki ucu arasındaki mesafeyi, L ise numunenin uzamasını ifade etmektedir.

$$R_E = \frac{d}{L} 100 \quad (4.3)$$

Tablo 4.22. Elastik geri dönme deney sonuçları ve S/N değerleri

Deney No	Uzama (mm)	d (mm)	R _E (%)	S/N
1	200	15	7.50	23.52
2	200	16	8.00	24.08
3	200	17	8.50	24.61
4	200	16	8.00	24.08
5	200	18	9.00	25.11
6	200	21	10.50	26.44
7	200	23	11.50	27.23
8	200	25	12.50	27.96
9	200	13	6.50	22.28
10	200	16	8.00	24.08
11	200	20	10.00	26.02
12	200	22	11.00	26.85
13	200	12	6.00	21.58
14	200	16	8.00	24.08
15	200	15	7.50	23.52
16	200	18	9.00	25.11

S/N değerleri hesaplandıktan sonra optimum seviyeleri belirlemek için hesaplanan elastik geri dönme yüzdesi ortalama S/N etkileri Tablo 4.23.'de sunulmuştur.

Tablo 4.23. Elastik geri dönme yüzdesi ortalama S/N etkileri

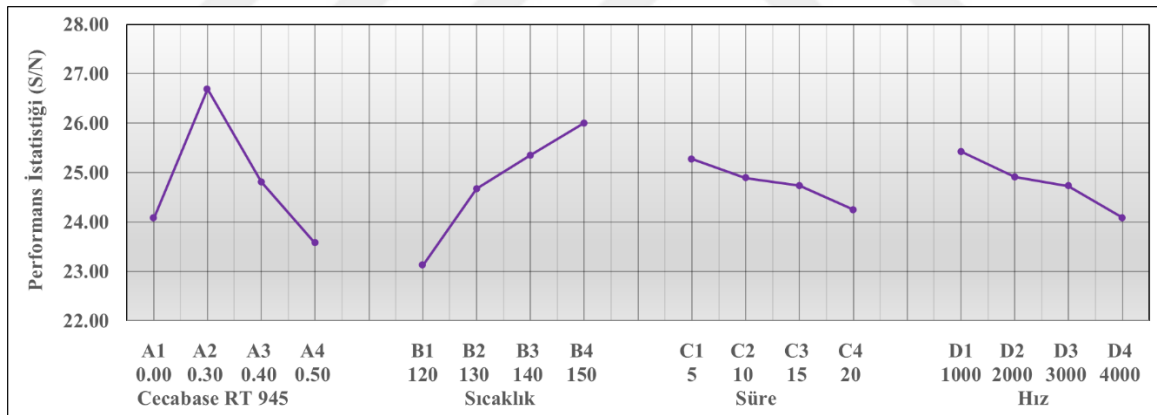
Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase RT 945	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	24.074	23.122	25.273	25.422
2. Seviye	26.686	24.673	24.890	24.911
3. Seviye	24.808	25.346	24.732	24.726
4. Seviye	23.573	25.999	24.246	24.082

Elastik geri dönme yüzdesini maksimuma çıkaran optimum seviyeler incelendiğinde Tablo 4.24'de görüldüğü üzere A2, B4, C1, D1 olarak bulunmuştur. Katkı maddesi elastik geri dönme yüzdesi üzerindeki en fazla etkiyi yapan parametre olmuştur.

Tablo 4.24. Elastik geri dönme yüzdesi performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
Cecabase RT 945	A2	1.901
Sıcaklık	B4	1.214
Süre	C1	0.488
Hız	D1	0.637
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		4.239
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		24.785
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (%)		29.024 / 28.262
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		28.525 / 29.523

Asfalt bağlayıcıların elastik bozulmalarından sonra geri dönme yeteneği elastik geri dönme deneyi yardımı ile değerlendirilir (Ma vd., 2020). Yapılan analizler sonucunda elastik geri dönme yüzdesinin Şekil 4.6'da görüldüğü üzere katkı maddesinin %0.30 oranından sonra azaldığı belirlenmiştir. Karıştırma sıcaklığı elastik geri dönme yüzdesini artırırken, karıştırma hızı ve karıştırma süresi elastik geri dönme yüzdesini azaltmıştır.



Şekil 4.6. Elastik geri dönme tüm seviyeler için performans istatistikleri

4.9 Marshall Stabilite Deneyi Sonuçları

Işık (2024), optimum bitüm oranının belirlenmesi için bir çalışma yapmıştır. Agrega miktarını sabit tutarak ve agreg ağırlığınca %3,5 ile %6,5'i oranları arasında bitüm ekleyerek 21 Marshall numunesi hazırlamıştır. Ardından Marshall stabilite testi uygulanan numunelerin stabilite ve akma sonuçları bulunmuştur. Tespit edilen veriler Tablo 4.25.'de verilmiştir. Şekil 4.7. 'de oluşturulan grafiklerden ardından boşluk oranını bulabilmek için gerekli hesaplamalar

yapılmıştır ve bu hesaplamaların sonucunda ise boşluk oranının %4'e karşılık geldiği ve stabilitenin maksimum değere denk geldiği bitüm oranının %4,96 olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada aynı agrega ve gradasyonun kullanıldığı için optimum bitüm oranı %4.96 olarak alınmıştır.

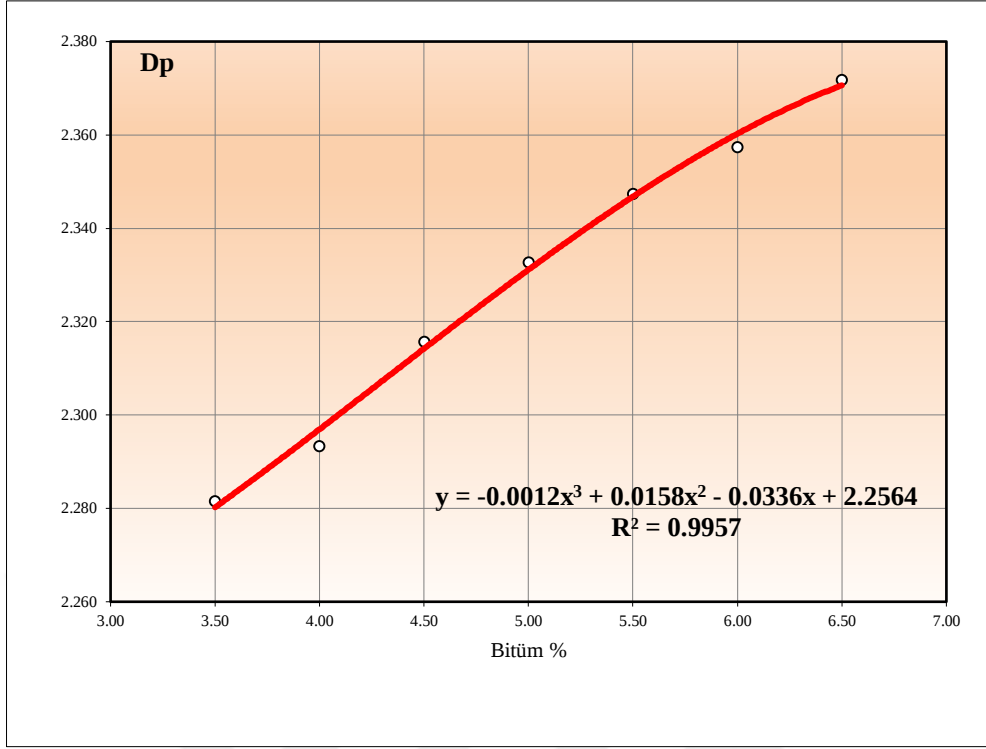


Tablo 4.25. Optimum bitüm oranının belirlenmesi için deney sonuçları

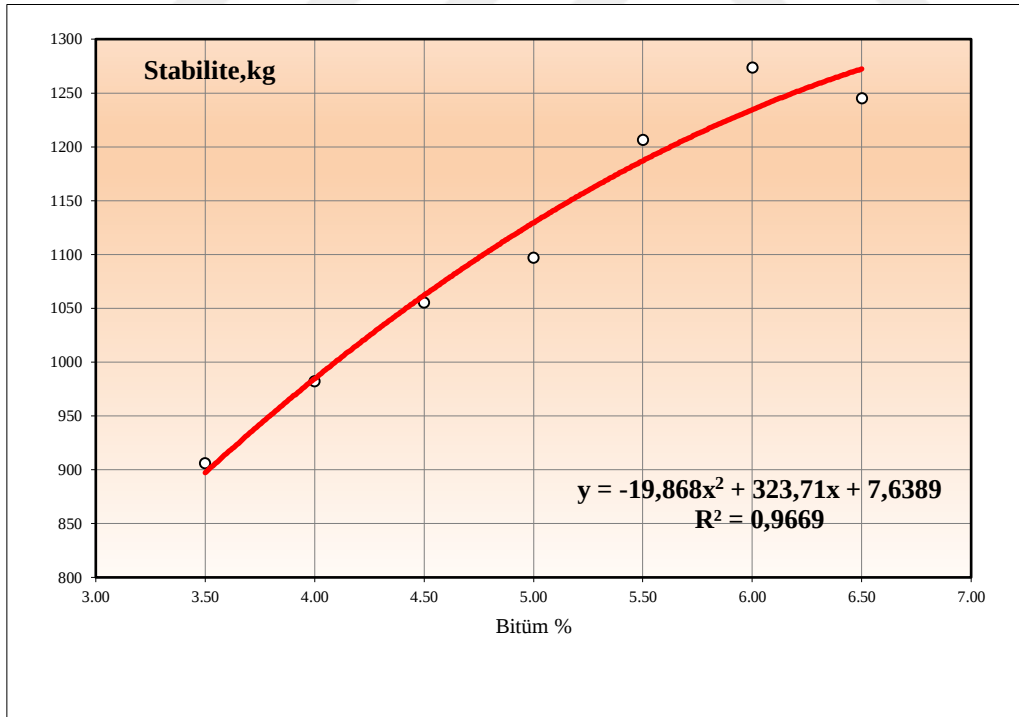
Den. No	Bitü m Oran ı (%)	Bitü m Ağırlığı (gr)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort} (mm)	W _{hava} (gr)	W _{su} (gr)	W _{doy.} (gr)	V (cm ³)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _a (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düz. Fakt örü	Düz. Stabilite (kg)
1	3.50	40.25	65.20	65.30	65.50	65.33	1,174.70	676.0	1,192.4	516.40	2.275					2.88	972.47	0.95 7	930.92
2	3.50	40.25	66.10	66.30	66.40	66.27	1,174.80	678.4	1,194.7	516.30	2.275					2.83	891.00	0.93 8	835.46
3	3.50	40.25	65.50	65.40	65.20	65.37	1,169.80	681.2	1,191.0	509.80	2.295					2.81	996.57	0.95 7	953.28
											2.282	2.477	7.877	14.911	47.17 7	2.84			906.55
4	4.00	46.00	65.70	65.80	65.60	65.70	1,174.10	679.4	1,192.0	512.60	2.290					2.84	965.15	0.95 0	916.45
5	4.00	46.00	65.60	65.10	65.20	65.30	1,174.50	677.5	1,193.2	515.70	2.277					2.92	1,072.00	0.95 8	1,026.96
6	4.00	46.00	65.90	66.00	66.00	65.97	1,180.00	683.9	1,194.2	510.30	2.312					2.70	1,062.93	0.94 4	1,003.36
											2.293	2.460	6.763	14.881	54.55 3	2.82			982.25
7	4.50	51.75	64.00	64.40	64.40	64.27	1,180.80	681.0	1,188.2	507.20	2.328					2.89	1,107.00	0.98 1	1,085.69
8	4.50	51.75	65.00	64.90	64.80	64.90	1,166.00	672.8	1,179.1	506.30	2.303					3.09	1,068.21	0.96 7	1,032.52
9	4.50	51.75	64.30	64.50	64.60	64.47	1,175.60	678.4	1,186.0	507.60	2.316					3.04	1,073.38	0.97 6	1,047.83
											2.316	2.443	5.223	14.467	63.89 7	3.00			1,055.35

Tablo 4 .25. (Devamı)

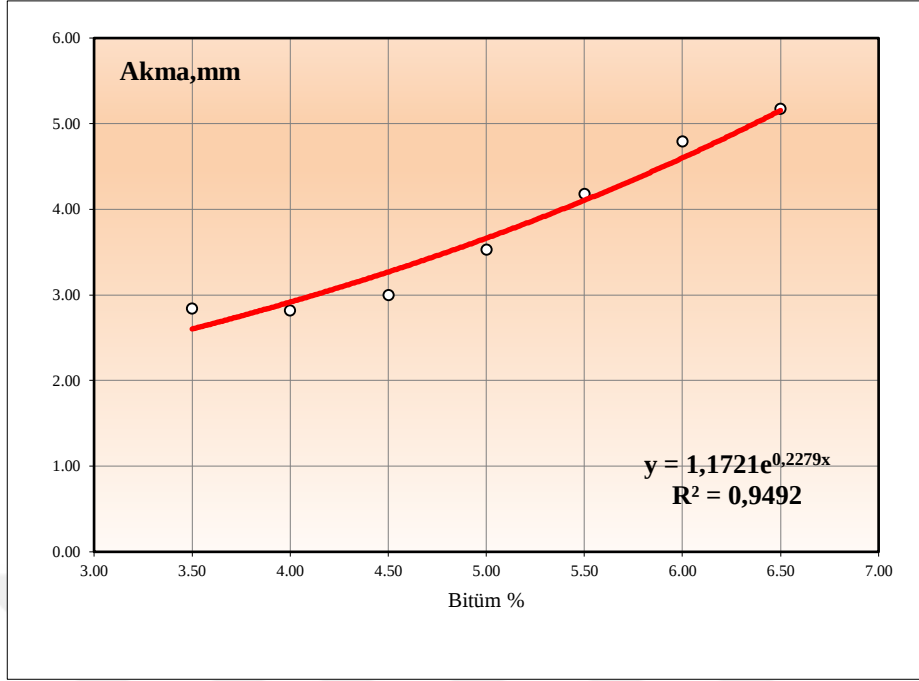
10	5.00	57.50	64.90	65.00	64.80	64.90	1,183.20	680.9	1,190.7	509.80	2.321					3.46	1,115.59	0.96 7	1,078.32
11	5.00	57.50	64.60	64.80	64.90	64.77	1,182.20	680.4	1,183.6	503.20	2.349					3.63	1,137.21	0.97 0	1,102.54
12	5.00	57.50	64.90	64.50	64.60	64.67	1,181.90	679.2	1,186.9	507.70	2.328					3.51	1,143.68	0.97 2	1,111.34
											2.333	2.427	3.891	14.247	72.69 3	3.53			1,097.40
13	5.50	63.25	63.20	63.50	63.40	63.37	1,182.70	682.4	1,184.4	502.00	2.356					4.14	1,211.94	1.00 2	1,214.78
14	5.50	63.25	63.30	62.80	63.30	63.13	1,176.40	677.0	1,178.8	501.80	2.344					4.20	1,177.00	1.00 8	1,186.72
15	5.50	63.25	63.60	63.20	63.60	63.47	1,184.60	680.4	1,186.2	505.80	2.342					4.22	1,219.00	1.00 0	1,218.81
											2.347	2.411	2.652	14.115	81.21 2	4.18			1,206.77
16	6.00	69.00	63.90	63.60	63.70	63.73	1,193.40	686.5	1,195.2	508.70	2.346					4.63	1,270.55	0.99 3	1,262.06
17	6.00	69.00	63.10	63.30	63.10	63.17	1,193.90	690.5	1,194.9	504.40	2.367					4.98	1,282.74	1.00 7	1,292.24
18	6.00	69.00	62.70	62.80	63.00	62.83	1,180.10	681.1	1,181.3	500.20	2.359					4.77	1,247.00	1.01 6	1,267.02
											2.357	2.396	1.610	14.158	88.62 5	4.79			1,273.77
19	6.50	74.75	62.30	62.40	62.90	62.53	1,186.90	689.1	1,188.8	499.70	2.375					5.31	1,239.20	1.02 4	1,269.04
20	6.50	74.75	63.00	62.60	62.70	62.77	1,189.20	688.4	1,190.1	501.70	2.370					5.20	1,211.51	1.01 8	1,233.10
21	6.50	74.75	62.70	62.80	63.10	62.87	1,193.50	690.7	1,194.3	503.60	2.370					5.03	1,215.00	1.01 5	1,233.44
											2.372	2.381	0.381	14.038	97.28 5	5.18			1,245.19
Şartname Limitleri													4-6	13-15	60-75	2-4			> 750



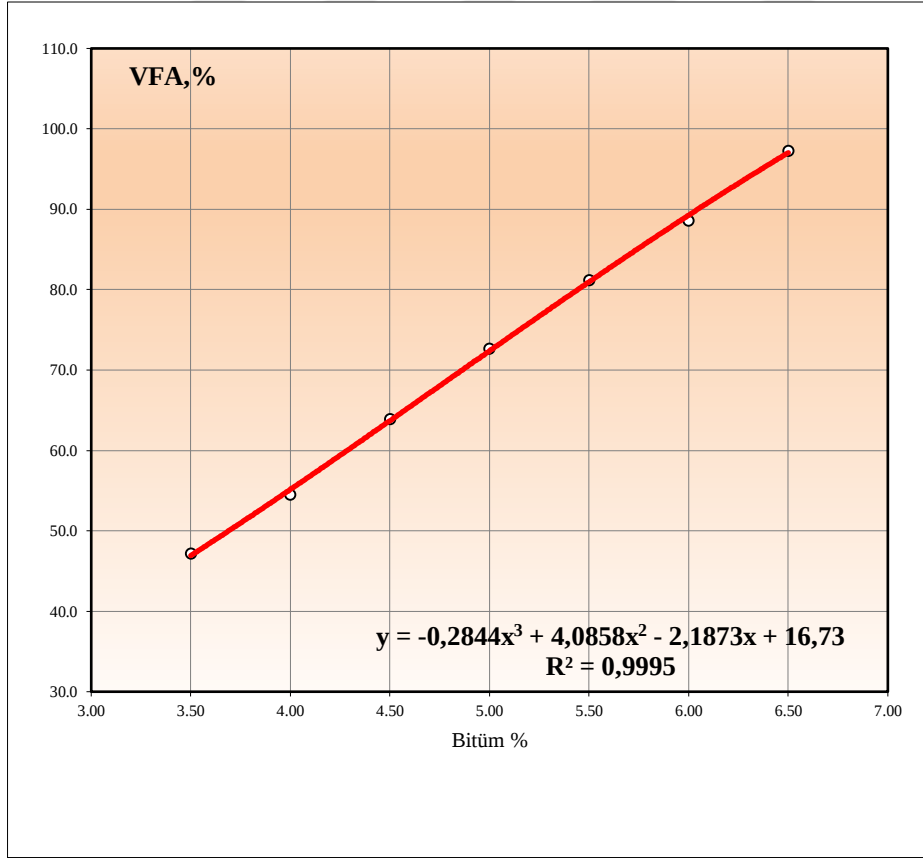
Şekil 4.7. Bitüm –Dp oranı



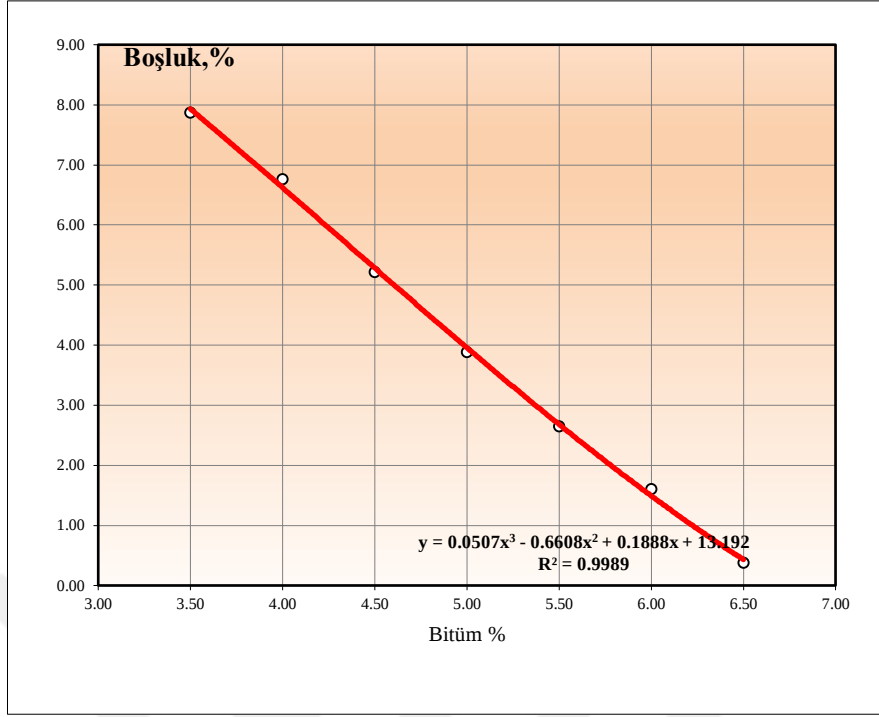
Şekil 4.8. Bitüm-Stabilite oranı



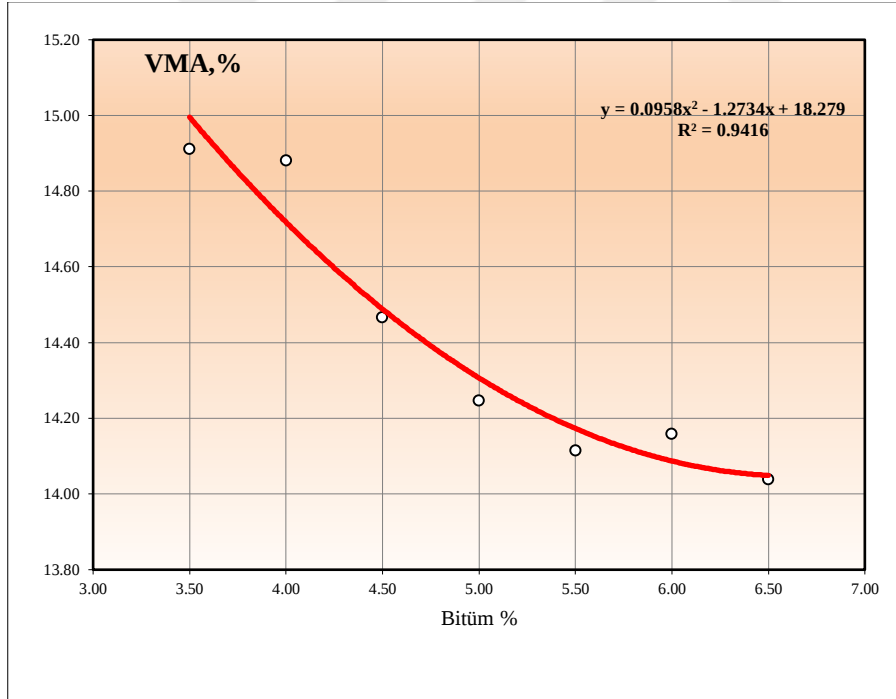
Şekil 4.9. Bitüm-Akma oranı



Şekil 4.10. Bitüm-VFA oranı



Şekil 4.11. Bitüm-Boşluk oranı



Şekil 4.12. Bitüm-VMA oranı (Işık,2024)

%4 olarak belirlenen optimum bitüm yüzdesinden sonra Taguchi Metodu ile oluşturulmuş deney planına göre her bir karışım için üç adet olacak şekilde toplam 16 set yani $16 \times 3 = 48$ adet Marshall numunesi hazırlanmıştır. Tablo 4.26’da stabilite deney sonuçları ve hesaplanan değerler sunulmuştur.

Tablo 4.26. Optimum bitüm yüzdesi ile Marshall stabilite deney sonuçları

Deney No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort.} (mm)	W _{hava} (gr)	W _{su} (gr)	W _{doy.} (gr)	V (cm ³)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cn)	V _h (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düz. Fak.	Düz. Stabilite (kg)	M/Q (kg/m m)
1A	65.50	65.20	65.30	65.33	1,190.9	681.4	1,196.1	514.7	2.314					3.22	931	0.96	890.87	
1B	65.30	65.40	65.30	65.33	1,174.2	673.7	1,183.0	509.3	2.306					2.89	869	0.96	831.57	
1C	67.60	67.80	67.50	67.63	1,187.5	681.1	1,202.2	521.1	2.279					3.07	961	0.91	871.96	
									2.299	2.43	5.32	15.44	65.58	3.06			864.80	283
2A	64.20	64.30	64.10	64.20	1,193.7	686.9	1,195.7	508.8	2.346					2.97	1,102	0.98	1,082.49	
2B	64.80	64.70	64.40	64.63	1,190.9	683.0	1,193.1	510.1	2.335					2.77	1,193	0.97	1,160.19	
2C	65.40	65.30	65.30	65.33	1,184.1	677.8	1,190.6	512.8	2.309					2.87	1,186	0.96	1,135.60	
									2.330	2.43	4.06	14.32	71.67	2.87			1,126.09	392
3A	63.50	63.40	63.40	63.43	1,186.4	683.1	1,187.5	504.4	2.352					2.95	1,232	1.00	1,232.69	
3B	64.60	64.70	64.70	64.67	1,185.4	678.7	1,189.6	510.9	2.320					2.81	1,168	0.97	1,135.30	
3C	64.40	64.20	64.20	64.27	1,189.7	682.5	1,191.7	509.2	2.336					3.12	1,223	0.98	1,199.23	
									2.336	2.43	3.80	14.09	73.04	2.96			1,189.07	402
4A	65.50	65.50	65.50	65.50	1,192.9	681.3	1,198.1	516.8	2.308					3.06	975	0.95	930.17	
4B	66.10	66.10	66.20	66.13	1,193.6	683.5	1,202.6	519.1	2.299					3.18	1,037	0.94	974.96	
4C	65.80	65.70	65.80	65.77	1,190.9	678.9	1,196.4	517.5	2.301					3.27	1,020	0.95	967.35	
									2.303	2.43	5.17	15.31	66.25	3.17			957.49	302
5A	64.90	64.80	64.80	64.83	1,196.8	686.9	1,197.8	510.9	2.343					2.41	1,130	0.97	1,094.08	
5B	65.10	65.40	65.00	65.17	1,196.2	685.3	1,197.9	512.6	2.334					2.51	1,125	0.96	1,080.65	
5C	64.20	64.30	64.10	64.20	1,194.5	688.2	1,196.1	507.9	2.352					2.76	1,161	0.98	1,140.04	
									2.343	2.43	3.53	13.85	74.49	2.56			1,104.92	432
6A	65.60	65.60	65.30	65.50	1,185.7	681.2	1,197.3	516.1	2.297					2.72	1,017	0.95	969.53	
6B	64.90	64.50	65.10	64.83	1,179.2	677.6	1,187.7	510.1	2.312					2.92	951	0.97	920.70	
6C	64.40	64.30	64.20	64.30	1,179.1	679.6	1,182.0	502.4	2.347					3.13	1,002	0.98	981.70	
									2.319	2.43	4.52	14.73	69.32	2.92			957.31	327

Tablo 4.26. (Devamı)

7A	64.90	65.00	64.90	64.93	1,196.4	685.2	1,199.8	514.6	2.325						2.86	981	0.97	947.32	
7B	65.00	65.10	65.30	65.13	1,197.2	684.1	1,201.2	517.1	2.315						2.80	1,111	0.96	1,067.88	
7C	65.60	65.70	65.40	65.57	1,185.3	678.0	1,193.4	515.4	2.300						3.30	1,094	0.95	1,041.85	
									2.313	2.43	4.74	14.93	68.24		2.99			1,019.02	341
8A	65.90	65.70	65.80	65.80	1,190.4	681.7	1,198.5	516.8	2.303						3.31	1,112	0.95	1,053.48	
8B	64.00	64.20	64.10	64.10	1,180.1	685.1	1,188.1	503.0	2.346						3.35	1,026	0.98	1,010.45	
8C	65.50	65.40	65.60	65.50	1,183.7	673.1	1,185.0	511.9	2.312						3.36	1,130	0.95	1,077.75	
									2.321	2.43	4.44	14.66	69.72		3.34			1,047.23	314
9A	64.50	64.50	64.60	64.53	1,192.8	684.1	1,194.2	510.1	2.338						2.34	1,159	0.97	1,130.16	
9B	64.80	64.90	64.90	64.87	1,195.4	685.0	1,197.2	512.2	2.334						2.09	1,179	0.97	1,140.65	
9C	65.60	65.50	65.60	65.57	1,192.7	680.6	1,197.6	517.0	2.307						2.13	1,239	0.95	1,180.31	
									2.326	2.43	4.20	14.45	70.91		2.19			1,150.37	526
10A	64.10	64.40	64.10	64.20	1,182.8	678.3	1,184.8	506.5	2.335						2.31	1,118	0.98	1,098.12	
10B	64.20	64.20	64.30	64.23	1,182.6	680.8	1,186.4	505.6	2.339						2.24	1,170	0.98	1,148.50	
10C	64.60	64.60	64.90	64.70	1,185.2	679.7	1,189.2	509.5	2.326						2.31	1,205	0.97	1,170.12	
									2.333	2.43	3.91	14.19	72.44		2.29			1,138.91	498
11A	63.50	63.60	63.50	63.53	1,177.1	679.1	1,185.4	506.3	2.325						2.58	1,139	1.00	1,136.95	
11B	64.40	64.10	64.50	64.33	1,184.6	680.6	1,192.8	512.2	2.313						2.38	1,141	0.98	1,117.37	
11C	64.30	64.20	64.30	64.27	1,185.1	684.1	1,193.5	509.4	2.326						2.80	1,090	0.98	1,068.88	
									2.321	2.43	4.41	14.63	69.87		2.59			1,107.73	428
12A	65.20	65.10	65.10	65.13	1,188.6	682.4	1,198.6	516.2	2.303						3.09	1,107	0.96	1,064.63	
12B	65.40	65.40	65.40	65.40	1,187.3	682.7	1,198.3	515.6	2.303						2.91	1,091	0.96	1,042.84	
12C	65.30	65.30	65.30	65.30	1,186.6	679.5	1,194.5	515.0	2.304						3.25	1,038	0.96	993.96	
									2.303	2.43	5.16	15.30	66.28		3.08			1,033.81	335
13A	66.00	66.00	65.80	65.93	1,188.3	684.3	1,198.6	514.3	2.311						2.08	1,082	0.94	1,022.03	
13B	65.10	65.00	65.10	65.07	1,192.2	683.6	1,197.2	513.6	2.321						2.20	1,098	0.96	1,057.06	
13C	65.40	65.50	65.50	65.47	1,191.3	684.2	1,198.6	514.4	2.316						2.17	1,116	0.95	1,065.64	
									2.316	2.43	4.63	14.83	68.76		2.15			1,048.24	488
14A	65.80	65.60	65.80	65.73	1,180.1	678.7	1,192.3	513.6	2.298						2.96	1,001	0.95	949.68	
14B	65.70	65.80	65.80	65.77	1,171.4	674.2	1,187.7	513.5	2.281						2.64	1,059	0.95	1,004.34	

Tablo 4.26. (Devamı)

14C	65.90	65.90	65.80	65.87	1,182.4	681.7	1,194.2	512.5	2.307						2.92	1,093	0.95	1,034.42	
									2.295	2.43	5.48	15.59	64.84	2.84				996.15	351
15A	66.10	66.10	66.20	66.13	1,190.5	683.8	1,201.0	517.2	2.302						2.74	1,159	0.94	1,089.80	
15B	65.80	65.80	65.90	65.83	1,197.1	684.1	1,203.7	519.6	2.304						2.57	1,261	0.95	1,193.69	
15C	64.80	65.00	64.80	64.87	1,189.6	681.7	1,193.0	511.3	2.327						2.86	1,196	0.97	1,156.94	
									2.311	2.43	4.85	15.02	67.74	2.72				1,146.81	421
16A	66.80	67.10	66.90	66.93	1,188.0	681.8	1,202.1	520.3	2.283						3.14	1,024	0.92	945.36	
16B	65.80	65.60	65.80	65.73	1,191.2	682.6	1,198.2	515.6	2.310						3.11	962	0.95	912.55	
16C	66.10	66.10	66.20	66.13	1,193.1	682.6	1,201.7	519.1	2.298						3.28	912	0.94	857.40	
									2.297	2.43	5.40	15.52	65.21	3.18				905.10	285
Şartname Limitleri											4-6	13-15	60-75	2-4				> 750	

Taguchi Yöntemiyle hesaplanan stabilite üzerindeki ortalama S/N etkileri Tablo 4.27’de verilmiştir. En büyük en iyi performans istatistiği kullanılarak stabiliteyi maksimum yapan optimum seviyeler Tablo 4.28’de görüldüğü gibi A3, B3, C2, D2 olarak bulunmuştur. Yapılan doğrulama deneyinin sonunda 1320.70 kg stabilite sonucu elde edilmiştir. Bu değere karşılık gelen S/N 62.416 olarak bulunmuştur. Bu değer %95 güven seviyesinde ve 61.884 ile 62.490 aralığındadır. Karıştırma sıcaklığı 0.551 ile stabilite üzerindeki en büyük etkiyi yapmıştır. Stabiliteyi etkileyen diğer parametreler sırasıyla katkı oranı, karıştırma süresi ve karıştırma hızı olmuştur.

Tablo 4.27. Marshall stabilite ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase RT 945	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	60.224	60.308	59.596	59.789
2. Seviye	60.263	60.437	60.844	60.683
3. Seviye	60.881	60.937	60.772	60.659
4. Seviye	60.175	59.862	60.331	60.413

Tablo 4.28. Marshall stabilite performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N’ e olan katkıları
Cecabase RT 945	A3	0.495
Sıcaklık	B3	0.551
Süre	C2	0.458
Hız	D2	0.297
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1.801
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		60.386
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (kg)		62.187 / 1286.328
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (kg)		62.416 / 1320.700
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		61.884 / 62.490

Bitümlü kaplamaların bozulmalara karşı dayanabildiği en yüksek yük stabilite olarak ifade edilir, akma değeri ise bu yük değerine ulaşıldığında düşeyde oluşan bozulmayı ifade eder (Geçkil, Aksağan vd., 2021). Stabilite değeri kullanılan Cecabase katkısının %0.40 seviyesine kadar artmış, %0.50 oranında ise azalma göstermiştir. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde en yüksek stabilite değeri saf bitümle hazırlanan karışımlara göre %3.121 artışla 1189.07 kg olmuştur. Stabilite değerini maksimuma çıkaran optimum seviyeler baz alınarak hesaplanan stabilite değeri ise saf bitümle hazırlanan karışımlara kıyasla %11.556 artışla 1286.33 kg olmuştur.

Anand vd. (2023) yaptıkları çalışmalarında benzer şekilde, Cecabase ilave ederek hazırladıkları IKA Marshall numunelerinin, BSK kontrol numuneler kadar iyi hatta daha iyi performans gösterdiklerini belirtmişlerdir.

Katkı maddesi oranı arttıkça akma değeri azalmış, Marshall katsayısı (MQ) oranı ise artış göstermiştir. Karışımların sertliklerini ve ayrıca tekerlek izine ve çeşitli bozulmalara karşı dirençleri MQ olarak ifade edilen önemli bir parametredir (Geçkil, Önal vd., 2021; Adnan vd., 2022). Cecabase katkısının karışımlara çeşitli seviyelerde eklenmesiyle, MQ değeri artarak kalıcı deformasyonlara karşı daha fazla direnç sağlamıştır.

Sheth (2010), çalışmasında 70-34 performans sınıflı saf bitüm kullanmıştır. Katkı maddesi olarak kullandığı katkı maddesinden %0,4 oranında ekleyerek ılık karışım numuneleri hazırlamıştır. Bitüm sıcaklığını 149°C’de sabit tutmuştur. Bu karışımların sonuçları BSK numuneleriyle kıyaslandıklarında benzer hava boşlukları sergiledikleri gözlemlenmiştir.

Manjunath vd. (2014), çalışmalarında katkı maddesi olarak iki farklı malzeme kullanmışlardır. Bu iki katkı maddesinden biri olan Cecabase RT karışımları için 130°C sıcaklık seçmişlerdir ve %0,4 oranında kullanmışlardır. Kullandıkları katkı maddelerini iki farklı gradasyon üzerinde denemişlerdir ve Marshall stabilite testinden sonra şu sonuçlara varmışlardır: Marshall stabilite testinden Evotherm ve Cecabase RT için

60/70 bitüm ile 130°C sıcaklıkta %28 ve %27 °1 ve %24 ve %22 °2'ye kadar stabilitede artış olduğu sonucuna varmışlardır.

Çakı (2024), çalışmasında 50/70 penetrasyon dereceli saf bitüme ağırlığınca %0, %0,3, %0,4 ve %0,5 olacak şekilde dört farklı oranda Cecabase RT BIO10 katkı maddesi eklemiştir. Deney planları oluşturulurken Taguchi L16 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Taguchi Metodu yardımıyla yapılan optimizasyonlar sonucunda belirlenen optimum seviyeler şu şekilde bulunmuştur: Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin oranı %0,4, karıştırma sıcaklığı 140°C, karıştırma süresi 30 dakika ve karıştırma hızı 1000 RPM . Kullandığı katkı maddesinin Marshall stabilite değerini %31,913 artırdığı sonucuna varmıştır.

4.10 Çoklu Yanıt Performans İndeksi (MRPI) ile Optimizasyon

S/N performans istatistiklerine göre RTFOT öncesi ve sonrası olacak şekilde 2 adet penetrasyon ve yumuşama noktası; RTFOT kütle kaybı, elastik geri dönme ve Marshall stabilitesi için en uygun seviyeler belirlenmiştir. Taguchi optimizasyonunda sadece bir adet bağımlı değişken (tepki) göz önünde bulundurulmuştur.

Fakat yapılan bu çalışmada olduğu gibi uygulamalarda birden fazla bağımlı değişken bulunmaktadır. Taguchi metodu literatürü ilk olarak tek bir yanıt planına odaklanmıştır. Taguchi yöntemi çok yanıtlı problemlerin optimizasyonunda doğrudan kullanılamamıştır. Ancak, Taguchi tasarımlarıyla her bir yanıt için elde edilen sonuçlar, farklı araştırmacıların geliştirdiği çeşitli yaklaşımlarla analiz edilebilir. (Çolak vd., 2023).

Yapılan bu çalışmada, Ağırlıkların Atanması Yöntemi kullanılarak çoklu yanıtlar tek bir yanıtla dönüştürülmüştür. (Krishnaiah vd., 2012). Taguchi Metodunda en büyük - en iyi performans istatistiği kullanılarak elde edilen sonuçlarda, her bir deney tipi için elde edilen S/N değerleri yani bağımsız yanıtlar (RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon, elastik geri dönme, stabilite), toplam S/N değerlerine bölünmüştür. En küçük - en iyi performans istatistiği yardımıyla hesaplanmış olan S/N değerleri için ise (RTFOT öncesi ve sonrası yumuşama noktası, RTFOT kütle kaybı) ters normalizasyon prosedüründen yararlanılmıştır.

MRPI ağırlıklı bir skor olduğu için optimal seviyeler maksimum MRPI değerlerine göre bulunmuştur. Ağırlık Atanması Yöntemi kullanılarak S/N değerleri ile bulunan ağırlıklar ve çoklu yanıt performans indeksleri (MRPI) Tablo 4.29’da verilmiştir. MRPI ortalama S/N etkileri ise Tablo 4.30’da verilmiştir.



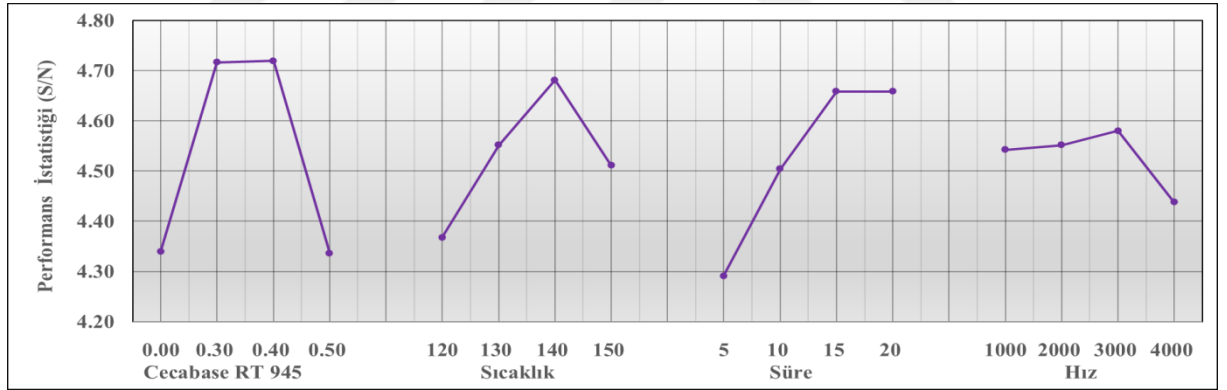
Tablo 4.29. MRPI değerleri

Deney No	Penetrasyon (RTFOT Öncesi)		Penetrasyon (RTFOT Sonrası)		Yumuşama Noktası (RTFOT Öncesi)		Yumuşama Noktası (RTFOT Sonrası)		RTFOT Kütle Kaybı		Elastik Geri Dönme		Marshall Stabilité		MRPI
	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	
1	37.81	0.061	34.06	0.061	-33.44	0.063	-34.32	0.063	-25.11	0.046	23.52	0.059	58.74	0.061	3.965
2	37.89	0.061	34.32	0.062	-33.44	0.063	-34.65	0.062	-24.21	0.047	24.08	0.061	61.03	0.063	4.358
3	38.92	0.063	34.99	0.063	-33.62	0.062	-34.93	0.062	-20.41	0.056	24.61	0.062	61.50	0.064	4.694
4	38.80	0.063	34.71	0.062	-33.64	0.062	-34.90	0.062	-16.67	0.069	24.08	0.061	59.62	0.062	4.343
5	38.29	0.062	34.73	0.062	-33.26	0.063	-34.32	0.063	-20.27	0.056	25.11	0.063	60.87	0.063	4.564
6	38.15	0.062	33.63	0.060	-33.35	0.063	-34.44	0.063	-23.02	0.050	26.44	0.067	59.62	0.062	4.431
7	39.54	0.064	35.49	0.064	-33.61	0.062	-34.65	0.062	-21.54	0.053	27.23	0.069	60.16	0.062	5.009
8	38.52	0.062	34.29	0.062	-33.53	0.062	-34.81	0.062	-19.68	0.058	27.96	0.071	60.40	0.063	4.861
9	39.85	0.064	35.73	0.064	-33.26	0.063	-34.49	0.063	-12.22	0.094	22.28	0.056	61.22	0.063	4.594
10	40.18	0.065	36.47	0.066	-33.12	0.063	-34.17	0.063	-9.78	0.117	24.08	0.061	61.13	0.063	4.933
11	37.95	0.061	34.70	0.062	-33.50	0.062	-34.49	0.063	-25.51	0.045	26.02	0.066	60.89	0.063	4.639
12	38.38	0.062	34.57	0.062	-33.55	0.062	-34.83	0.062	-17.16	0.067	26.85	0.068	60.29	0.062	4.711
13	39.04	0.063	36.01	0.065	-33.26	0.063	-34.32	0.063	-18.74	0.061	21.58	0.054	60.41	0.063	4.349
14	39.52	0.064	34.78	0.062	-33.42	0.063	-34.76	0.062	-16.97	0.067	24.08	0.061	59.97	0.062	4.485
15	38.46	0.062	34.33	0.062	-33.71	0.062	-35.04	0.062	-21.15	0.054	23.52	0.059	61.19	0.063	4.383
16	37.49	0.061	33.73	0.061	-33.57	0.062	-34.49	0.063	-18.60	0.061	25.11	0.063	59.13	0.061	4.129

Tablo 4.30. MRPI ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase RT 945	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	4.340	4.368	4.291	4.543
2. Seviye	4.716	4.552	4.504	4.552
3. Seviye	4.720	4.681	4.659	4.580
4. Seviye	4.336	4.511	4.659	4.438

Yapılan tüm deneylerden elden edilmiş olan yanıtların tek bir yanıtla dönüştürülmesi sonucu elde edilmiş MRPI sonuçları için optimum seviyeler Tablo 4.31’de verildiği gibi A3, B3, C4 ve D3 olarak belirlenmiştir. Çoklu yanıt performans indislerine en fazla etkileyen parametreler sırasıyla Cecabase RT 945 katkı oranı, sıcaklık, süre ve hız olmuştur. Şekil 4.13’den görüleceği üzere Cecabase RT 945 katkı maddesinin üçüncü seviyesine kadar (ikinci ve üçüncü seviyeler birbirine yakın etki göstererek) MRPI değeri artmış, dördüncü seviye de ise azalmıştır. 140°C karıştırma sıcaklığına kadar MRPI değeri artmış sonra bir miktar azalmıştır. Karıştırma süresinin üçüncü seviyesine kadar MRPI değeri artış göstermiş, dördüncü seviyede ise üçüncü seviye ile aynı etkiyi göstermiştir. Karıştırma hızının üçüncü seviyesine kadar MRPI değeri artmış daha sonra azalmıştır.



Şekil 4.13. MRPI performans istatistikleri

Optimum katkı oranı 0.4 olarak belirlenmiş olsa da, 0.3 de tercih edilebilir. Çünkü MRPI'yi maksimum yapan değerler incelendiğinde, Tablo 4.30'da görüldüğü üzere 0.3 ve 0.4 oranları yaklaşık olarak aynı etkiyi göstermektedir (4.716 ve 4.720). Bu nedenle, maliyet avantajı açısından 0.3 değeri de optimum olarak seçilebilir. Karıştırma hızı olarak 3000 RPM seçilmiştir, ancak 1000, 2000 ve 3000 RPM hızlarının benzer etkiler yarattığı gözlemlenmiştir (4.543, 4.552, 4.580). Dolayısıyla, farklı hızlar da tercih edilebilir.

Tablo 4.31. MRPI performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
Cecabase RT 945	A3	0.192
Sıcaklık	B3	0.153
Süre	C4	0.131
Hız	D3	0.052
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0.527
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		4.528

MRPI optimum seviyeleri için gerçekleştirilen doğrulama deney sonuçları ve performans istatistikleri Tablo 4.32’de sunulmuştur. MRPI için yapılan doğrulama deney sonuçları %95 güven aralığında hesaplanan sınırlar içinde kalmıştır.

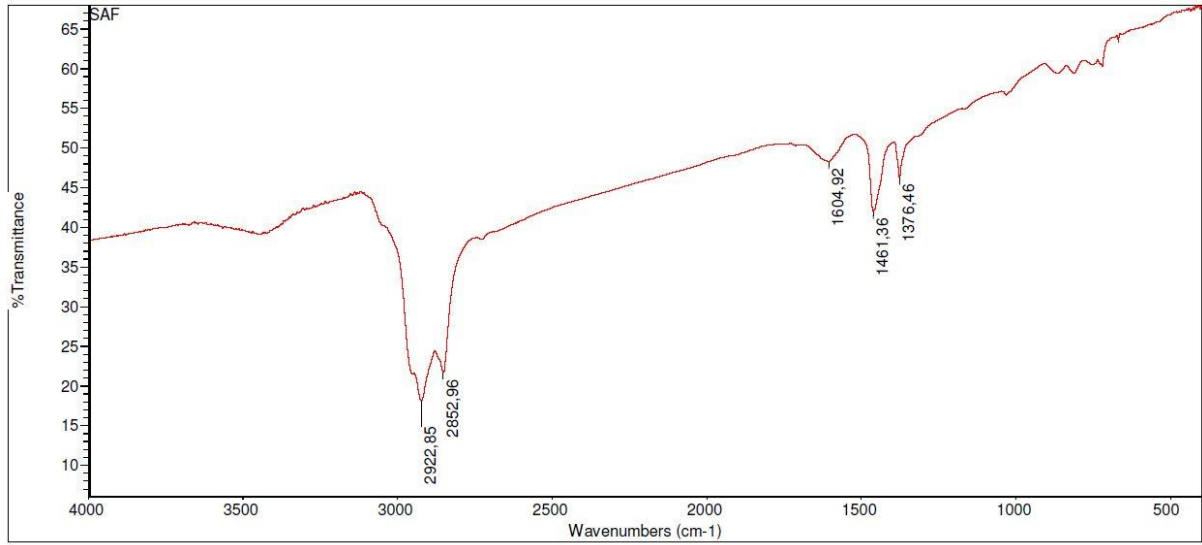
Tablo 4.32. MRPI performans istatistikleri ve doğrulama deney sonuçları

	Penetrasyon (RTFOT Öncesi)		Penetrasyon (RTFOT Sonrası)		Yumuşama Noktası (RTFOT Öncesi)		Yumuşama Noktası (RTFOT Sonrası)		Marshall Stabilite	
MRPI O Şartları Değer	39.897	S/N	36.541	S/N	-	S/N	-	S/N	61.650	S/N
	98.818	0.1 mm	67.153	0.1 mm	46.779	C ⁰	52.828	C ⁰	1209.242	kg
Doğrula Sonucu	39.673	S/N	36.726	S/N	-	S/N	-	S/N	61.926	S/N
	96.300	0.1 mm	68.600	0.1 mm	46.900	C ⁰	51.900	C ⁰	1248.300	kg
S/N Güven Aralığı (α=95%)	39.570	40.224	36.309	36.774	-	-	-	-	61.347	61.954

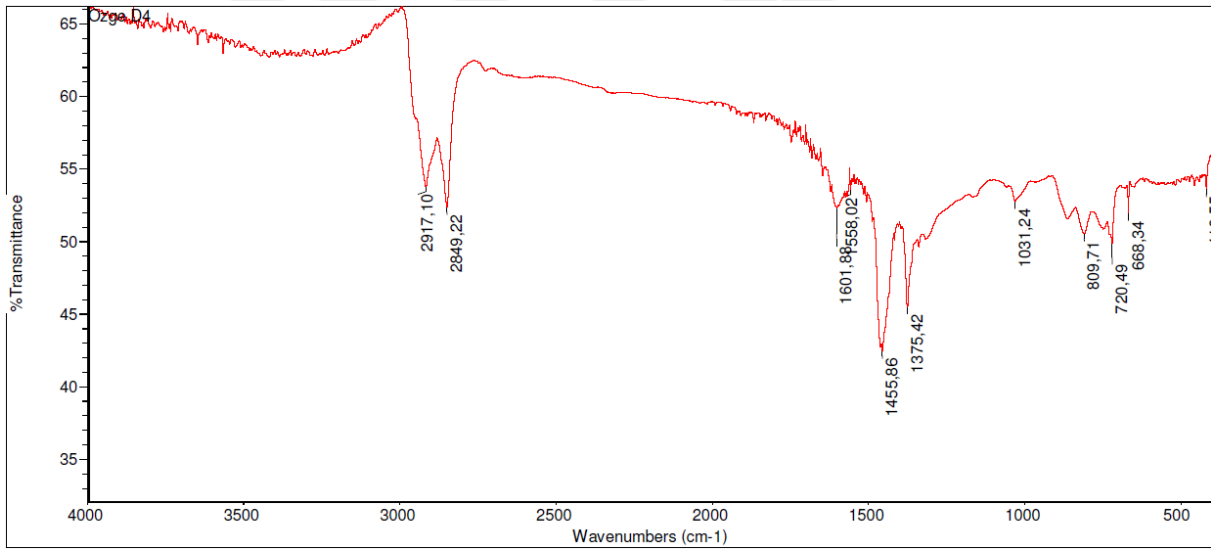
4.11 Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) Deney Sonuçları

Yapılan bu çalışmada 5 adet deney numunesine FT-IR analizi yapılmıştır. İlk analiz saf bitüme yapılmıştır. İkinci analiz %0 katkı oranı içeren Tablo 3.6’da verilen deney planındaki 4 numaralı numuneye yapılmıştır. Bu numune 150°C’de 20 dakika karıştırma süresi boyunca 4000 devir ile karıştırılmıştır. Üçüncü analiz deney no 6’ya yapılmıştır. Bu numune %0,30 oranında Cecabase RT 945 ile 130°C, 5 dakika süre boyunca 4000 devirde karıştırılmıştır. Dördüncü analiz deney no 13’e yapılmıştır. Bu numune %0,50 oranında Cecabase RT 945 ile 120°C, 20 dakika süre boyunca 2000 devirde karıştırılmıştır. Beşinci analiz deney no 16’ya

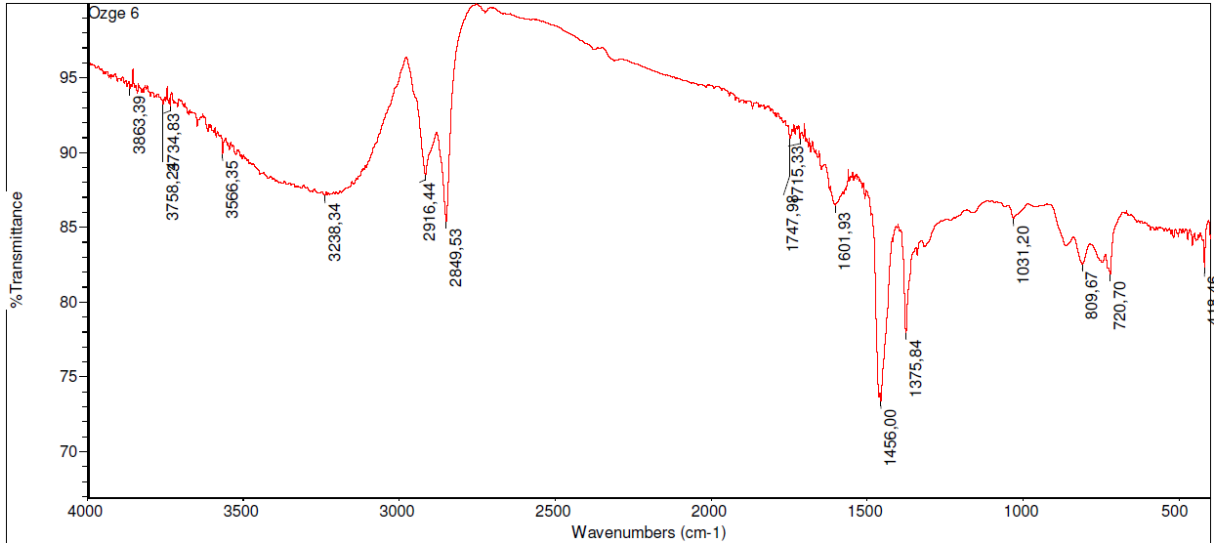
yapılmıştır. Bu numune %0,50 oranında Cecabase RT 945 ile 150°C, 5 dakika süre boyunca 3000 devirde karıştırılmıştır.



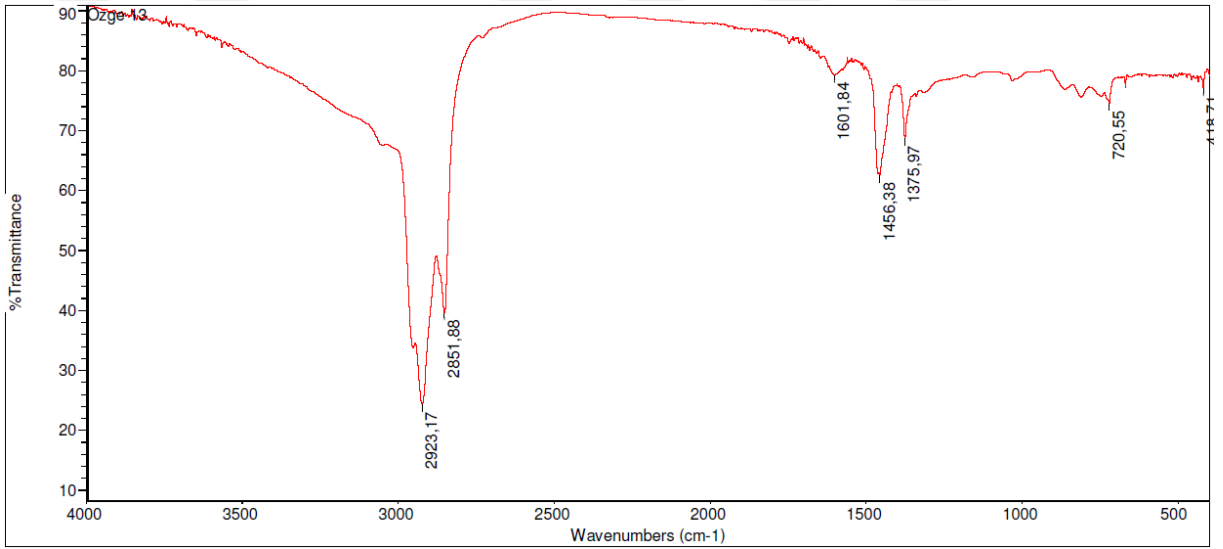
Şekil 4.14. Saf bitüm FT-IR deney sonucu



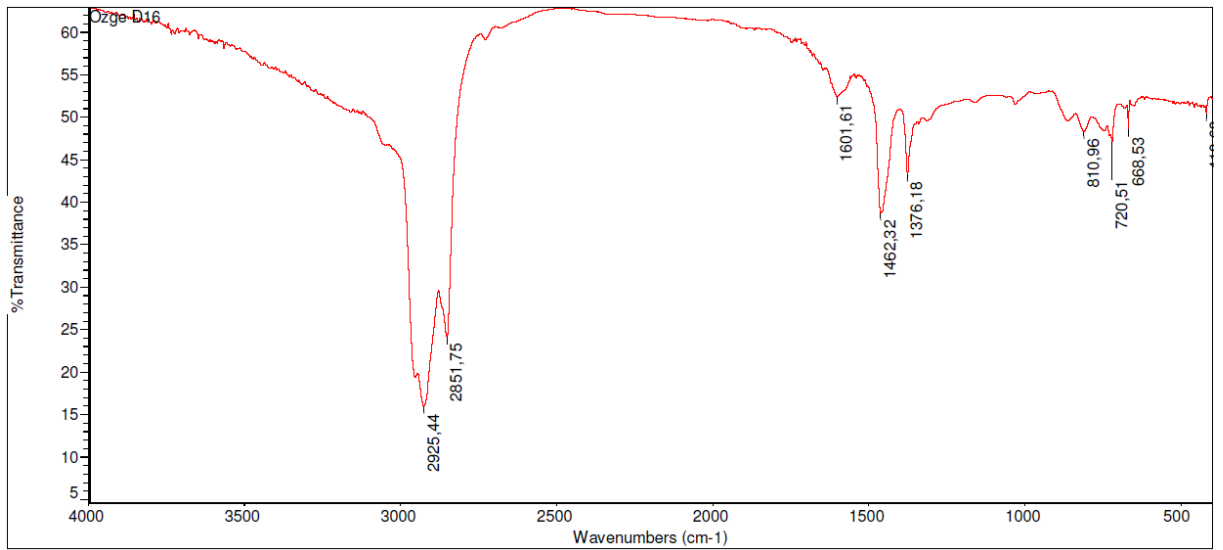
Şekil 4.15. Deney 4'e ait FT-IR deney sonucu



Şekil 4.16. Deney 6'ya ait FT-IR deney sonucu



Şekil 4.17. Deney 13'e ait FT-IR deney sonucu



Şekil 4.18. Deney 16'ya ait FT-IR deney sonucu

Saf bitümde görülen 2922 cm^{-1} ve 2852 cm^{-1} pikleri, C-H gerilme titreşimlerini (Feng vd., 2016) ifade etmektedir ve özellikle metil ve metilen gruplarının varlığını göstermektedir. 1604 cm^{-1} , 1461 cm^{-1} ve 1376 cm^{-1} pikleri ise aromatik C=C gerilme titreşimlerini ve CH eğilme titreşimlerini ifade etmektedir. Aromatik yapılar, bitümde genellikle yüksek oranda bulunmaktadır ve stabilize edici özelliklere katkıda bulunur.

Deney no 4 incelendiğinde 2917 cm^{-1} ve 2849 cm^{-1} pikleri C-H gerilme titreşim bölgelerinde hafif kaymalar olabileceğini gösterebilir. 1601 cm^{-1} , 1455 cm^{-1} ve 1375 cm^{-1} piklerindeki zirveler aromatik ve alifatik yapıların benzerliğini korumaktadır. Ancak zirve yoğunluklarında ufak farklılıklar gözlenebilir, bu da karışım süresi ve sıcaklığının moleküler yapı üzerinde etkisini yansıtmaktadır.

Deney no 6 incelendiğinde 2916 cm^{-1} ve 2849 cm^{-1} piklerinde C-H gerilme titreşimleri, katkı maddesinin eklenmesiyle çok az değişiklik olduğunu göstermektedir. Bu zirveler, katkı maddesinin hidrokarbon yapıya entegrasyonunu göstermektedir. 1601 cm^{-1} , 1456 cm^{-1} ve 1375 cm^{-1} pikleri Cecabase RT 945 ile aromatik ve alifatik yapılar arasında daha belirgin bir etkileşim olduğunu göstermektedir. Özellikle 1747 cm^{-1} ve 1031 cm^{-1} gibi yeni pikler, katkı maddesinin yapısal etkilerini yansıtmaktadır. Bu pikler genellikle ester veya karboksil gruplarıyla ilişkilidir ve Cecabase RT 945'in kimyasal yapısının bitüm ile etkileşime girdiğini göstermektedir.

Deney no 13 incelendiğinde 2923.17 cm^{-1} ve 2851.88 cm^{-1} pikleri belirgin C-H gerilme titreşimlerini göstermektedir. 2923 cm^{-1} asimetrik ve 2851 cm^{-1} piki ise simetrik C-H gerilme titreşimlerini ifade etmektedir. 1601.84 cm^{-1} piki genellikle C=C gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. 1456.33 cm^{-1} genellikle CH_2 bükülme titreşimlerini temsil etmektedir. 1375.97 cm^{-1} Bu pik belirgin C-H bükülme titreşimlerini ifade etmektedir. 720.55 cm^{-1} genellikle $-\text{CH}_2$ gruplarının (Malinowski vd., 2024) kayma titreşimlerine karşılık gelmektedir.

Deney no 16 incelendiğinde deney no 13 ile benzer C-H ve C=C titreşimleri gözlenmiştir. Ancak bu numunede 688.53 cm^{-1} gibi ekstra bir pik de bulunmaktadır, bu da numunenin yapısında farklılıkların olabileceğini işaret edebilir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, modifiye edilmiş bitümdeki optimum Cecabase RT 945 oranını belirleyebilmek için Taguchi Optimizasyonundan yararlanılmıştır buradaki amaç Cecabase RT 945 katkı oranının, karıştırma sıcaklığının, karıştırma süresinin ve karıştırma hızının optimum kombinasyonunu belirlemeye çalışmaktır. Çalışmada 70/100 penetrasyon dereceli saf bitümün ağırlığının %0, %0,3, %0,4 ve %0,5 oranlarında olacak şekilde 4 farklı seviyelerde katkı maddesi kullanılmıştır. Taguchi L16 ortogonal dizisine göre oluşturulan deney planları neticesinde karışımlar 120°C, 130°C, 140°C ve 150°C olacak şekilde dört farklı karıştırma sıcaklıklarında, 5, 10, 15 ve 20 dakikalık dört farklı karıştırma sürelerinde ve 1000, 2000, 3000 ve 4000 RPM olacak şekilde dört farklı karıştırma hızı ile hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere çeşitli deneyler uygulanmıştır. Bunlar: penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi, parlama noktası deneyi, RTFOT, elastik geri dönme deneyi ve Marshall stabilite testidir. Farklı parametre ve seviyelerin bağlayıcıya üzerindeki etkileri incelenmiştir ve şartnamaya uygunluğu kontrol edilmiştir. Sonuçlara genel olarak bakıldığında Cecabase RT 945 katkı maddesinin saf bitümün penetrasyon deneyi sonucunu artırdığı, yumuşama noktası deneyi sonucunu ise azalttığı görülmüştür. Modifiye edilmiş bitümün elastik geri dönme yüzdesi artarken RTFOT kütle kaybının ise azaldığı görülmüştür. Kullanılan katkı maddesi Marshall stabilite değerini artırmıştır.

Taguchi yöntemi, performans optimizasyonunda üç temel istatistik kullanır: En büyük en iyi, en küçük en iyi ve nominal en iyi. Yapılan çalışmalarda bu istatistiklerden herhangi biri seçilebilir. Bu çalışmada, elastik geri dönme, penetrasyon ve Marshall stabilitesi deneyleri için “en büyük en iyi” istatistiği tercih edilmiştir; bu nedenle, elde edilen sonuçların en büyük olması en iyi durum olarak değerlendirilmiştir. Yumuşama noktası ve RTFOT deneyleri için ise “en küçük en iyi” istatistiği seçilmiştir ve bu deneylerde elde edilen sonuçların en küçük olması en iyi durum olarak kabul edilmiştir.

RTFOT’un öncesinde yapılan penetrasyon deneyinde değeri maksimuma çıkaran optimum seviyeler incelendiğinde sırasıyla A3, B2, C4 ve D4 olduğu gözlemlenmiştir. Penetrasyon değerlerini etkileyen parametreler sırasıyla süre, katkı sıcaklık ve hız olmuştur. Penetrasyon değeri kullanılan katkı maddesinin %0.40 oranına kadar artış göstermiş, %0.50 oranına gelindiğinde ise bir miktar azalış göstermiştir. Süre ve hız arttıkça penetrasyon değeri artmış, sıcaklık arttıkça penetrasyon değeri azalmıştır. RTFOT’un öncesinde saf bitüme yapılan

penetrasyon deneyinin sonucu 83,3 (0,1mm) olarak bulunmuştur. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde penetrasyonun sonucu 74,90 ile 102,13 (0,1mm) aralığında değişmiştir.

RTFOT sonrası yapılan penetrasyon deneyinde değeri maksimuma çıkaran optimum seviyeler incelendiğinde sırasıyla A3, B1, C4, D3 olduğu gözlemlenmiştir. Penetrasyon değeri kullanılan katkı maddesinin %0.40 oranına kadar artış göstermiş, %0.50 oranına gelindiğinde ise bir miktar azalış göstermiştir. Sıcaklığın artması penetrasyon değerini azaltmış, sürenin artması ise penetrasyon değerini artırmıştır. RTFOT sonrası saf bitüme yapılan penetrasyon deneyinin sonucu 50,5 (0,1mm) olarak bulunmuştur. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde penetrasyonun sonucu 48,03 ile 66,60 (0,1mm) aralığında değişmiştir.

Penetrasyon deneyi, bitümün test sıcaklığı için kıvamın bir belirtisidir. Penetrasyon değeri yüksek bitüm daha akışkandır yani daha yumuşaktır, penetrasyon değeri düşük bitüm ise daha serttir yani daha viskozdur (Błażejowski vd., 2014). Genellikle, daha soğuk iklimlerde çatlama riskine karşı direnç sağlamak amacı ile daha yüksek penetrasyon değerlerindeki bağlayıcılar tercih edilirken, sıcak iklimlerde ise tekerlek izi oluşma riskine karşı daha düşük penetrasyon değerlerine sahip bağlayıcılar tercih edilir (Mirza vd., 2011).

RTFOT öncesinde yapılan yumuşama noktası deneyinde değeri minimum yapan optimum seviyeler incelendiğinde sırasıyla A3, B1, C4, D3 olduğu gözlemlenmiştir. Yumuşama noktası değeri kullanılan katkı maddesinin %0.40 oranına kadar azalış göstermiş, %0.50 oranına gelindiğinde ise bir miktar artış göstermiştir. Sıcaklığın artması ile yumuşama noktası değeri de artmıştır. RTFOT öncesinde saf bitüme yapılan yumuşama noktası deneyinin sonucu 45,50 °C olarak bulunmuştur. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde yumuşama noktası değeri 45,3 – 48,50 °C aralığında değişmiştir.

RTFOT sonrasında yapılan yumuşama noktası deneyi değerini minimum yapan optimum seviyeler incelendiğinde sırasıyla A3, B1, C1, D3 olduğu gözlemlenmiştir. Yumuşama noktası değeri kullanılan katkı maddesinin %0.40 oranına kadar azalış göstermiş, %0.50 oranına gelindiğinde ise bir miktar artış göstermiştir. Sonucu en fazla etkileyen parametre sıcaklık olmuştur. Sıcaklığın artması ile yumuşama noktası değeri de artmıştır. RTFOT sonrasında saf bitüme yapılan yumuşama noktası deneyinin sonucu 53,00 °C olarak bulunmuştur. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde yumuşama noktası değeri 51,10 – 56,50 °C aralığında değişmiştir.

Hem saf bitümde hem de Cecabase RT 945 ile modifiye edilmiş bitümlerde TS EN ISO 2592 standardında belirtilen minimum 230°C sıcaklığın üzerinde parlama noktası sonuçları elde edilmiştir. Bu yüzden Cecabase RT 945 katkı maddesi ile bitümün modifiye edilmesi parlama noktası açısından herhangi bir sakınca oluşturmamıştır.

RTFOT kütle kaybını en az yapan optimum seviyeler incelendiğinde sırasıyla A3, B4, C4, D3 olduğu gözlemlenmiştir. RTFOT kütle kaybında en etkili olan parametrelerin sıralaması Cecabase RT 945 katkısının oranı, süre, karıştırma hızı ve sıcaklıktır. Saf bitüme yapılan deney sonucu kütle kaybı değerinin % 0,52 olduğu bulunmuştur. Diğer numunelere yapılan deneylerde ise kütle kaybı değerinin % 0,03 – 0,18 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir.

Elastik geri dönme deneyinde değeri maksimuma çıkaran optimum seviyeler incelendiğinde sırasıyla A2, B4, C1, D1 olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde elastik geri dönme değerinin kullanılan katkı maddesinin %0.30 oranından sonra azalış gösterdiği belirlenmiştir. Karıştırma sıcaklığının artması ile elastik geri dönme yüzdesi artarken, karıştırma hızının ve karıştırma süresinin artması elastik geri dönme yüzdesini azaltmıştır. Saf bitüme yapılan elastik geri dönme deneyinin değeri % 9,00 olarak bulunmuştur. Deney planı esas alınarak yapılan deneyler sonucunda ise elastik geri dönme değerinin %6,00 – 12,50 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir.

Cecabase RT 945 katkı maddesi, saf bitümün sıcaklığa olan hassasiyetini azaltırken elastik geri dönme kabiliyetinde artış sağlamıştır. Bu sayede modifiye edilmiş karışımlar, hem yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyona hem de düşük sıcaklıklarda oluşabilecek çatlama ve kırılmaya karşı daha dayanıklı hale gelmiştir.

Marshall stabilite değerini maksimum yapan optimum seviyeler incelendiğinde sırasıyla A3, B3, C2, D2 olduğu gözlemlenmiştir. Stabilite değeri kullanılan katkı maddesinin %0,40 olan üçüncü seviyesine gelene kadar artarak devam ederken, %0,50 olan dördüncü seviyeye gelindiğinde ise birinci seviyeden daha fazla azalış göstermiştir. Karıştırma sıcaklıklarının artması ile stabilite değeri üçüncü seviyeye kadar artış göstermiştir fakat dördüncü seviyede 150°C ile karıştırılan numunelerde stabilitede azalma görülmüştür. Benzer durum karıştırma süresi ve hızında da görülmüştür. Optimum bitüm oranı ve saf bitüm ile hazırlanan karışımların stabilite değeri 1153.08 kg olarak bulunmuştur. Yapılan deneylerin sonucunda stabilite değeri 864.80 – 1189.07 kg aralıklarında değişmiştir.

İlk karışım asfalt numuneleri ile BSK kontrol numunelerine ait sıkıştırma sıcaklığı 160°C’de sabit tutulmuştur. Katkı maddesi ile modifiye edilip sıkıştırılmış olan karışımların Marshall

stabilite değerleri saf bitümle 160°C’de karıştırılarak sıkıştırılan numunelerin stabilite değerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Kullanılan katkı maddesinin artan oranıyla birlikte akma değerinde azalış, Marshall katsayısı (MQ) oranında ise artış gözlemlenmiştir. Bu sonuç modifiye edilen karışımların, tekerlek izi ve çeşitli bozulmalara karşı daha dayanıklı hale geldiğini göstermektedir.

Genel olarak, saf bitüm ve deney numuneleri arasında temel benzerlikler görölmektedir ancak deney numunelerinde belirli katkı maddesi ve hazırlama koşulları nedeniyle küçük yapısal farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar, katkı maddesi olan Cecabase RT 945’in ve karıştırma koşullarının bitümün kimyasal yapısına etkisini yansıtmaktadır. Saf bitümde transmittans daha yüksektir çünkü katkı maddesi yoktur ve organik bileşiklerin titreşim zirveleri daha az yoğun şekilde spektrumda gözlemlenmektedir. Katkılı numunelerde alifatik C-H gerilme titreşimleri ($2923-2851\text{ cm}^{-1}$) daha belirgin olup, katkının bitüm matrisinde bazı bağların yoğunluğunu artırdığı gözlemlenebilir. Daha uzun karıştırma süresi (20 dakika), katkı maddesinin bitüm içerisinde daha homojen dağılmasını sağlamaktadır bu da spektrumda bazı bağların daha yoğun gözlemlenmesine neden olabilir. Örneğin, 120°C’de 20 dakika boyunca karıştırılan numunede (Deney No 13) alifatik C-H gerilme titreşimlerinin yoğunluğu, 5 dakika boyunca karıştırılan numuneye kıyasla daha belirgin olabilir.

Cecabase RT 945 katkı maddesinin bitümün kimyasal yapısına olan etkileri incelendiğinde bitümün daha işlenebilir, esnek ve dayanıklı hale gelmesini sağlamaktadır. FT-IR spektrumlarındaki küçük frekans kaymaları ve ekstra pikler, bu katkı maddesinin bitümdeki fonksiyonel gruplarla etkileşime girerek yeni yapılar oluşturduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, Cecabase RT 945’in bitüm üzerindeki olumlu etkilerini göstermektedir.

Taguchi Metodu ile yapılan optimizasyonların sonucunda, en uygun seviyelerin %0,3 Cecabase RT 945 katkı oranı, 140°C karıştırma sıcaklığı, 20 dakika karıştırma süresi ve 3000 RPM karıştırma hızı olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

- Abed, A., Thom, N., Lo Presti, D., & Airey, G. (2020). Thermo-rheological analysis of WMA-additive modified binders. *Materials and Structures*, 53(3), 1–13.
- Adnan, A. M., Luo, X., Lü, C., Wang, J. & Huang, Z. (2022) “Physical properties of graphene-oxide modified asphalt and performance analysis of its mixtures using response surface methodology”, *International Journal of Pavement Engineering*, 23(5), 1378-1392.
- Alataş, T., ve Kizirgil, M. E. (2012). Saf ve polimer modifiyeli bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının dönel viskozimetre deneyi ile belirlenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 28(3).
- Anand, S., Gaur, A., & Singh, S. Y. (2023). Mechanistic-Empirical Properties and Long-Term Potential of Warm Mix with Cecabase. *Advances in Civil Engineering Materials*, 12(1), 295-313.
- Arık, A., (1998). *Balıkesir ili çevresindeki karayollarında esnek üstyapı bozulmalarının araştırılması*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi’nden edinilmiştir.
- Avcı, E. (2009). *Sıcak iklimle bölgelerde kullanılan asfalt betonu karışım değişkenlerinin kaplama tabakası performansına etkisi*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi’nden edinilmiştir.
- Awazhar, N. A., Khairuddin, F. H., Rahmad, S., Fadzil, S. M., Omar, H. A., Yusoff, N. I. M., & Badri, K. H. (2020). Engineering and leaching properties of asphalt binders modified with polyurethane and Cecabase additives for warm-mix asphalt application. *Construction and Building Materials*, 238, 117699.
- Ayçiçek, S. (2011). *Esnek üstyapılarda imalat ve uygulama kusurları*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi’nden edinilmiştir.
- Bairgi, B. K., & Tarefder, R. A. (2021). Field performance characteristics of warm mix asphalt (WMA) with various additives. In *International Conference on Transportation and Development 2021* (pp. 281-288).
- Belc, A. L., Coleri, E., Belc, F., & Costescu, C. (2021). Influence of different warm mix additives on characteristics of warm mix asphalt. *Materials*, 14(13), 3534.
- Błażejowski, K., Wójcik-Wisniewska, M., Baranowska, W. & Ostrowski, P. (2021) Bitumen handbook, *Orlen Asfalt*, Poland.

- Соломенцев, А. Б. (2018). Оценка уплотняемости горячих асфальтобетонных смесей с низкотемпературными добавками. *Строительство и реконструкция*, (4), 97-107.
- Çakı, M. (2024). *Ilık Karışım Asfaltlarda Optimum Cecabase Rt Bio10 Katkı Maddesi Oranının Ve Etkilerin Araştırılması*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Çıngıloğlu, P., Şengöz, B., Kaya Özdemir, D., Öner, J., ve Topal, A. (2023). Utilization of production shingle waste in hot mix asphalt and warm mix asphalt. *Journal Of Engineering Research*, 11(3).
- Çolak, M. A., Zorlu, E., Çodur, M. Y., Baş, F. İ., Yalçın, Ö. ve Kuşkapan, E. (2023) "Investigation of physical and chemical properties of bitumen modified with waste vegetable oil and waste agricultural ash for use in flexible pavements", *Coatings*, 13(11), 1866.
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., & Yeaton, B. (2008). *Warm-mix asphalt: European practice* (No. FHWA-PL-08-007). United States. Federal Highway Administration. Office of International Programs.
- EAPA (Avrupa Asfalt Üstyapı Birliği), Ilık Karışım Asfalt, Şubat 2016, çev. Zeliha TEMREN, Türkiye Asfalt Müteahhitleri Derneği- Şahin, S. N. A. (2020). *Asfalt üretim sıcaklığının düşürülmesinde kullanılan kimyasal katkıların etkilerinin araştırılması* (Master's thesis, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi).
- Feng, Z. G., Wang, S. J., Bian, H. J., Guo, Q. L., & Li, X. J. (2016). FTIR and rheology analysis of aging on different ultraviolet absorber modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 115, 48-53.
- Geçkil, T. (2019) "Physical, chemical, microstructural and rheological properties of reactive terpolymer-modified bitumen", *Materials*, 12(6), 921.
- Geçkil, T., Aksağan, Z. ve İnce, C. B. (2021) "Asfalt kaplamaların nem performansı üzerinde siyah karbonun etkisi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Politeknik Dergisi*, 9(5), 2102-2115.
- Geçkil, T., Önal, Y. ve İnce, C. B. (2021) "Atık PET ile modifiye edilmiş bitümlü sıcak karışımların nem direnci", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Politeknik Dergisi*, 24(2), 461-471.
- Goh, S. W., Hasan, M. R. M. and You, Z. (2013) "Performances evaluation of Cecabase® RT in warm mix asphalt technology", *Procedia-Social Behavioral Sciences*, 96, 2782-2790.

- Güngör, S. (2017). *Differentiation of filamentous fungi by Polymerase Chain Reaction (PCR) and fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Hernández, M. I. G. (2018). Life time prediction for low energy and ecological effects bituminous mixtures. *Construction and Building Materials*, 158, 108-113.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., ve Eren, K., (2001). Asfalt ve uygulamaları, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, İsfalt, İstanbul: Seçil Ofset.
- Işık, S. (2024). *Bitümlü Sıcak Karışımlarda Grafen Nanoplatelet Katkı Maddesi Performansının İncelenmesi*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Işıkyakar, G. (2009). *Polimer modifiye asfaltların reolojik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde fluoressan mikroskopi yönteminin kullanımı*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- İbiş, A. B. (2022). *Ilık karışım asfalt katkılı gözenekli asfaltın mekanik özelliklerinin incelenmesi*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Jattak, Z. A., Hassan, N. A., Satar, M. K. I. M., Jaya, R. P., & Hainin, M. R. (2021). Laboratory investigation of Coal Bottom Ash modified warm mix asphalt. *Jurnal Teknologi*, 83(4), 63-74.
- Kakar, M. R., Hamzah, M. O., Akhtar, M. N., & Woodward, D. (2016). Surface free energy and moisture susceptibility evaluation of asphalt binders modified with surfactant-based chemical additive. *Journal of cleaner production*, 112, 2342-2353.
- Karakaş, A. S. (2014). Bitümlü sıcak karışımların trafik etkisi altında mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Fırat Üniversitesi, Elazığ*.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, (2000). Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi. Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı. Ankara.
- Karadede, K. (2023). *Fotovoltaik enerji sistemlerinde Taguchi metodu ile performans analizi*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Kaya, D. (2014). *Ilık karışım asfaltların mekanik özelliklerinin incelenmesi*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Khairuddin, F. H., Alamawi, M. Y., Yusoff, N. I. M., Badri, K. H., Ceylan, H., & Tawil, S. N. M. (2019). Physicochemical and thermal analyses of polyurethane modified bitumen

- incorporated with Cecabase and Rediset: Optimization using response surface methodology. *Fuel*, 254, 115662.
- KGM. (2021) Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara.
- Kılıç, G. B., ve Karahan, A. G. (2010). Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ve laktik asit bakterilerinin tanısında kullanılması. *Gıda*, 35(6), 445-452.
- Köse, H., Çelik, O. N., & Arslan, D. (2024). A novel approach to warm mix asphalt additive production from polypropylene waste plastic via pyrolysis. *Construction and Building Materials*, 411, 134151.
- Krishnaiah, K. & Shahabudeen, P. (2012) Applied design of experiments and Taguchi methods, *PHI Learning Private Limited*, New Delhi.
- Kutluhan, S., ve Ağar, E. (2011). Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler ve azaltmaya yönelik öneriler. *İTÜ DERGİSİ/d*, 8(6).
- Lu, Q., Sha, A., Jiao, W., Shi, K., Peng, Z., & Song, R. (2024). Synergistic effects of sulfur and polyphosphoric acid additives in warm mix bio-rejuvenated asphalt modification. *Construction and Building Materials*, 433, 136676.
- Ma, F., Luo, X., Huang, Z. & Wang, J. (2020) “Characterization of recovery in asphalt binders”, *Materials*, 13(4), 920.
- Malinowski, S., Wozuk, A., Wróbel, M., Kwaśniewska, A., Gładyszewski, G., Škuldecké, J., & Franus, W. (2024). Anti-ageing and rheological performance of bitumen modified with polyaniline nanofibres. *Construction and Building Materials*, 437, 136810.
- Manjunath, K. R., Dheeraj Kumar, N., & Thippeswamy, G. S. (2014). Performance and Evaluation on Marshall Stability Properties of Warm Mix Asphalt Using Evotherm and Cecabase Rt®-A Chemical Additive. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)–Volume*, 12.
- Mirza, M. W., Abbas, Z. & Rizvi, M. A. (2011) “Temperature zoning of Pakistan for asphalt mix design”, *Pakistan Journal of Engineering Applied Sciences*.
- Namlı, R., ve Kuloğlu, N. (2007). Superpave Ve Marshall Yöntemlerinin DeneySEL Karşılaştırılması. *Teknik Dergi*, 18(87), 4103-4118.
- Oliveira, J. R., Silva, H. M., Abreu, L. P. and Gonzalez-Leon, J. A. (2012) “The role of a surfactant based additive on the production of recycled warm mix asphalts–Less is more”, *Construction Building Materials*, 35, 693-700.

- Orhan, F. (2012). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları. *Karayolları Genel Müdürlüğü, ARGE Daire Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme şubesi Müdürlüğü, Ankara*, 39.
- Ouni, A. E., Dony, A. & Colin, J. (2014). Probabilistic parametric approach for rutting evaluation: application to hot and warm asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(1), 58-65.
- Pamuk, Ö. C. (2019). *Ilık karışım asfalt katkılarının karışımların sıkıştırılabilirliği etkisinin incelenmesi*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Roy, R. K. (2010) A primer on the Taguchi method, *Society of Manufacturing Engineers*, United States of America.
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84.
- Sengoz, B. ve Isikyakar, G. (2008) "Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods", *Journal of hazardous materials*, 150(2), 424-432
- Shekhovtsova, S. O., Korolev, E., Novikov, A., & Shevtsova, A. (2022). Workability of warm mix asphalt additives and mechanical property characterization of asphalt concrete. *Magazine of Civil Engineering*, 115(7), 11509.
- Sheth, N. M. (2010). *Evaluation of selected warm mix asphalt additives* (Master's thesis, The University of Iowa).
- Sukhija, M., Saboo, N., & Pani, A. (2022). Economic and environmental aspects of warm mix asphalt mixtures: A comparative analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 109, 103355.
- Sukhija, M., Saboo, N., & Pani, A. (2024). Suitability of warm mix asphalt (WMA) technologies based on performance and energy consumption. *Road Materials and Pavement Design*, 25(7), 1479-1506.
- Syed, I. A., Mannan, U. A. and Tarefder, R. A. (2019). Comparison of rut performance of asphalt concrete and binder containing warm mix additives, *International Journal of Pavement Research Technology*, 12, 162-169.
- Umar, F. ve Ağar, E. (1991). Yol Kaplama Yapısı. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası.

- Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A., & Perveneckas, Z. (2009). Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4(2), 80-86.
- Yaman, N. (2019). *Dut, keçiboynuzu ve üzüm pekmezlerine glukoz şurubu katılarak yapılan Tağşişin fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ile tespiti*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Yamanlar, A. Ç. (2012). *Farklı kaplama türlerinin yüzey doku özelliklerinin incelenmesi*, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Yarcı, Ş. (2021). *Karayolu esnek üstyapılarında termal alan yöntemi ile performans tahmini* (Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Zou, F., Leng, Z., Cao, R., Li, G., Zhang, Y., & Sreeram, A. (2022). Performance of zeolite synthesized from sewage sludge ash as a warm mix asphalt additive. *Resources, Conservation and Recycling*, 181, 106254.
- <http://www.cecachemicals.com> adresinden 29 Temmuz 2024 tarihinde edinilmiştir.
- <https://insaatt.com/karayolu-nedir-karayolu-altyapisi-ve-ustyapisi/#:~:text=Karayollar%C4%B1%20%C3%B6nceden%20saptanan%20geometrik%20standartlara,edilmi%C5%9F%20yap%C4%B1lar%C4%B1n%20t%C3%BCm%C3%BC%20olarak%20adland%C4%B1r%C4%B1labilir>. adresinden 14 Ağustos 2024 tarihinde edinilmiştir.