

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ILIK KARIŞIM ASFALTLARDA OPTİMUM CECABASE RT
BIO10 KATKI MADDESİ ORANININ VE ETKİLERİN
ARAŞTIRILMASI

Mustafa ÇAKI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih İrfan BAŞ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2024

Her Hakkı Saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğr. Üyesi Fatih İrfan BAŞ danışmanlığında, Mustafa ÇAKI tarafından hazırlanan bu çalışma 17/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans olarak kabul oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK İmza:

Üye : Doç. Dr. Halim Ferit BAYATA İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih İrfan BAŞ İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun / / 2024 tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“İlık Karışım Asfaltlarda Optimum Cecabase RT BIO10 Katkı Maddesi Oranının ve Etkilerin Araştırılması” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 17/01/2024

(İmza)

Mustafa ÇAKI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ILIK KARIŞIM ASFALTLARDA OPTİMUM CECABASE RT BIO10 KATKI MADDESİ ORANININ VE ETKİLERİN ARAŞTIRILMASI

Mustafa ÇAKI

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih İrfan BAŞ

Esnek, rijit ve kompozit yol kaplamalarından dünya çapında en yaygın kullanılanı esnek kaplamadır. Esnek kaplamalarda Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) kullanımı, yüksek CO₂ emisyonları ve enerji tüketimi nedeniyle çevreyi olumsuz etkilemektedir. Ilık karışım asfalt (IKA) teknolojileri, asfalt karışımlarının geleneksel bitümlü sıcak karışımlara göre daha düşük sıcaklıklarda üretilmesine ve sıkıştırılmasına olanak tanıdığı için son birkaç on yılda dünya çapında giderek daha popüler hale gelmiştir. IKA üretiminde kullanılan en yaygın kimyasal katkılardan birisi de Cecabase RT BIO10'dur. Çalışmada 50/70 penetrasyonlu saf bitüme ağırlıkça %0, %0,3, %0,4 ve %0,5 oranları olmak üzere dört farklı seviyede Cecabase RT BIO10 eklenmiştir. Deney planları Taguchi L16 ortogonal dizisi kullanılarak oluşturulmuştur. Karışımlar 110°C, 120°C, 130°C ve 140°C karıştırma sıcaklıklarında, 15, 20, 25 ve 30 dakika süreyle 1000, 2000, 3000 ve 4000 RPM karıştırma hızıyla hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlara penetrasyon testi, yumuşama noktası testi, parlama noktası testi, dönel ince film etüvü testi (RTFOT), elastik geri dönme testi ve Marshall stabilite testi uygulanarak bu parametre ve seviyelerin bağlayıcıya olan etkileri araştırılmıştır. Cecabase RT BIO10 katkı maddesi saf bitümün penetrasyonunu artırmış, yumuşama noktası değerini ise azaltmıştır. Modifiye bitümün elastik geri dönme yüzdesi artmış, RTFOT kütle kaybı ise azalmıştır. Marshall stabilite değerinde ise katkı maddesi artışa neden olmuştur. Taguchi Metodu kullanılarak yapılan optimizasyonlar sonucunda optimum seviyeler %0,4 Cecabase RT BIO10 oranı, 140°C karıştırma sıcaklığı, 30 dakika karıştırma süresi ve 1000 RPM karıştırma hızı olarak bulunmuştur.

2024, 80 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Cecabase RT BIO10, Ilık karışım asfalt (IKA), Marshall stabilite, Modifiye bitüm

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF OPTIMUM CECABASE RT BIO10 ADDITIVE RATIO AND ITS EFFECTS IN WARM MIX ASPHALTS

Mustafa ÇAKI

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

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fatih İrfan BAŞ

Flexible pavement is the most widely used among flexible, rigid, and composite road pavements worldwide. Using Hot Mix Asphalt (HMA) in flexible coatings negatively affects the environment due to high CO₂ emissions and energy consumption. Warm mix asphalt (WMA) technologies have become increasingly popular worldwide over the last few decades as they allow asphalt mixtures to be produced and compacted at lower temperatures than traditional hot mix asphalts. One of the most common chemical additives used in WMA production is Cecabase RT BIO10. In the study, Cecabase RT BIO10 was added to pure bitumen with 50/70 penetration at four different levels: 0%, 0,3%, 0,4% and 0,5% by weight. Experimental plans were created using the Taguchi L16 orthogonal array. The mixtures were prepared at mixing temperatures of 110°C, 120°C, 130°C and 140°C, for 15, 20, 25 and 30 minutes, with a mixing speed of 1000, 2000, 3000 and 4000 RPM. Penetration test, softening point test, flash point test, rotational thin film oven test (RTFOT), elastic recovery test and Marshall stability test were applied to the prepared mixtures and the effects of these parameters and levels on the binder were investigated. The additive increased the penetration of pure bitumen and decreased the softening point value. The elastic recovery percentage of modified bitumen increased and RTFOT mass loss decreased. The additive caused an increase in the Marshall stability value. As a result of optimizations using the Taguchi Method, the optimum levels were found to be 0,4% Cecabase RT BIO10 ratio, 140°C mixing temperature, 30 minutes mixing time and 1000 RPM mixing speed.

.2024, 80 Pages

Keywords: Cecabase RT BIO10, Marshall stability, Modified bitumen, Warm mix asphalt (WMA),

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde ilgi, teşvik ve yardımlarıyla her zaman yanımda olan danışman hocam Sayın Fatih İrfan BAŞ'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, Sayın Doç. Dr. H. Ferit BAYATA'ya Sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali ÇOLAK'a teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmaları aşamasındaki yardımlarından ötürü Arş. Gör. Ahmet Oğuz DEMİRİZ'e, Arş. Gör. Ömer Faruk KELEŞ'e, değerli meslektaşlarım Suna IŞIK, Özge DEMİR ve Ensar TEYMUROĞLU'na, ayrıca çalışmış olduğum E.B.Y.Ü. Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında daire başkanı olarak görev yapan Öğr. Gör. Fatih YILDIZBİLİR'e desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Son olarak, bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, maddi manevi hiçbir desteği bende eksik etmeyen aileme, her koşulda sabırla yanımda olan sevgili eşime ve çocuklarıma minnet ve sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mustafa ÇAKI

Ocak, 2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Ilık Karışım Asfalt (IKA) Hakkında Çalışmalar	4
2.2. Cecabase RT BIO10 Katkılı IKA Karışımlarla İlgili Çalışmalar	7
2.3. Cecabase RT Katkılı IKA Karışımlarla İlgili Çalışmalar	9
3. KURAMSAL TEMELLER.....	13
3.1. Bitümlü Bağlayıcılar	13
3.2. Sıcak Karışım Asfalt (BSK).....	14
3.3. Modifiye Bitüm	15
3.4. Ilık Karışım Asfalt (IKA).....	16
3.4.1. Ilık karışım asfalt üretim teknolojileri.....	16
3.4.1.1. Organik katkıları	16
3.4.1.2. Kimyasal katkıları	17
3.4.1.3. Köpüklendirme teknikleri	17
3.4.2. Ilık karışım asfaltın faydaları	17
3.4.2.1. Üretimdeki faydaları	17
3.4.2.2. Uygulama işlemlerindeki faydaları.....	17
3.4.2.3. Sağlık güvenlik ve çevresel faydaları	18
3.4.3. Ilık karışım asfaltın performansı	18
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	19
4.1. Materyal	19
4.1.1. Bitüm.....	19
4.1.2. Agrega ve Filler.....	19
4.1.3. Cecabase RT BIO10.....	21

4.2. Yöntem	22
4.2.1. Taguchi Metodu	23
4.2.2. Modifiye Bitüme Uygulanan Deneyler	25
4.2.3. Modifiye bitümün karıştırılması.....	25
4.2.4. Penetrasyon testi.....	27
4.2.5. Yumuşama noktası testi	28
4.2.6. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) testi	29
4.2.7. Elastik geri dönme testi	30
4.2.8. Parlama noktası testi	32
4.2.9. Marshall deney yöntemi ile tasarım	32
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	43
5.1. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deneyi Sonuçları.....	43
5.2. RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneyi Sonuçları.....	45
5.3. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları.....	47
5.4. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları.....	50
5.5. Penetrasyon İndeksi.....	52
5.6. RTFOT Sonuçları	53
5.7. Elastik Geri Dönme Deneyi Sonuçları	56
5.8. Marshall Stabilite Deneyi Sonuçları	58
5.9. Çoklu Yanıt Performans İndeksi (MRPI) ile Optimizasyon	66
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR	75

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması (Yüknü vd., 2021).....	13
Şekil 3.2. Ham petrolden bitüm elde edilmesi (Lav ve Lav, 2004)	14
Şekil 3.3. Sıcaklık-enerji tüketimi ve tekniklerinin sınıflandırılması (ASMÜD, 2023) .	16
Şekil 3.4. IKA'nın BSK'ya göre çevreye katkısı (Hassan, 2010).....	18
Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan agregalar	20
Şekil 4.2. Gradasyon eğrisi	21
Şekil 4.3. Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin görünümü.....	22
Şekil 4.4. Bitüme uygulanan deneylerin akış şeması.....	25
Şekil 4.5. Kendinden ısıtıcılı High Shear Mikser	26
Şekil 4.6. Karışım sonrası hazırlanmış bitüm numuneleri	27
Şekil 4.7. Penetrasyon deney cihazı.....	28
Şekil 4.8. Yumuşama noktası deney cihazı.....	29
Şekil 4.9.RTFOT (Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deney) Cihazı	29
Şekil 4.10. RTFOT sonrası kütle kaybını bulmak için ayrılan iki adet numune şişesi..	30
Şekil 4.11. Elastik geri dönme deneyi cihazı ve numune dolu kalıplar	31
Şekil 4.12. Elastik geri deneyinde numunelerin çekilerek kesilmesi.....	31
Şekil 4.13. Parlama noktası deney cihazı.....	32
Şekil 4.14. Deney malzemelerin ısıtıldığı etüv	34
Şekil 4.15. Marshall stabilite deney tokmağı.....	34
Şekil 4.16. Marshall deney numunelerinin kalıptan çıkarılması.....	35
Şekil 4.17. Briketin yüksekliğinin ölçülmesi	35
Şekil 4.18. Marshall numunelerine UPV testi yapılması	36
Şekil 4.19. Marshall deney numunesinin tartılması	36
Şekil 4.20. Su banyosu havuzu	39
Şekil 4.21. Marshall test cihazı	39
Şekil 4.22. Marshall deney numuneleri.....	40
Şekil 4.23. Modifiye bitümler ile hazırlanan 48 adet Marshall briketleri.....	42
Şekil 4.24. Optimum seviyeler ile hazırlanan 3 adet IKA Marshall briketi.....	42
Şekil 5.1. RTFOT sonrası penetrasyonun tüm seviyeler için performans istatistikleri ..	47
Şekil 5.2. RTFOT öncesi yumuşama noktası için performans istatistikleri.....	49
Şekil 5.3. Saf bitüm ve deney sonuçlarının penetrasyon indeksi karşılaştırması.....	53

Şekil 5.4. RTFOT kütleli kayıplar için 2D ve 3D kontur çizgileri	55
Şekil 5.5. Elastik geri dönme tüm seviyeler için performans istatistikleri.....	58
Şekil 5.6. Dp-Bitüm oranı	60
Şekil 5.7. Stabilite-Bitüm oranı.....	60
Şekil 5.8. Akma-Bitüm oranı	61
Şekil 5.9. VFA-Bitüm oranı	61
Şekil 5.10. Boşluk oranı-Bitüm oranı	62
Şekil 5.11. VMA-Bitüm oranı.....	62



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. B 50/70 penetrasyonlu saf bitümün özellikleri	19
Tablo 4.2. Agregaların fiziksel özellikleri.....	20
Tablo 4.3. Agregaların elek analizi	21
Tablo 4.4. Deney parametreleri ve seviyeleri	24
Tablo 4.5. Deney planı	24
Tablo 4.6. Marshall tasarım yönetimi kriterleri	40
Tablo 4.7. Optimum Bitüm %'si için formül tablosu	41
Tablo 5.1. RTFOT öncesi penetrasyon ve S/N değerleri	43
Tablo 5.2. RTFOT öncesi penetrasyon ortalama S/N etkileri.....	44
Tablo 5.3. RTFOT öncesi penetrasyon performans tahminleri.....	44
Tablo 5.4. RTFOT sonrası penetrasyon ve S/N değerleri.....	45
Tablo 5.5. RTFOT sonrası penetrasyon ortalama S/N etkileri	46
Tablo 5.6. RTFOT sonrası penetrasyon performans tahminleri	46
Tablo 5.7 RTFOT öncesi yumuşama noktası ve S/N değerleri	48
Tablo 5.8. RTFOT öncesi yumuşama noktası ortalama S/N etkileri	48
Tablo 5.9. RTFOT öncesi yumuşama noktası performans tahminleri	49
Tablo 5.10. RTFOT sonrası yumuşama noktası ve S/N değerleri	50
Tablo 5.11. RTFOT sonrası yumuşama noktası ortalama S/N etkileri	51
Tablo 5.12. RTFOT sonrası yumuşama noktası performans tahminleri.....	51
Tablo 5.13. Penetrasyon indeksi sonuçları.....	52
Tablo 5.14. RTFOT kütle kaybı değerleri ve S/N değerleri	54
Tablo 5.15. RTFOT ortalama S/N etkileri	54
Tablo 5.16. RTFOT kütle kaybı performans tahminleri	55
Tablo 5.17. Elastik geri dönme deney sonuçları ve S/N değerleri.....	56
Tablo 5.18. Elastik geri dönme yüzdesi ortalama S/N etkileri	57
Tablo 5.19. Elastik geri dönme yüzdesi performans tahminleri	57
Tablo 5.20. Optimum bitüm oranının belirlenmesi için deney sonuçları	59
Tablo 5.21. Optimum bitüm yüzdesi ile Marshall stabilite deney sonuçları	63
Tablo 5.22. Marshall stabilite ortalama S/N etkileri	65
Tablo 5.23. Marshall stabilite performans tahminleri.....	65
Tablo 5.24. MRPI değerleri	68

Tablo 5.25. MRPI ortalama S/N etkileri	69
Tablo 5.26. MRPI performans tahminleri	69
Tablo 5.27 MRPI performans istatistikleri ve doğrulama deney sonuçları	70



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

%	Yüzde
mm	Milimetre
°C	Santigrat Derece
devir/dak	Dakikada Devir Sayısı
cm ³	Santimetre Küp
g	Gram

Kısaltmalar

BSK	Sıcak Karışım Asfalt
FTIR	Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi
HWTD	Hamburg Tekerlek İzi Cihazı
IKA	Ilık Karışım Asfalt
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LTPP	Uzun Süreli Kaplama Performansı
MRPI	Ağırlıklar ve Çoklu Yanıt Performans İndeksleri
RAP	Geri Dönüştürülmüş Asfalt
RTFOT	Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi
PG	Bitümün Performans Sınıfı
S/N	Taguchi Yöntemi Performans İstatistiği
TSR	İndirekt Çekme Dayanım Oranı
VFA	Bitüm ile Dolu Boşluk (%)
VMA	Agregalar Arasındaki Boşluk (%)
VTM	Toplam Karışımın Boşluk Oranı

1. GİRİŞ

Dünya nüfusu 20. yüzyılın ortalarından itibaren günümüze kadar üç kat artmıştır. Birleşmiş Milletlerin tahminlerine göre 2050 yılına kadar dünya nüfusu 11 milyara ulaşacaktır (UN, 2021). Nüfusun artışı ile birlikte insanların mobilite ihtiyaçları ve dolayısıyla modern ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerine olan talepleri de artmaktadır. Bir yol kaplamasının maliyetinin daha yüksek olmasına sebep olan ana faktörlerden biri de şüphesiz ki kullanılan enerji miktarıdır.

Yol kaplamalarında Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) kullanımı, yüksek CO₂ emisyonları ve enerji tüketimi nedeniyle çevreyi olumsuz etkilemektedir. Ilık Karışım Asfalt (IKA), işlenebilirliğin artırılması, emisyonların azaltılması, enerji tüketiminin azaltılması, yaşlanmasının azalması ve inşaat süresinin uzaması, çalışma koşullarının iyileştirilmesi (zehirli gazların emisyonunun azalması nedeniyle) gibi çevresel ve ekonomik faydaları nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür (Bower vd., 2016; Xu vd., 2017; Yang vd., 2019).

IKA, asfalt karışımlarını normalde BSK üretiminde kullanılan sıcaklıklardan daha düşük sıcaklıklarda karıştırma ve sıkıştırma yapılabilmesi için bir dizi teknoloji sağlamaktadır. Normalde BSK için kullanılan sıcaklığın 10 ila 90 °C altında olan sıcaklıktaki bu azalış, asfalt karışımlarının aşağıdaki sıcaklığa dayalı sınıflandırmasına yol açmıştır: Sıcak Karışım Asfalt (150 ila 190°C); Ilık Karışım Asfalt (100 ila 140°C); Yarı Ilık Karışım Asfalt (60 ila 100°C); ve Soğuk Karışım Asfalt (0 ila 40°C) (Vaitkus vd., 2009; EAPA, 2010; Rubio vd., 2012).

IKA kaplamalar, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında 25–30°C'lik azalma sağlayarak enerji tüketimini ve emisyonları azaltmaktadır (Chowdhury ve Button, 2008; Sharma vd., 2019). Üretim sıcaklıklarındaki azalma, çeşitli IKA teknolojilerinin kullandığı farklı mekanizmalar yoluyla gerçekleşir. IKA teknolojileri esas olarak asfalt bağlayıcıların viskozitesini azaltır ve işlenebilirliği ve sıkıştırılabilirliği artırır. Bu teknolojilerin asfalt karışımlarının termo-mekanik ve dayanıklılık özellikleri ile asfalt bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerinde de farklı etkileri olabilir. IKA teknolojileri, geleneksel BSK'ya kıyasla daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları gerektirdiğinden enerji tüketimini

%18-30 oranında azaltmaktadır (Hamzah vd., 2010; Rodríguez-Alloza vd., 2015; Almeida-Costa ve Benta, 2016).

Genel olarak, IKA teknolojileri köpüklendirme teknolojileri, organik katkı maddeleri ve kimyasal katkı maddeleri olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. Farklı teknoloji sınıfları arasında kimyasal katkı maddeleri genellikle bağlayıcıların reolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilemez. Bazı bağlayıcının kaynağı, IKA katkı maddesinin türü ve miktarı, geri dönüştürülmüş malzemelerin ve bağlayıcı değiştiricilerin varlığı ve üretim sıcaklıkları dahil olmak üzere, IKA katkı maddeleri içeren asfalt karışımlarının özelliklerini çok çeşitli faktörler etkileyebilir. IKA katkılarının kullanımı asfalt karışımının mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirebilmesine rağmen, aynı zamanda nem hasarına karşı hassasiyetin artması gibi asfalt karışımların özellikleri üzerinde bazı olumsuz etkilere de yol açabilmektedir. Bu nedenle, dayanıklılık ve performansla ilgili olası sorunlardan kaçınmak için IKA katkı maddelerinin uygun tipinin ve miktarının belirlenmesi kritik bir aşamadır (Behnood, 2020).

IKA'nın üretim prosesi sırasında, adezyon ile agregaların bağlayıcı tarafından kaplanması artırılması amacıyla bağlayıcıya kimyasal IKA katkı maddeleri eklenebilir. Organik katkı maddelerinin aksine, kimyasal katkı maddeleri daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları elde etmek için viskozitenin azaltılması prensibine dayanmaz (Rubio vd., 2012). Bu katkı maddeleri genellikle bağlayıcıların viskozite ve diğer özelliklerini önemli ölçüde etkilemezler (Hurley ve Prowell, 2006a; Prowell vd., 2007). Ancak adezyonu güçlendirebilir ve bağlanma mukavemetini artırabilirler (Liu vd., 2018). IKA karışımlarında kullanılan kimyasal katkı maddelerinin örnekleri arasında Revix, Evotherm, Cecabase, Rediset, Iterlow, Zycotherm ve HyperTherm/QualiTherm bulunmaktadır (Cheraghian vd., 2020).

Cecabase RT katkısı, 2004 yılından beri dünya genelinde 2.0 milyon tonun üzerinde ılık asfalt üretiminde kullanılan su içermeyen bir katkı maddesidir (Chen vd., 2019). Yüzey aktif ajanlarını %50 oranında yenilenebilir bitkisel kökenli hammaddeler oluşturmaktadır (Ouni vd., 2014). Bitüm kalitesinde değişikliğe sebep olmadan bitümlü karışımların işlenebilirliğini artıran sarı renkli sıvı ılık karışım katkı maddesidir. Bu karışımların üretimi ve serimi standart sıcak karışımlardan daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Bu katkı maddesinin kullanımının sağlayacağı temel faydalar; daha yüksek miktarda RAP

kullanımı, daha az koku, duman ve sera gazı emisyonları olarak sıralanabilir (ARKEMA, 2023).

Bu çalışmada, IKA katkı maddesi olarak Cecabase RT BIO10 kullanılmıştır. Cecabase RT yerine Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin seçilmesinin nedeni ise katkı maddesinin biyolojik olarak parçalanabilir olmasıdır.

Yapılan literatür çalışmalarında Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin kullanımının araştırılması çok sınırlıdır. Ilık karışım asfaltta kullanılan Cecabase RT ve diğer katkı maddeleri üzerine yapılan literatür çalışmalarında ise bitüme farklı oranlarda katkı maddeleri ilave edilerek karıştırma sıcaklığı, hızı, süresi gibi parametreler sabit tutulmuştur. Bu nedenle bu çalışmada Taguchi Yöntemi kullanılarak değişen karıştırma sıcaklıkları, karıştırma hızları, karıştırma süreleri ve Cecabase RT BIO10 katkı oranlarının bitüm performansına etkisi araştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatür araştırmasında, IKA teknolojisi ile ilgili yapılan araştırmalar, IKA modifiye bitümlerinde katkı maddesi olarak kullanılan Cecabase RT ile yapılan araştırmalar ve Cecabase RT BIO10 ile yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda IKA tanıtılmış, gelişimi değerlendirilmiş, teknolojileri ortaya konulmuş, uluslararası IKA araştırmalarından özetler sunulmuş ve bu araştırmalar doğrultusunda performans özelliklerinden bahsedilmiştir.

2.1. Ilık Karışım Asfalt (IKA) Hakkında Çalışmalar

Çolak (2012), Çalışmasında ılık karışım asfalt teknolojisine katkı malzemesi olarak asphamin kullanmıştır. Asphaminin bitümde hacim artışı sağladığı ve daha düşük sıcaklıklarda asfaltın işlenebilirliğinin arttığını ve bağlayıcının agregayı sarmasına katkısı olduğu sonucuna ulaşmıştır. Çeşitli sıcaklıklarda 110°C, 120°C ,130°C,140°C, 150°C sıcaklıklarda ve %4, %5, %6, %7 ve %8 oranlarında asphamin eklenerek oluşturulan modifiye bitümler, ile optimum sıcaklık ve katkı oranı belirlenmiştir. Deneyler sonrası ile 110°C de %8 asphamin oranı bulunmuş, 120°C de %7 asphamin oranı bulunmuş, 130°C için %6 asphamin oranı bulunmuş, 140°C için %6 asphamin oranı bulunmuş ve 150°C için ise %4 asphamin oranı bulunmuştur.

Oylumluoğlu (2012), IKA içerisinde geri dönüştürülmüş asfaltın kullanımı üzerine çalışma sağlamıştır. IKA içerisine katkı kimyasalları olarak deneylerinde %2 Rediset, %3 Sasobit® ve %0,25 Advera kullanmıştır. Geri dönüştürülmüş asfalt ile üretilen IKA'lar için Marshall stabilite ve dolaylı çekme deneyleri kullanmış ve çalışmasında IKA teknoloji ile geri dönüştürülmüş asfaltların tekrardan kullanılabileceğini değerlendirmiştir.

Kök vd. (2014) çalışmalarında, SBS ve Sasobit® katkı malzemeleri ile modifiye bitüm elde ederek reolojik ve fiziksel özellikleri üzerine çalışmalar yürütmüştür. SBS ve Sasobit® ayrı ayrı ve beraber katkı olarak kullanılmış ve bitüme uygulanan geleneksel deneyler yapılmıştır. Ayrıca RV ve DSR deneyleri uygulanmıştır. Yumuşama noktası deneylerine göre tek Sasobit® katkılı modifiye bitümün yumuşama noktası saf bitüme göre arttığı gözlemlenmiştir. Sasobit® katkı maddesi bitümün sıcaklık hassasiyetine

olumlu etki yaparken SBS ile beraber katkı maddesi olarak kullanıldığında kayda değer bir olumlu etki sağlamamıştır. Katkı maddeleri ayrı ayrı kullanıldığında tekerlek izi direncini olumlu olarak arttırmıştır. Saf bitümün %4'ü kadar Sasobit® katkılı modifiye bitümün tekerlek izi parametresinin, yine saf bitümün %4'ü kadar katkılı SBS'li modifiye bitümün tekerlek izi parametresinden daha iyi olduğu, ikisinin aynı anda kullanıldığı modifiye bitümde ise optimum seviyeye ulaşıldığı belirtilmiştir. Saf bitümden tüm modifiye bitümlere göre tekerlek izi parametresinin daha düşük olduğu görülmüştür. Sasobit® katkısı modifiye bitümün viskozitesini düşürürken, SBS katkısının modifiye bitümde oranı yükseldikçe viskoziteyi hızlı bir biçimde arttırdığı, birlikte kullanımlarında ise viskozitede lineer olarak artış olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca katkıları birlikte kullanılarak oluşturulan modifiye bitümde esneklik özelliklerini iyileştirirken yine karışım sıcaklığını da önemli ölçüde azalttığı görülmüştür.

Abdullah vd. (2014), çalışmalarında yolların üst yapı inşasında IKA teknolojisinin katkı maddeleri ile yapılan modifiye bitüm kullanımında meydana gelen avantajlar ve dezavantajlar üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarının sonuçlarında, IKA teknolojisinin tüm karışım gradasyonları ile uygulanabileceği ayrıca IKA teknolojilerinin hem yeni inşa edilecek üst yapılarda hem de mevcut üst yapılarının bakım onarımının yapımında kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. IKA teknolojilerinin sürdürülebilir üstyapı inşalarına önemli oranlarda katkılar sağlayacağı tespit edilmiştir.

Dokandari vd. (2014) yaptıkları çalışmada, IKA'ya katkı maddesi olarak Fischer – Tropsch parafin mumu ekleyerek modifiye bitüm elde etmiş ve organik katkı maddesinin bitümün yaşlanmasına etkilerini araştırmıştır. Katkı maddeli IKA modifiye bitümleri ve orijinal karışımları, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmıştır. Bu numunelere dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulanarak performansları analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda organik katkı maddeli IKA karışımların yaşlanmaya karşı BSK'dan daha üstün performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Köse (2015), IKA'nın üstyapı buzlanmasına karşı kullanılan NaCl'ye dayanımı üzerine çalışmıştır. Çalışmada %0,8, %1,6, %2,1, %6,5 ve %10,4 oranlarında NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Numunelerde Marshall deneyi uygulamış, akma ve stabilite değerlerini tespit etmiştir. Numuneler üzerinde ultra ses hız ölçümleri de yapmıştır, IKA'ların NaCl çözeltilerine karşı direncinin, BSK' dan daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Ge vd. (2017) çalışmalarında, IKA katkı maddesi olarak Sasobit® ve polifosforik asit (PPA) kullanmıştır. Saf bitüme %3 oranında Sasobit® katkı maddesi katılarak IKA elde edilmiş ve %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranlarında PPA ile modifiye bitümler oluşturulmuştur. Bitüme uygulanan geleneksel deney sonuçlarına göre oluşturulan Sasobit® ve PPA katkılı modifiye bitümlerin saf bitüme göre özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Modifiye bitümlerin penetrasyon değerleri azalırken, yumuşama noktası değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Düktilite değerinin istenilen seviyelerde olması için PPA oranının %1'den az olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Yine modifiye bitümün ılık karışımlarında performansının istenilen düzeyde olması için, PPA katkı maddesi oranının saf bitümün %1,5'ünü geçmemesi önerilmiştir. Yapılan farklı yaşlandırma deneylerinde, modifiye bitümün yüksek sıcaklıkta deformasyon direncinde ve yaşlanma direncinde iyileşmeler olduğu sonucuna varılmıştır. FTIR sonuçlarına göre katkı malzemesi olarak Sasobit® ve PPA birlikte kullanılabileceği belirlenmiştir.

Pamuk (2019) yaptığı çalışmada, sıkıştırma sıcaklığının IKA ve BSK'larla oluşturulan karışımlar üzerinde hacimsel, degradasyon, stabilite ve sıkıştırılabilirlik özellikleri açısından araştırmalar yaparak sonuçlarını incelemiştir. Bir test düzeneği oluşturarak Yoğunlaştırma/sıkıştırma eğrileri elde etmiştir. BSK ve Sasobit, Advera katkılı IKA numuneleri hazırlayarak, IKA'lar için 140°C ve 125°C, 110°C, 95°C sıcaklıklarda karışım yapmıştır. IKA katkı maddeleri ile oluşturulan modifiye bitümlü karışımların, BSK ile oluşturulan karışımların yerine kullanılabileceği performans verilerini tespit etmiştir. Ayrıca degradasyon oluşumunun IKA ve BSK karışımları için benzer olduğu sonucuna ulaşmıştır. Deneyler sonucunda ulaşılan sıkıştırma parametreleri, IKA ve BSK'nın sahada olan davranışları ile benzer olduğunu ortaya koymuştur. SPGC sıkıştırma eğrilerinden elde edilen parametrelerden aynı saha davranışı ilişkileri tespit edilememiştir.

Valdés-Vidal vd. (2020) çalışmalarında, IKA ve geri dönüştürülmüş asfaltın performans özelliklerinin incelemiştir. IKA ile geri dönüştürülmüş asfaltın mekanik özellikleri üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bitüme katkı maddesi olarak IKA'ya doğal zeolit eklemiştir. Çalışma doğal zeolit katkı maddesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını azalttığını belirlenerek, IKA'nın geri dönüştürülmüş asfalt ile kullanılmasında da daha iyi bir performans elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Cheraghian vd. (2020) çalışmasında, IKA'nın çevreselliği, ekonomikliği ve üretiminin faydalarını araştırmıştır. Çalışmasını yapılan diğer çalışmaların literatür taraması olarak gerçekleştirmiştir. Çalışmasının sonucunda IKA'nın çevresel, ekonomik ve üretim açısından BSK'ya göre faydaları olduğunu belirtmiştir. IKA'nın mekanik özelliklerinin ise BSK ile yakın performans gösterdiğini, enerjide tasarruf sağlamanın yanında emisyon gazlarında da azalma ortaya koyduğu sonucuna ulaşmıştır. Yine IKA teknolojisinin geri dönüştürülmüş asfaltla karıştırılarak kullanılmasının mümkün belirlenmiştir.

Zhao vd. (2021) çalışmasında, IKA'ya Imidazolin katarak modifiye bitüm elde etmiştir. IMDL oluşturmak üzere palmitik asit, tetraetilenpentamin, aseton ve ksilen gibi malzemeleri karıştırmıştır. IKA karışımına geleneksel bitüm deneylerini yapmıştır. Asfalt için kireçtaşı agregası kullanmıştır. Çalışmasının sonucunda, IMDL katkı malzemesi karışım sıcaklıklarını aşağıya çekerken, fiziksel özelliklerde kayda değer bir iyileşme ya da kötüleşme olmamıştır.

Gökarp (2021) çalışmasında, 50/70 bitüm kullanarak IKA ya katkı olarak Sasobit® maddesini karıştırmış ve elde ettiği modifiye bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerinin üzerine çeşitli deneyler yapmıştır. Çalışmasının sonucunda, oluşturduğu modifiye edilmiş bitümün parlama noktasında önemli bir değişiklik sağlamadığını ama diğer fiziksel özelliklerinde kayda değer değişiklikler sağladığı sonucuna varmıştır.

İbiş (2022) çalışmasında, saf bitüm, Sasobit katkılı IKA ve polimer modifiye bitümle oluşturulan gözenekli asfalt karışımlarının uygulanabilirliği üzerine tasarımlar yapmıştır. Yaptığı tasarımlarda parça kaybı, Marshall stabilitesi, indirekt çekme mukavemeti, permeabilite ve bitüm süzülme gibi bulduğu deney sonuçlarının şartname sınırları içinde olup olmadığını kontrol etmiştir. Saf bitüm ve Sasobit katkılı IKA ile hazırlanan karışımların gözenekli asfalt şartnamesindeki değerleri sağlamadığı fakat polimer modifiye bitümlü karışımların şartnameye sonuçlar verdiği tespit etmiştir.

2.2. Cecabase RT BIO10 Katkılı IKA Karışımlarla İlgili Çalışmalar

Vaitkus vd. (2009) yaptıkları çalışmada, 120°C'de 70/100 penetrasyonlu saf bitüme ağırlıkça %0,1 ila %0,6 oranlarında Cecabase RT BIO10 ekleyerek IKA karışımlar elde

etmişlerdir. BSK karışımlarıyla kıyasla IKA karışımların Marshall stabilite ve akma değerlerinin azaldığını, boşluk oranlarının ise arttığını belirtmişlerdir.

Doyle vd. (2013), havaalanı kaplamaları için tasarlanan 11 farklı katkı maddesinin kullanıldığı IKA karışımlarını araştırmışlardır. 67,8-23,9 performans sınıflı (PG) saf bitüm ile üretilen karşılaştırma numuneleri (BSK) için karışım sıcaklığı 160°C alınırken, katkı maddesi kullanılan karışımlarda (IKA) ise 130°C alınmıştır. Cecabase RT BIO10 katkı maddesi %0,4 oranında eklenmiştir. Cecabase katkılı IKA karışımların performans sınıfı 67-17.6 olarak bulunmuştur. TSR değerleri dolayısı ile çekme dayanımları bütün IKA karışımlarında BSK karışımlarından daha düşük olarak bulunmuştur. Hamburg tekerlek izi deney sonuçlarına göre ise IKA karışımların performanslarında önemli bir düşüş gözlenmiştir. Bu durumun ise potansiyel olarak nem duyarlılığında bir artışa işaret ettiğini belirtmişlerdir.

Capayova vd. (2017); Capayova vd. (2018) yaptıkları çalışmada 50/70 ve 35/50 penetrasyonlu bitümlere ağırlıkça %0,5 oranında Cecabase RT BIO10 katarak penetrasyon değeri ve yumuşama noktası üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Katkı maddesinin bitümün fiziksel özelliklerini etkilemediğini belirtmişlerdir. Katkı maddesinin 50/70 penetrasyonlu bitümün penetrasyonunu %3,92 artırdığını yumuşama noktası değerini ise %4,08 azalttığını belirtmişlerdir. 35/50 penetrasyonlu bitümün ise penetrasyon değerini %6,06 artırdığını, yumuşama noktası değerini %2,93 azalttığını ortaya koymuşlardır.

Stienss ve Szydlowski (2020), ağırlıkça %0,35 oranında Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin bitümün temel özellikleri, düşük sıcaklıklardaki çatlama özellikleri ve kırılma tokluğu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Karışım sıcaklığı 135°C, karışım süresi ise 5 dakika olarak seçilmiştir. Sonuç olarak katkı maddesinin bitümün penetrasyon değerini %14,11 artırdığı, yumuşama noktasını ise %2,8 azalttığı sonucuna ulaşmışlardır. Katkı maddesinin kırılma tokluğunu azalttığını belirtmişlerdir. Kırılma sırasındaki ve -20°C sıcaklıktaki gerilmelerin, saf 50/70 bağlayıcıyla üretilen referans karışımla karşılaştırıldığında çoğunlukla değişmediği sonucuna varmışlardır.

2.3. Cecabase RT Katkılı IKA Karışımlarla İlgili Çalışmalar

Gonzalez Leon vd. (2009), yaptıkları çalışmada Cecabase RT katkı maddesinin bitümün viskozitesini, reolojik özelliklerini ve performans sınıfını (PG) önemli derecede etkilemediğini belirtmişlerdir. Sıkıştırma sıcaklığının referans BSK numunelerine göre 60°C daha düşük olduğu numunelerde bile IKA numunelerindeki boşluk oranlarında önemsiz farklar olduğu görülmüştür. Tekerlek izi oluşumu açısından BSK ve IKA numuneler benzerlik göstermişlerdir. Cecabase RT katkısı karışımların işlenebilirliğini artırmıştır. Neme karşı duyarlılık açısından BSK ve IKA numuneler benzer sonuçlar göstermişlerdir.

Sheth (2010), Advera, Asphamin, Kumbo ve Cecabase RT katkı maddeleri kullanarak IKA karışımlardaki etkilerini araştırmıştır. 70-34 performans sınıflı saf bitüm ağırlıkça %0,4 Cecabase RT katkı maddesi ile modifiye edilmiştir. Bitüm sıcaklığı 149°C olarak sabit tutulmuş, IKA karışımlar için agregaların ısıtılma sıcaklığı 122 ila 125°C, karıştırma sıcaklığı 117 ve 123°C, sıkıştırma sıcaklığı ise 112 ve 123°C alınmıştır. Cecabase RT katkı maddesi kullanılarak üretilen IKA numunelerin boşluk oranı %21,05 artarken, indirekt çekme dayanımı %32,13 azalmıştır. Çalışmada ayrıca neme karşı duyarlılığı ölçmek için IKA karışımların çekme dayanımı oranı (TSR) değerleri ölçülmüştür. Genellikle standart olarak 0,70 ile 0,80 arasında bir minimum çekme mukavemeti oranı kullanılmaktadır (Sun, 2016). Referans BSK numunelerin TSR değeri 0,72, Cecabase RT ile modifiye edilen IKA numunelerin TSR değeri ise 0,49 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla Cecabase RT, IKA karışımların neme karşı duyarlılığını artırmıştır. Cecabase RT katkılı IKA numunelerin 37,8°C’de dinamik modülü değerleri referans BSK numunelerden daha yüksek bulunmuştur.

Arega vd. (2011), Cecabase RT ve Rediset katkı maddeleri kullanarak bitümü modifiye etmişlerdir. Her iki katkı maddesi içinde bitümün vizkozitesinin düştüğünü belirtmişlerdir. Kontrol BSK ve katkı maddeleriyle oluşturulan IKA numuneleri kısa süreli yaşlanmaya maruz bırakılmış ve sonuç olarak bağlayıcının sertliğinin, kontrol BSK numunelerine göre nispeten daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Punith vd. (2011), çalışmalarında Cecabase, Evotherm ve Rediset kullanarak ürettikleri IKA numunelerinin neme karşı duyarlılıklarını ve tekerlek izi dirençlerini

araştırmışlardır. Çalışmada iki farklı agrega grubu kullanılmıştır. Test sonuçları, agrega kaynağının, IKA katkısı ve nem içeriğinden bağımsız olarak indirekt çekme dayanımı ve tekerlek izi direncini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Ek olarak, nemli agregalar içeren köpürmeyen IKA karışımlarının indirekt çekme dayanımı ve tekerlek izi derinliği iyi bir performans göstermiştir. Farklı IKA katkı maddesi içeren karışımlar, kuru ve ıslak koşullar altında benzer tekerlek izi direnci sergilemiştir.

Xiao vd. (2012) Cecabase, Evotherm, Rediset ve Sasobit köpürmeyen IKA katkı maddeleri ile modifiye edilen asfalt bağlayıcılarda viskozite değerinin düşürülebildiğini ve dolayısıyla karışımın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını da düşürebildiğini göstermişlerdir. Köpürmeyen katkı maddeleri içeren yaşlandırılmamış ve RTFOT ile kısa süreli yaşlanmaya maruz bırakılan numunelerin tekerlek izi dirençlerinin arttığını belirtmişlerdir.

Oliveira vd. (2012) yaptıkları çalışmada, Cecabase RT katkı maddesinin IKA karışımlarda etkilerini araştırmışlardır. 50/70 penetrasyon sınıflı bitüme ağırlıkça %0,2 ila 0,5 yüzdelerinde katkı maddesi ekleyerek penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerini gözlemlemişlerdir. Penetrasyon değeri %0,3 katkı oranına kadar %8,47 artmış sonra değişmemiştir. Yumuşama noktası değeri katkı oranı arttıkça %2,89 azalmıştır. Bu nedenle çalışmanın geri kalan bölümünde katkı oranı %0,3 olarak seçilmiştir. IKA karışımların üretim sıcaklığı olarak 120, 130 ve 140°C alınmıştır. Sonuç olarak katkı maddesinin üretim sıcaklığı için 35°C düşüş sağladığını belirtmişlerdir. IKA karışımları tekerlek izi direnci açısından BSK referans numunelerine benzer veya biraz daha iyi performans göstermiştir. Kullanılan katkı maddesini etkisi ile meydana gelen sıcaklık azalmasının, çalışılan karışımların suya duyarlılığı üzerinde zararlı bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Goh vd. (2013), 58-34 performans sınıflı saf bitüme %0,2, 0,35 ve %0,5 oranlarında Cecabase RT ekleyerek 100, 115 ve 130°C sıcaklıklarda modifiye etmişlerdir. Cecabase RT içeriğindeki ve üretim sıcaklığındaki artışlar, asfalt karışımlarının dinamik modülü, yorulma ömrü, indirekt çekme mukavemeti ve çekme mukavemeti oranı üzerinde orta düzeyde etkiler göstermiştir. Ayrıca Cecabase RT içeriğindeki artışlar ve karıştırma/sıkıştırma sıcaklıklarındaki düşüşler IKA karışımlarının tekerlek izi direncini azaltmıştır.

Ouni vd. (2014) çalışmalarında, penetrasyonu 35/50 olan saf bitüme ağırlıkça %0,3 oranında Cecabase RT katkı maddesi ekleyerek IKA karışımlar üretmişlerdir. Kontrol numuneleri (BSK) için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları 160°C alınırken, IKA numuneleri için 110°C alınmıştır. IKA numunelerde penetrasyon sınıfı değişmezken, yumuşama noktası değeri % 0,38 azalmıştır. Yapılan tekerlek izi deneyinde 30.000 döngüden sonra, BSK için %4,23'lük bir tekerlek izi derinliği, IKA için ise %6,53 kaydedilmiştir.

IKa ile ilgili en büyük endişelerden biri, üretim sırasında nemin varlığı nedeniyle bozulmadır. Saha uygulamalarında daha düşük üretim sıcaklığı nedeniyle agregalarda bulunan nem sıyrılma dahil olmak üzere nemden kaynaklanan hasar potansiyelini artırabilmektedir. Bu nedenle Hasan vd. (2015) çalışmalarında, çoklu donma -çözülme döngülerinin nemli agregalar kullanarak hazırlanan IKA karışımlarının nem direnci ve duyarlılığı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nem duyarlılığı bir çekme dayanımı oranı (TSR) testi kullanılarak değerlendirilmiştir. TSR, bir veya çoklu donma - çözülme döngülerini tamamlayan ıslak (koşullu) numunelerin çekme dayanımının kuru (koşulsuz) numunelerin çekme dayanımına oranıdır. Çalışmalarında Advera, Sasobit, Cecabase RT gibi farklı katkı malzemeleri kullanarak IKA numunelerini üretmişlerdir. Cecabase RT bitüme ağırlıkça %0,20, %0,35 ve %0,50 oranlarında katılmıştır. Karışım sıcaklıkları 100°C, 115°C ve 130°C olarak alınmıştır. Cecabase RT katkı maddesinin IKA örnekleri için ilk donma -çözülme döngüsünden sonra indirekt çekme dayanımlarını büyük ölçüde azalttıklarını ortaya koymuşlardır. Katkı oranı ile birlikte üretim sıcaklığı arttıkça karışımların çekme dayanımları azalmıştır.

Syed vd. (2019) yaptıkları çalışmada, çeşitli IKA katkı maddeleri ile modifiye edilmiş kaplamaların tekerlek izi direncini değerlendirmişlerdir. Tüm karışımlar New Mexico'daki uzun süreli kaplama performansı (LTPP) SPS-10 kaplama test bölümlerinden toplanmıştır. LTPP test bölümleri referans BSK kaplama, Terex katkılı kaplama, Evotherm katkılı kaplama, Cecabase katkılı kaplama ve polimerize Cecabase katkılı kaplama olmak üzere 5 bölümden oluşturulmuştur. Farklı reolojik tekerlek izi parametreleri ile Hamburg Tekerlek İzi Cihazı (HWTD) sonuçları arasındaki korelasyon araştırılmıştır. Sonuç olarak Cecabase katkısı ve polimer modifikasyonu ile birleştirilen karışımın tekerlek izi direncinde önemli bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Bairgi ve Tarefder (2021), New Mexico’da çeşitli IKA katkıları kullanılarak oluşturulan uzun süreli kaplama performansı (LTPP) SPS-10 test bölümleri üzerine araştırmalar yapmışlardır. Tekerlek izi, nem hasarı, çatlama, uluslararası pürüzlülük indeksi (IRI) ve kaplama durum değerlendirmesi (PCR) gibi saha performansları, lazer tabanlı bir bozulma değerlendirme teknolojisi olan Mandli kaplama profili tarayıcısına göre değerlendirilmiştir. Çalışmada, Cecabase ve diğer IKA katkı maddelerinden oluşan bölümlerde BSK 'ya kıyasla biraz daha yüksek tekerlek izi meydana geldiği ancak bu bölümlerin daha iyi bir çatlama performansı sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. IKA karışımlarından oluşan kaplama bölümlerin genel durumları, IRI ve PCR değerleri esas alınarak normal yani BSK ile eşdeğer bulunmuştur.

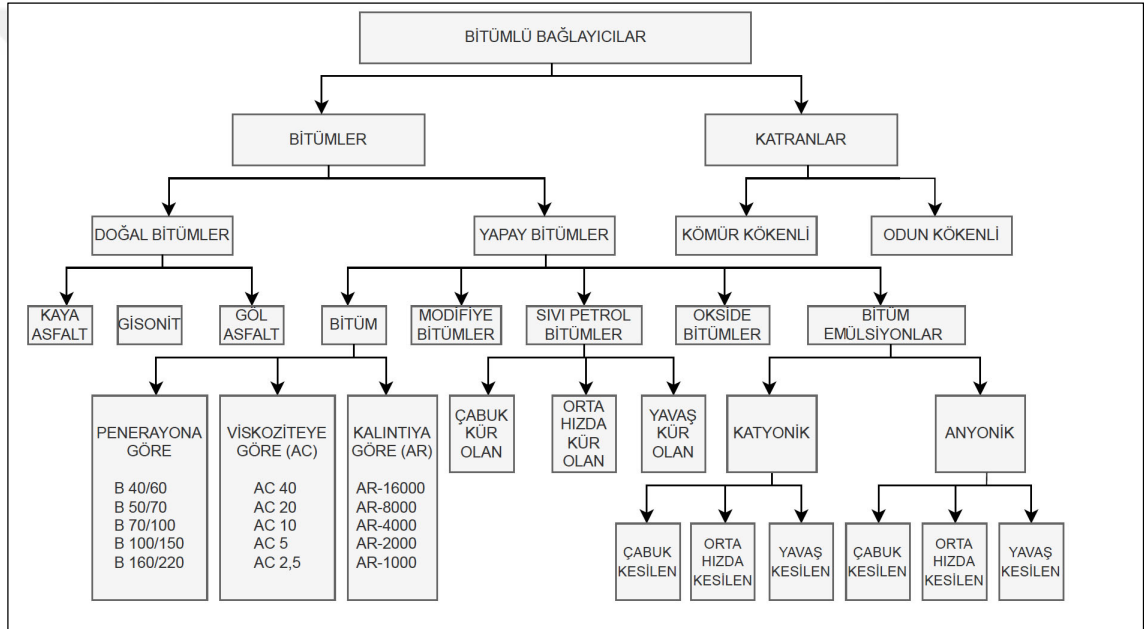
Anand vd. (2023) saf bitüme ağırlıkça %0,2, %0,3, %0,4 ve %0,5 oranlarında Cecabase ilave ederek 100°C’de sıkıştırmışlardır. Karışımın optimum bitüm içeriğini belirlemek için Marshall karışım tasarımı da yapılmıştır. IKA numunelerin BSK kontrol numuneler kadar iyi veya daha iyi performans gösterdiklerini belirtmişlerdir. Artan sıkıştırılabilirlik ve azalan bitüm yaşlanması nedeniyle kaplama performansının arttığını işaret etmişlerdir.

Yapılan literatür araştırmalarında, katkı maddeleri ile hazırlanan IKA modifiye bitümlerin katkı maddesine ve oranına, farklı bitümlü bağlayıcı ve agrega türüne, kullanılan malzemeler ve teçhizatlara, kullanılan yöntemlere, standartlara uygun çalışmaların yapılıp yapılmadığına, sıcaklık farklarına ve farklı çalışma koşullarına göre karışımlardaki modifiye bitümün reolojik, fiziksel ve karışımların mekanik özelliklerinin BSK’lara göre gösterdiği performans sonuçlarına ulaşılmıştır.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Bitümlü Bağlayıcılar

Bitümlü bağlayıcılar iki başlık altında incelenmekte olup bunlardan birincisi bitümler ikincisi ise katranlardır. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılmasına ilişkin akış diyagramı Şekil 3.1’de sunulmuştur. Bu bağlayıcılar sıvı, yarı katı ve katı hallerde bulunabilirken, yarı katı ve katı haldekiler ısıtılarak sıvı hale getirilebilmektedir. Katı hale geçen sıvı haldeki bitümlü bağlayıcılar adezyon ve kohezyon gibi özellikleri sayesinde yapışkanlık göstermektedirler.

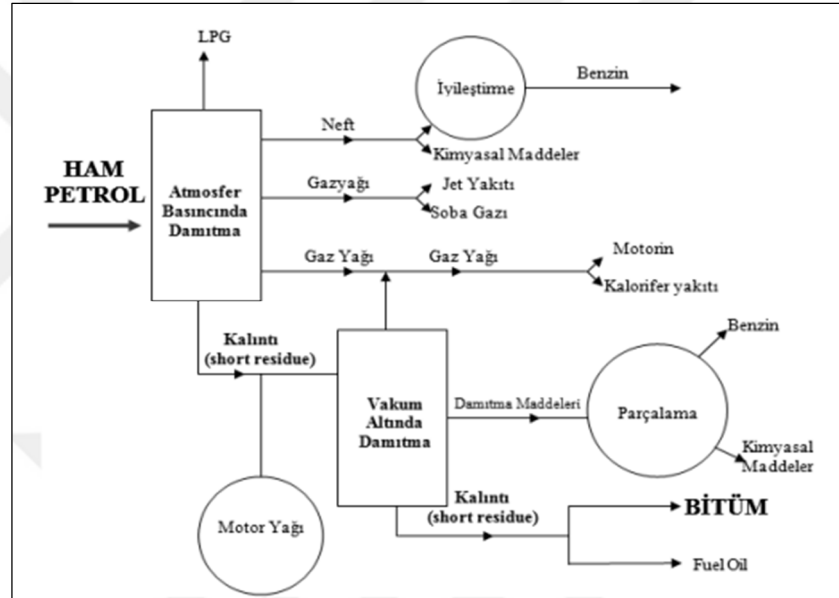


Şekil 3.1. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması (Yüknü vd., 2021)

Bitüm doğrudan elde edilebildiği gibi petrol rafinerilerinde damıtma yöntemi ile elde edilebilir. Bitüm hidrokarbonlu, yapışkan ve su geçirimsiz bir mamuldür. Bitümlü bağlayıcılara uygulanan bazı deneyler aşağıda verilmiştir (Yüknü vd., 2021).

- Bitümlü bağlayıcılar- numune alma (TS EN 58)
- Penetrasyon deneyi (TS EN 1426)
- Yumuşama noktası tayini deneyi (TS EN 1427)
- Fraass kırılma noktası tayini deneyi (TS EN 12593)
- Dönmeli ince film etüvü deneyi (RTFOT) (TS EN 12607-1)

- İnce film halinde ısıtma kaybı deneyi (TS EN 12607-2)
- Çözünürlük tayini deneyi (TS EN 12592)
- Parafin mumu içeriği tayini deneyi
- Cleveland açık kap metodu (TS EN ISO 2592)
- Pensky-Martens kapalı kap yöntemi ile parlama noktası tayini
- Tag kapalı kap cihazı ile parlama noktası deneyi (TS 1171)
- Bitümün leke bırakma eğiliminin tayini 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 3.2. Ham petrolden bitüm elde edilmesi (Lav ve Lav, 2004)

3.2. Sıcak Karışım Asfalt (BSK)

Esnek kaplama olarak tasarlanan karayolu üstyapısı, düşük trafik yoğunluklu yollarda sathi kaplama, yüksek trafik yoğunluklu yollarda, yüksek standartlı karayollarında, otoyollarda ve havaalanı gibi yerlerde ise sıcak karışım asfalt kaplama olarak tasarlanır. İklim şartlarına göre belirlenmiş penetrasyon dereceli bitüm ve iri, ince daneli agrega ve filler malzemeler plant tesislerinde 150-180°C'de karıştırılarak oluşturulan bitümlü sıcak karışım esnek üstyapı yol kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. (Tunç, 2002). Tasarlanan esnek üst yapıları düzgün bir yuvarlama yüzeyine sahip olmalı ve yükleri alt

tabakalara aktarmalıdır. Bitümlü sıcak karışımlar yüksek kalitede imal edilip aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir.

- Stabilité
- Durabilite
- Rijitlik
- Dayanıklılık
- Yorulma karşı direnç
- Esneklik
- Geçirimsizlik
- Kayma karşı direnç
- İşlenebilirlik (Tunç, 2022)

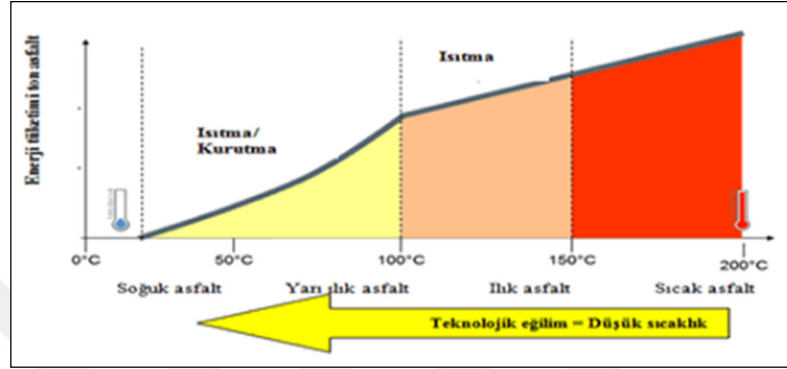
3.3. Modifiye Bitüm

Saf bitümün içerisine çeşitli katkı maddeleri katılarak üst yapı performansının geliştirilmesi için modifiye edilmesi ile modifiye bitümler oluşturulur. 1960'lı yıllarda Avrupa'da, 1970'li yıllarda ise Amerika'da üzerinde çalışarak geliştirilmiştir. Saf bitüm modifiye edilerek reoloji, elastikiyet, kohezyon, adezyon, yaşlanma ve dayanıklılık, ısı duyarlılığı, kimyasal uyum ve stabilite özellikleri değiştirilmektedir. Oluşturulan modifiye bitümlerin avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Yüknü vd., 2021).

- Sıcaklık değişimlerinde modifiye bitümün duyarlılığın azaltılması.
- Sıcaklığın neden olduğu deformasyonun azalması.
- Yaşlanma faktörüne direnç seviyesinin yükselmesi.
- Daha mukavemetli karışımlar elde edilmesi.
- Karışım içerisinde bitüm ile agreganın oksidasyona karşı daha mukavemetli olması.
- Çatlak oluşmamasının sağlanması.
- Sıcaklık düşüşlerinde termal çatlakların azaltılması ve esneklik özelliğinin kaybolmaması.
- Tekerlek izine karşı dayanımın artırılarak deformasyonların azaltılması.

3.4. Ilık Karışım Asfalt (IKA)

Sıcak karışım asfalta göre 20-40°C daha düşük sıcaklıkta elde edilen asfalt karışımlara Ilık karışım asfalt (IKA) denir. IKA'nın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının daha düşük sıcaklıkta yapılması belirli avantajlar sağlamaktadır (Carmen Rubio vd., 2012).



Şekil 3.3. Sıcaklık-enerji tüketimi ve tekniklerinin sınıflandırılması (ASMÜD, 2023)

Sıcak karışım asfalt (BSK) 150- 180 °C sıcaklık aralığında karıştırırken, ılık karışım asfalt 100-150 °C sıcaklık aralığında karıştırılmaktadır. 70-100°C sıcaklık aralığındaki asfalt karışımları da yarı ılık asfalt karışımları, daha düşük sıcaklıklardaki karışımlar ise soğuk asfalt olarak adlandırılmaktadır (ASMÜD, 2023).

3.4.1. Ilık karışım asfalt üretim teknolojileri

Düşük sıcaklıkta bitümlü bağlayıcının vizkozitesini düşürerek agreganın bitümle kaplanması ve karışımın sıkıştırılabilirliğini sağlamak gerekmektedir. Bunun için geliştirilmiş çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan en çok tercih edilen üç tanesi aşağıda açıklanmıştır (ASMÜD, 2023).

3.4.1.1. Organik katkılar

Organik maddeler katılarak 100- 150°C arasında bitümlü bağlayıcının viskozitesi düşürülmektedir. Bitümlü bağlayıcılara vaks veya yağ amidleri gibi belirli oranlarda organik katkılar karıştırılmaktadır. Ayrıca organik katkılar bitümün kalıcı deformasyona karşı direncini iyi yönde artırmaktadır.

3.4.1.2. Kimyasal katkıları

Bitümlü bağlayıcıya katılan kimyasal katkıları karıştırma sıcaklığını 20-40°C azaltarak yine düşük sıcaklıkta uygulanabilirliğini sağlamaktadır. Bu kimyasal maddelerin içeriği yüzey aktif madde olup bitümlü bağlayıcının viskozitesini değıştirmez. Bitüm ile agrega arasında yüzündeki sürtünme kuvvetlerini azaltmaktadırlar.

3.4.1.3. Köpüklendirme teknikleri

Köpüklendirme teknikleri de bitümlü bağlayıcıların viskozitesini azaltarak karıştırma sıcaklığını 20-40°C aşağı çekmektedir. Farklı köpüklendirme teknikleri bulunmaktadır. Bunlar su ile doğrudan köpüklendirme ve katkıları köpüklendirme gibi tekniklerdir. Bitümün hacminin geçici olarak artırılarak köpük haline gelmesi ve agregaları kaplamasıdır. Daha sonra bitüm içinde kalan buharı sıkıştırma işleminde bitümün viskozitesini azaltarak sıkıştırma işlemini kolaylaştırmaktadır.

3.4.2. İlk karışım asfaltın faydaları

Düşük sıcaklıkta üretilen İKA'ların çeşitli faydaları bulunmaktadır. En önemli faydaları enerji tasarrufu ve düşük emisyon değeri leridir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

3.4.2.1. Üretimdeki faydaları

Üretiminde sıcaklığın 20-40°C düşük olması sebebi ile enerji tasarrufu sağlamaktadır. Yine düşük sıcaklıkta karıştırılması bitümlü bağlayıcının daha az yaşlanması, bu da karışımın daha yüksek performans göstermesini sağlamaktadır. Düşük sıcaklıkta üretilen bu karışımın emisyon değeri de daha azdır. Düşük sıcaklıkta üretilmesi sayesinde üretim donanımlarında da daha az termal yorulma oluşturmaktadır. Ayrıca İKA teknikleri asfaltın geri kazanımına da uygundur.

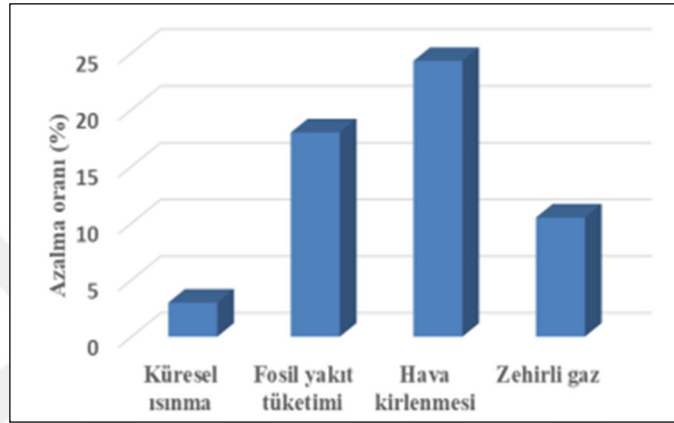
3.4.2.2. Uygulama işlemlerindeki faydaları

İKA, BSK'ya göre daha işlenebilir oluşundan dolayı daha kolay sıkıştırılır. İnşa süreleri daha uzun olduğundan daha rahat çalışma süresi tanır. Ayrıca daha soğuk havalarda serim

ve sıkıştırılma işlemi de yapılabilmekte yapım sezonunu da uzatmaktadır. IKA ile oluşturulan esnek üstyapılar daha kısa sürede trafiğe açılabilir.

3.4.2.3. Sağlık güvenlik ve çevresel faydaları

Asfalt üretiminde emisyonların sebebi, egzoz buharı, duman, toz ve diğer kirlenmelerin dışarı salıncıladığı gazlar, karıştırıcılar ve sıcak karışım bölümleridir (Sutton, 2003).



Şekil 3.4. IKA'nın BSK'ya göre çevreye katkısı (Hassan, 2010)

Üretimi sırasında enerji azaldığından, enerji elde etmek için kullanılan yakıt da azalmaktadır. Yakıt azaldığı için üretim tesislerinde oluşan emisyon miktarı da azalmaktadır. IKA'ların üretilmesi ve uygulanması daha düşük sıcaklıklarda olması nedeni ile duman ve koku emisyonu aşağı seviyelere çekilmekte olup, işçileri için daha temiz bir çalışma ortamı oluşmaktadır.

3.4.3. İlk karışım asfaltın performansı

Laboratuvar sonuçları ve arazide elde edilen performans değerlerine göre; IKA karışımlarının, BSK'nın performansına eşdeğer ve hatta daha yüksek performans sağladığı kanıtlanmıştır. IKA'nın daha az enerji kullanarak üretilmesi ve daha az emisyon çıkarması, nakliye mesafesinin daha uzun olması, binder tabakasında yaşlanma süresini uzatması, oksidasyon sertleşmesini önlemesinden ötürü çatlakların oluşumunu azaltması ve inşa edilen esnek üstyapının trafiğe daha erken açılması gibi performans avantajları vardır (Hurley ve Prowell, 2006b).

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1. Materyal

Çalışmada ARKEMA grup firmasından temin edilen Cecabase RT BIO10 katkı maddesi kullanılmıştır. Agregası olarak, Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü 164. Şube Müdürlüğü'nden temin edilen kalker esaslı kırmataş agregası kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır.

4.1.1. Bitüm

Çalışmada kullanılan 50/70 saf bitümün özellikleri geleneksel yöntemlerle belirlenerek modifiye bitümle karşılaştırılabilmesi amacıyla Tablo 4.1'de sunulmuştur. Penetrasyon derecesi yükseldikçe bitümün yumuşaklığında da artış olur.

Tablo 4.1. B 50/70 penetrasyonlu saf bitümün özellikleri

Yapılan Testler	Birim	B 50/70		
		Test Standardı	Limitler	Ölçülen Değerler
Penetrasyon	0,1 mm	TS EN 1426	50-70	67,19
Yumuşama Noktası	°C	TS EN 1427	46-54	51,55
Parlama Noktası	°C	TS EN 22719	min 230	260
Özgül Ağırlık	g/cm ³	TS 1087	1,0-1,1	1,02

4.1.2. Agregası ve Filler

Bu tez çalışmasında, Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü 164. Şube Müdürlüğü'nden temin edilen kalker esaslı kırmataş agregası kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre bu çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 4.2.'de verilmektedir.

Tablo 4.2. Agregada fiziksel özellikleri

Deneyler	Kaba Agregada	İnce Agregada	Filler
Hacim Özgöl Ağırlık (g / cm ³)	2,676	2,485	-
Zahiri Özgöl Ağırlık (g / cm ³)	2,696	2,561	2,706
Su Emme (%)	0,281	1,202	-

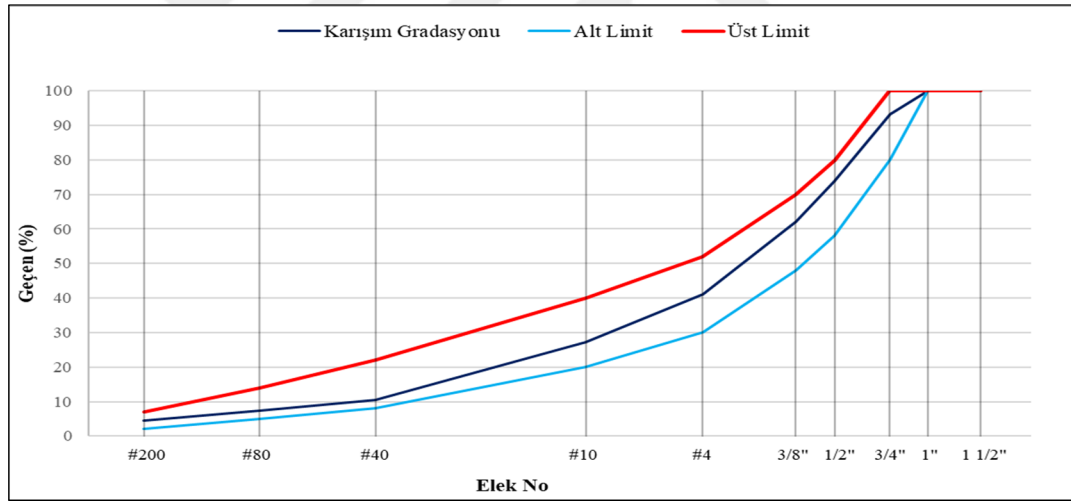


Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan agregalar

Karışımlarda kullanılacak agregalar elek analizine tabi tutularak bütün eleklerden ayrı ayrı elendikten sonra aşağıda Tablo 4.3 ve Şekil 4.2’de verilen gradasyon elde edilmiştir.

Tablo 4.3. Agregaların elek analizi

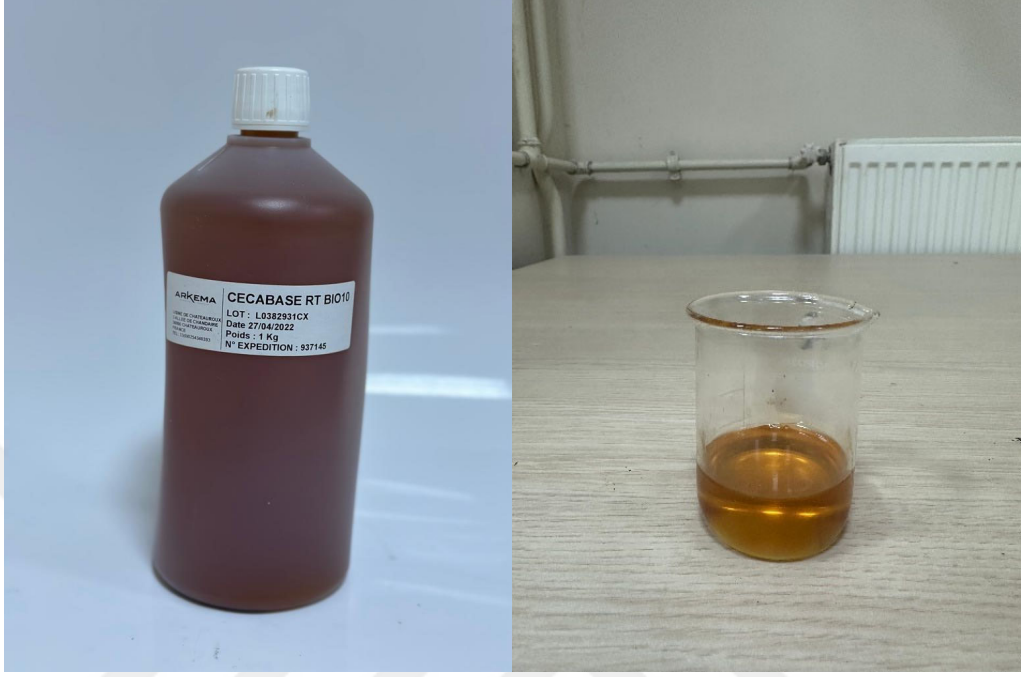
Elek Açıklığı		Geçen %	Binder Şartname Limitleri	
mm	inch			
37,50	1 1/2"	100	100	100
25,40	1"	100	100	100
19,10	3/4"	93	80	100
12,70	1/2"	73,9	58	80
9,52	3/8"	62,2	48	70
4,76	No.4	41,2	30	52
2,00	No.10	27,3	20	40
0,42	No.40	10,5	8	22
0,177	No.80	7,4	5	14
0,075	No.200	4,6	2	7

**Şekil 4.2.** Gradasyon eğrisi

4.1.3. Cecabase RT BIO10

Cecabase RT BIO10, ARKEMA grup firmasından temin edilen Fransa'da geliştirilmiş IKA teknolojilerinde kullanılan kimyasal bir katkı maddesidir. 25°C'de sıvı haldedir (Şekil 4.3). Cecabase RT BIO10 içeriğindeki yüzey aktif maddeler, agrega ile bitüm arasındaki yüzey gerilimini düşürerek, bitümlü sıcak karışım sıcaklığını 30°C seviyelerinde aşağıya çektiği bilinmektedir. Modifiye bitüm hazırlanırken Cecabase RT

BIO10 miktarının saf bitümün %0,3-0,5 oranında kullanılması önerilmektedir (ARKEMA, 2023).



Şekil 4.3. Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin görünümü

4.2. Yöntem

Bu bölümde, karışımlarda kullanılan 50/70 saf bitüm ve Cecabase RT BIO10 katkı maddesi ile modifiye edilmiş bitümün özelliklerini belirlemek için uygulanan deney ve yöntemler tanımlanmıştır.

Modifiye bağlayıcılar elde etmek için Cecabase RT BIO10 katkı maddesi farklı oranlarda bitüme ilave edilerek farklı sıcaklık, hız ve sürelerde High Shear Mixer'de karıştırılmıştır. Modifiye bitümün fiziksel ve mekanik özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve RTFOT testleri ile belirlenmiştir. Ayrıca elastik geri dönme (TS EN 13398) deneyleri de bitümün yorulma dayanımı belirlemek için yapılmıştır. Katkı maddesinin bitümün performans özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar ile Marshall tasarım yöntemi kullanılarak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Deney planındaki numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma testleri uygulanmıştır.

Çalışmada zamanın ve ekonominin doğru şekilde kullanılması, deneysel süreçlerin optimize edilmesi ve ürün kalitesinin artırılması için Taguchi deneysel tasarım yöntemi uygulanmıştır.

4.2.1. Taguchi Metodu

Birden fazla parametrenin bir arada kullanıldığı çalışmalar ve optimum parametreleri belirlemek için birçok deneyin yapılması, zamanın doğru kullanılması ve ekonomi açısından olumsuz etkilere sahiptir. Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi, zamanın ve ekonominin doğru şekilde kullanılmasına, deneysel süreçlerin optimize edilmesine ve ürün kalitesinin artırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu deneysel tasarım yöntemi, ürün veya süreçlerde değişiklik yapan parametrelerin değişkenliğini ortadan kaldırmaya veya en aza indirmeye çalışır (Mercan, 2019). Taguchi yöntemlerinin kullanılması, yüksek kaliteli ürünlere, düşük maliyete ve kârlılığa ulaşmanın öncelikli hedef olduğu fikriyle Taguchi kulübünü doğurmuştur (Aman vd., 2023). Taguchi yöntemi mühendislik problemlerinde başarıyla kullanılmaya devam etmektedir (Mola vd., 2021; Baş vd., 2022; Karn vd., 2023; Rajkumar vd., 2023; Naik vd., 2023; Koh vd., 2023). Performans ve kaliteye ilişkin tasarımların optimize edilmesine yönelik etkili ve sistematik bir yaklaşım sağlamaktadır.

Taguchi yöntemi, optimizasyon kriteri olarak performans istatistiklerini (S/N) kullanır. Üç tür performans istatistiği vardır: en büyük – en iyi, nominal – en iyi ve en küçük – en iyi. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak S/N değerleri, en büyük – en iyi ve en küçük – en iyi istatistiklerine bağlı olarak aşağıda verilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{En büyük – en iyi} \quad S/N_L = -10\text{Log} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \quad (4.1)$$

$$\text{En küçük – en iyi} \quad S/N_L = -10\text{Log} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \quad (4.2)$$

Formülasyondaki S/N_L performans istatistiğini, n deney kombinasyonundaki tekrar sayısını, Y_i değeri ise i . deneyin performans istatistiğini göstermektedir.

Bu çalışmada deney planı Taguchi yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Performans istatistikleri kullanılarak tahminler %95 güven seviyesinde yapılmıştır. Taguchi optimizasyonunda kullanılan parametreler ve seviyeler Tablo 4.4'de sunulmuştur. Deney planını oluşturan L16 ortogonal dizisi ise Tablo 4.5' de verilmiştir.

Tablo 4.4. Deney parametreleri ve seviyeleri

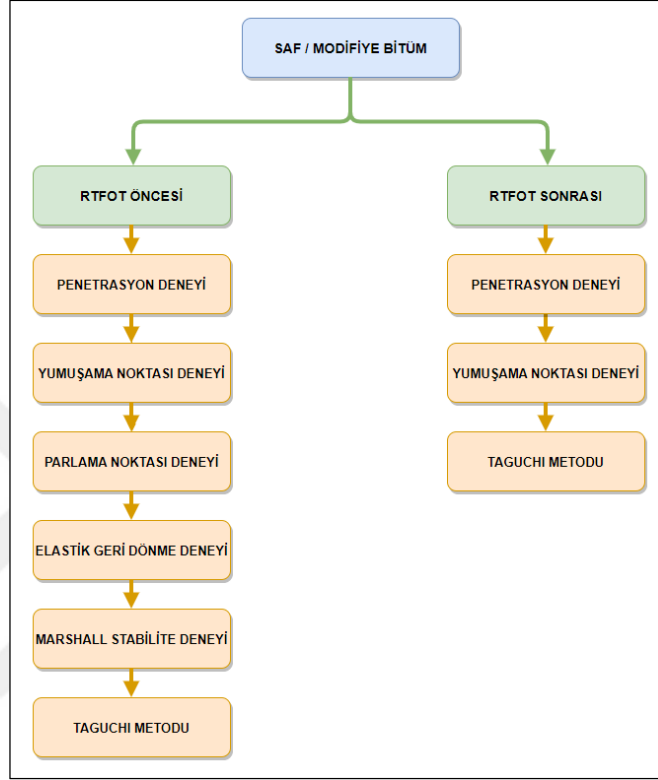
Parametre	Seviye			
	1	2	3	4
(A) Cecabase RT BIO10 (%)	0,00 (A1)	0,30 (A2)	0,40 (A3)	0,50 (A4)
(B) Sıcaklık (°C)	110 (B1)	120 (B2)	130 (B3)	140 (B4)
(C) Süre (dakika)	15 (C1)	20 (C2)	25 (C3)	30 (C4)
(D) Hız (RPM)	1000 (D1)	2000 (D2)	3000 (D3)	4000 (D4)

Tablo 4.5. Deney planı

Deney No	Cecabase RT BIO10 (%)	Sıcaklık (°C)	Süre (dak.)	Hız (RPM)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

4.2.2. Modifiye Bitüme Uygulanan Deneyler

Saf bitüme ve modifiye bitüme uygulanan deneyler Şekil 4.4'teki akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Bitüme uygulanan deneylerin akış şeması

4.2.3. Modifiye bitümün karıştırılması

Fransız ARKEMA firmasından tedarik edilen Cecabase RT BIO10 katkı malzemesi ile 50/70 penetrasyonlu bitüm ılık karışım asfalt hazırlanmak için kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Kendinden ısıtıcılı High Shear Mikser

Bitümler 25°C sıcaklıkta katı olarak çıkarılmış ve ağırlıkları ölçülmüştür. Tablo 4.3’de verilen oranlarda bitüm ağırlığına göre Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin ağırlıkları tespit edilmiştir. Ağırlığı belirlenen bitüm High Shear Mikser (Şekil 4.8) içerisine yerleştirilip, karıştırma sıcaklıklarına getirilmiş ve katkı maddeleri eklenerek belirlenen sürelerde yine numunenin parametrelerine göre 1000 devir/dakika, 2000 devir/dakika, 3000 devir/dakika ve 4000 devir/dakika hızlarında karıştırılmıştır. Tablo 4.4’de belirtilen 16 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Karışımı tamamlanan numuneler mikserden alınarak deneyler için ayrılmış ve etiketlenmiştir. Katkı maddesi ile oluşturulan IKA karışımlarına penetrasyon deneyi, parlama noktası deneyi, yumuşama noktası deneyi, elastik geri dönme deneyi ve RTFOT deneyleri yapılmıştır. RTFOT ile yaşlandırma uygulanmış numunelere tekrar yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri uygulanmıştır. Yine Marshall deneyi ve diğer deneyler için numuneler ayrılarak yedekler alınmıştır.



Şekil 4.6. Karışım sonrası hazırlanmış bitüm numuneleri

4.2.4. Penetrasyon testi

Penetrasyon deneyi TS EN 1426 ve ASTM D5 standartlarına göre yapılmıştır. Bitümün kıvamını bulmak için penetrasyon deney iğnesi, 100 gram sabit yük altında belirlenen sürede 25°C sıcaklıkta düşey olarak serbest bırakılır. Peneometre cihazına yerleştirilen iğne cihazda bulunan vida ile sıkılarak sabit kalması sağlanır. Akabinde 60 dakika süreyle 25°C sıcaklıkta su banyosunda bekletilen numune su banyosundan taşıma kabıyla alınır. Numune bir miktar 25°C sıcaklıkta su ile taşınarak numunenin sıcaklığının değişmesi engellenir. Penetrometre cihazının içine penetrasyon deney kabı yerleştirilir. Cihaza bağlanan penetrasyon iğnesi numunenin yüzeyine sıfır olarak ayarlanır ve cihaz sıfırlanır. 5 saniye süre ile serbest bırakılan iğne numuneye üç noktadan aralarında ortalama 10 mm olacak uzaklık olacak şekilde düşey doğrultuda iğne batırılır. Her batırma sonrası iğne çözücü ile temizlenerek deney tekrarlanır. Üç ayrı batma sonucu okunan değerlerin birbirine yakın olması ve ortalamasının alınması ile penetrasyon değeri belirlenir. Her 0,1mm'lik batma 1 penetrasyon değerine denk gelmektedir. Penetrasyon değeri yükseldikçe bitüm yumuşar ve daha akışkan hale gelir. Bitümler penetrasyon değerlerine göre sınıflandırılmakta ve iklim şartlarına göre kullanılmaktadır. Penetrasyon deneyleri numunelere RTFOT öncesi ve sonrası yapılmıştır.



Şekil 4.7. Penetrasyon deney cihazı

4.2.5. Yumuşama noktası testi

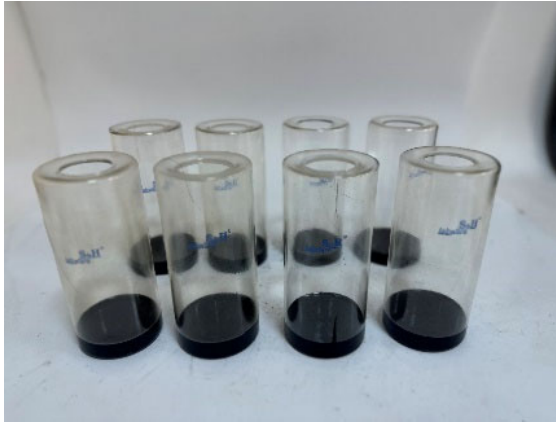
Yumuşama noktası deneyi TS EN 1427 ve ASTM D36 standartlarına göre yapılmıştır. Bitümün standart bir yük altında katıdan işlenebilir bir akışkanlığa geçtiği sıcaklığı bulmaktır. Isıtılarak hazırlanan akıcı kıvamdaki numuneler 2 adet pirinç halkanın ortasına doldurulur. Pirinç halkalar belirli bir süre soğuması için oda sıcaklığında cam sehpa üzerinde bekletilir ve su banyosuna bırakılır. Su banyosu 3 dakika boyunca 5°C'de sabit tutulur ve daha sonra dakikada 5°C sıcaklık arttırılacak şekilde kontrollü olarak ısı verilir. Yumuşama deney setinde bulunan 3,5 gram ağırlığındaki çelik bilyeler pirinç halka içerisindeki bulunan bitümün üstüne yerleştirilir. Bu bilyelerin ve sıcaklığın etkisi ile bitümde yumuşama gerçekleşir. Bilye pirinç halkanın içerisinden geçerek deney setinin tabanına temas eder. Temasın gerçekleştiği zaman cihazın ekranında gözükten sıcaklık değeri yumuşama noktası olarak okunur. İki adet pirinç yüzük içindeki bitüm numuneleri üzerindeki 3,5 gram bilyelerin 25 mm mesafede bitümle kaplı olarak düşecek kadar yumuşadığı sıcaklık noktası değerlerinin ortalaması olarak bulunur. Yumuşama noktası sıcaklık değeri yükseldikçe bitüm daha yumuşak ve daha az viskoz hale gelir.



Şekil 4.8. Yumuşama noktası deney cihazı

4.2.6. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) testi

Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi (RTFOT) TS EN 12607-1 standardına uygun yapılmıştır. Modifiye edilmiş IKA, RFFOT deneyi ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcıların kütle kaybını ve fiziksel özelliklerinin bulunması için RTFOT Deneyi yapılır. Laboratuvarı RTFOT deneyi ile karıştırma esnasında bitümlü bağlayıcılarda ortaya çıkan yaşlanma simüle edilmektedir. Deney sonucu kütlede oluşan azalma ya da penetrasyon, yumuşama noktası ya da dinamik viskozite gibi özelliklerindeki değişikliklere göre hava ve sıcaklığın etkileri belirlenir.



(a) İçerisine bitüm doldurulmuş deney şişeleri



(b) RTFOT cihazı

Şekil 4.9. RTFOT (Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deney) Cihazı

Etüv içerisinde dönel tablada bulunan sekiz adet numune bölümüne yerleştirmek üzere 8 adet boş cam şişe temizlenerek hazırlanır. Şişeler boş iken ağırlıkları tek tek tartılır ve not alınır. Isıtılarak hazırlanan akıcı kıvamdaki IKA numuneleri sekiz tane cam şişenin içlerine 35 gram olarak doldurulur. Dolum işlemi sonrasında cam şişeler dönel tablaya yerleştirilir. 163 ± 0.5 °C’de sıcaklıkta daire çizerek 15 devir/dakika hızla numunelerin yerleştirildiği tabla döner. Deney 85 dakika süre ile devam eder. Bu dönüş sırasında şişelere $4\pm0,2$ l/dk değerinde kompresör ile basınçlı hava püskürtülür. Tüm şişelerin iç yüzeylerinde deney süresince 1,25 mm. kalınlığında film halinde hareket etmektedir. 85 dakika sonra RTFOT etüvünden çıkarılan sekiz adet numune dolu şişe soğutulur ve son ağırlıkları ölçülerek not alınır. Altı adet numune dolu şişe bitümün yaşlandırma sonrası fiziksel özelliklerini bulmak için yapılacak deneylerde kullanılmak üzere ayrılır geriye kalan iki adet numune dolu şişe ise 60 dakika soğutulduktan sonra kütle kaybını bulmak üzere kullanılır. Sıcaklığın etkisi ince bir film tabakası halini alan bitüm şişelerin iç yüzeyini tam olarak kaplamakta ve yaşlanmanın ortaya çıkarmaktadır. Bu deney ısı, hava ve sürekli hareket etme sayesinde şişelerin iç yüzeyinde bir katman oluşumunu engellemekte ve bitümü korumaktadır.

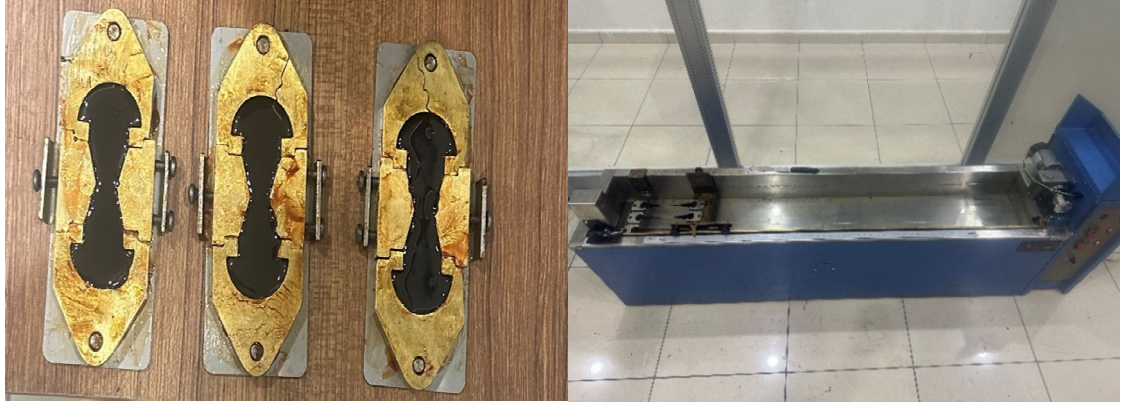


Şekil 4.10. RTFOT sonrası kütle kaybını bulmak için ayrılan iki adet numune şişesi

4.2.7. Elastik geri dönme testi

Elastik geri dönme testi TS EN 13398 standardına göre bitümün yorulma dayanımı belirleme açısından uygulanmıştır. Test yapılmaya başlamadan önce kalıplar kalıp ayırıcı

yağ ile yağlanır. Yeterince akışkan olana kadar ısıtılan bitüm pirinçten yapılmış $10,0 \pm 0,1$ mm kalınlığında kalıplara doldurulur. 60 dakika 25°C de oda sıcaklığında bekletilir.

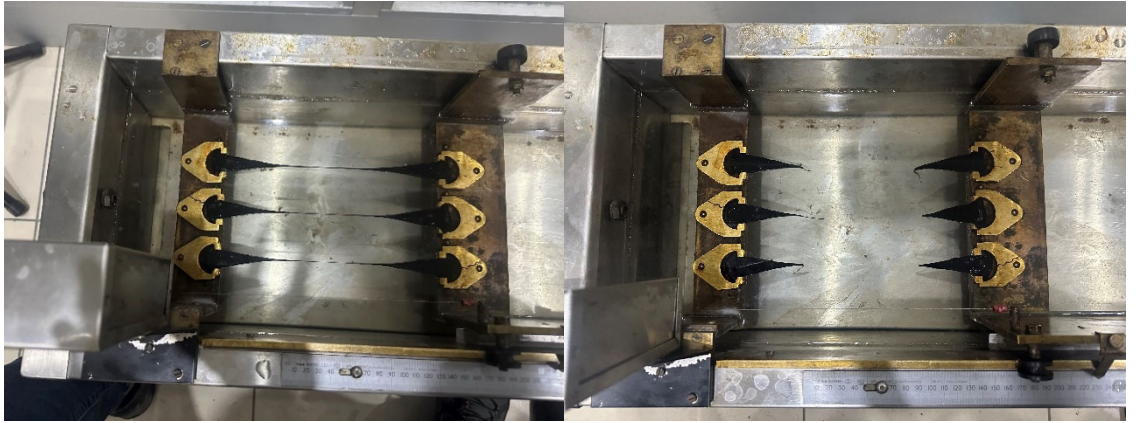


(a) Elastik geri dönme deney kalıbı

(b) Deney cihazı

Şekil 4.11. Elastik geri dönme deneyi cihazı ve numune dolu kalıplar

Daha sonra kalıplar 90 dakika deney sıcaklığındaki su banyosuna konulur. Bu işlem sonrası deney cihazına yerleştirilen kalıplar 50 mm/dakika hızda bitümlü malzemeyi önceden belirlenmiş bir uzama miktarına kadar (200 mm) uzatılır. Daha sonra bitümler orta noktalarından kesilir. 30 dakika sonra kesilen uçlar birleştirilerek yarım parçaların kısalması uzama uzunluğunun yüzdesi olarak tespit edilir.



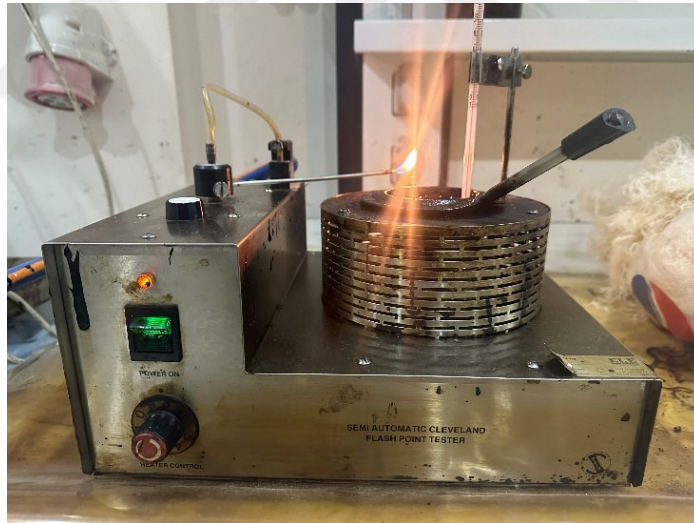
(a) Numunelerin çekilmesi

(b) Numunelerin kesilip beklenmesi

Şekil 4.12. Elastik geri deneyinde numunelerin çekilerek kesilmesi

4.2.8. Parlama noktası testi

İş sağlığı ve güvenliği açısından yapılacak çalışmalar sırasında bitüm ısıtılırken olabilecek herhangi bir tutuşma ve alev alma riski karşısında bitümün parlama noktası ve yanma derecesini bilmek önemlidir. Parlama noktası deneyi bitümün sürekli yanma olayının olmadan önce alevle temas ederek buharının tutuştuğu ve yanma sıcaklık derecesini görebilmek açısından, TS EN ISO 2592 ve TS 1171 standartlarına göre hazırlanan bir deneydir. Bu sıcaklık noktasının bulunabilmesi için bağlayıcı akışkan belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır (tahmin edilen parlama noktasının 56°C altına kadar) bu işlem sonrası, bağlayıcı akışkan deney kabının çentik hizasına kadar doldurularak numunesi hazırlanmış olur. Bitümün yüzeyinde hava kabarcığı ve köpük bulunmamalıdır. Daha sonra gerekli güvenlik önlemleri alınır ve numune deney cihazının içine yerleştirilir. Numune yerleştirildikten sonra parlama noktasının sıcaklık değerine yaklaşıncaya kadar dakikada 5°C ile 17°C arası sıcaklık artışı olmalıdır. Tahmin edilen parlama noktasına yaklaşıncı dakikada 5°C ile 6°C arası sıcaklık artışı yapılmalıdır.



Şekil 4.13. Parlama noktası deney cihazı

4.2.9. Marshall deney yöntemi ile tasarım

Marshall tasarım deneyi, stabilite ve akma değerleri ile birlikte optimum bitüm oranının tayin edilmesi için kullanılır. Agrega granülometresini, agrega ve bitüm yüzdesinin hesabını, briketlerle ilgili hesapları ve boşluk oranları tespit edebilmek için de kullanılmaktadır. Marshall test cihazı numunenin dayanımının bittiği ana kadar

deformasyon ve yükleme değerlerini göstererek bu anda yüklemeyi durdurmaktadır. Cihaz bu yükleme değerlerine göre çizdiği grafikte stabiliteyi ve akma değerlerini belirlenir. Karışım tasarımları için dünya genelince çokça kullanılan bir yöntemdir. Marshall deneyinin bazı avantajları şöyledir:

- Marshall test cihazının numunenin tamamına gerilme uygulaması
- Laboratuvar ortamında Marshall deneyinin hızlı ve kolay uygulanması
- Deneyde kullanılan malzemelerin taşınabilir olması
- Marshall deneyinin gerçek sonuçlara yakın değer ortaya koyması

Her deney numunesi için 1150 gram agregası ve filler karışımı malzeme kullanılmaktadır. Her deney parametresi için 3 adet briket hazırlanmıştır. Bitüm yüzdesi, agregası ağırlığına göre bitüm oranı olarak belirlenmiştir. Briketler $63,5 \pm 1,27$ mm yüksekliğinde ve agregasının %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 oranında bitüm kullanılarak optimum bitüm oranını bulmak için 7 set Marshall deney numune malzemesi hazırlanmıştır.

Tablo 4.1’de ki elek analizinde belirtilen granülometriye göre her deney briketi için 1150 gramlık agregası karışımları hazırlanarak 24 saat boyunca 160°C ayarlı etüvde bekletilmiştir. Kullanılacak bitümler etüvde 160°C ye kadar ısıtılmıştır. Deneyde kullanılacak briket kalıpları, spatula, karıştırma şişesi, karıştırma kabı vb. malzemeler 160°C ye kadar ısıtılmıştır. Hazırlanan agregası ısıtılmış karıştırma kabına dökülür ve karıştırılır. Agregasının ortasına bir çukur açılır ve ısıtılarak ağırlığı belirlenmiş bitüm bu çukura dökülür. Elektrikli karıştırıcı ile homojen bir şekilde karıştırılır. Briket kalıpları yağlanır ve karışım ısını kaybetmeden kalıba homojen bir şekilde aktarılır.



Şekil 4.14. Deney malzemelerin ısıtıldığı etüv

4,536 kg'lık bir tokmak 45,7 cm yükseklikten düşüş yaparak 75 defa vuruş uygulanması ile karışımı kalıp içinde sıkıştırılır. Kalıp ters çevrilerek diğer briketin yüzü de 75 vuruş yaptırılarak sıkıştırılır.



(a) Cihazın dış görünümü **(b)** Cihaza numune yerleştirilmiş

Şekil 4.15. Marshall stabilite deney tokmağı

Sıkıştırma işlemi sonrası numunelere etiket numarası verilir ve briketler yeterince soğuduktan sonra kalıplardan kriko yardımı ile çıkartılır. Daha sonra briketler soğuması için 24 saat bekletilir.



(a) Kalıp içinde briket

(b) Kriko

Şekil 4.16. Marshall deney numunelerinin kalıptan çıkarılması

Briketler $63,5 \pm 1,27$ mm yüksekliğinde olması gerekmektedir ve bu yükseklikler briketlerin dayanım değerini etkiler. 63,5 mm ye denk gelen katsayı 1'dir. Briket soğuduktan sonra köşeleri törpülenerek düzeltilir. Briketin eşit ara ile üç ayrı noktasından yüksekliği ölçülür. Bu üç değerın ortalaması alınarak briketin ortalama yüksekliği bulunur. 63,5 mm'den yüksek ise katsayı düşer, 6,5 mm'den kısa ise katsayı artar. 63,5 mm'den farklı değerde olan yükseklikler için briketin stabilitesi ile numunenin yüksekliğine göre bulunan katsayının çarpımı, düzeltilmiş stabilite değerini verir.



Şekil 4.17. Briketin yüksekliğinin ölçülmesi

Kalıplardan çıkarılan ve ortalama yükseklikleri bulunan briketlere UPV testi yapılarak sonuçlar kaydedilmiştir.



Şekil 4.18. Marshall numunelerine UPV testi yapılması

Briket ilk olarak havada tartılır daha sonra su emmesi için su havuzuna bırakılır ve bir süre beklenir, su emme işleminden sonra su içindeki ağırlığı belirlenir. Su havuzundan çıkarılan numunenin yüzeyindeki bulunan serbest sular kurulanır ve doymun yüzey-kuru ağırlığı tartılır. Daha sonra briketin hacmi hesaplanır.

Briketin hacmi (V) = (Briketin doymun yüzey- kuru ağırlığı) – (Briketin sudaki ağırlığı)
bu şekilde hesaplanarak bulunur.



Şekil 4.19. Marshall deney numunesinin tartılması

Boyutları kumpasla ölçülerek bulunan ve hacimleri hesaplanan briketlerin kuru ağırlıkları, doymuş yüzey kuru ağırlıkları da tartılarak belirlenir. Bu değerler Marshall deney tablosunda yerine yazılarak briketlerin yoğunlukları ve boşluk oranları bulunur.

Sıkıştırılmış briketlerin özgül ağırlıkları verilen formül ile hesaplanır:

$$G_{mb} = \frac{A}{B-C} \quad (4.3)$$

Burada:

G_{mb} = Sıkıştırılmış briketin özgül ağırlığı

A = Kuru briketin havadaki ağırlığı (g)

B = Briketin kuru yüzey doymuş ağırlığı (g)

C = Sudaki briketin ağırlığı (g)

Karışımın maksimum özgül ağırlığı ASTM D2041/D2041M-11 standartlarına göre aşağıda belirtilen formül kullanılarak bulunabilir:

$$G_{mm} = \frac{A}{A-(B-C)} \quad (4.4)$$

Burada:

G_{mm} = Maksimum özgül ağırlık

A = Gevşek karışımın havadaki ağırlığı (g)

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

C = Su dolu piknometrenin ağırlığı (g)

Bitümün yüzdesi için Maksimum özgül ağırlığının bilinmesi, değişik oranlarda bitüm içeren karışımların en yüksek özgül ağırlıklarının da bulunmasını sağlamaktadır. Agregaların efektif özgül ağırlığı sabittir ve bitüm emme potansiyeli içeriğindeki bitüm yüzdesinden bağımsızdır. Buradan agregaların efektif özgül (G_{se}) ağırlığı ise aşağıda verilen formül ile bulunur:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (4.5)$$

Burada:

P_{mm} = Toplam gevşek karışımın yüzdesi = 100

P_b = Karışımdaki asfalt yüzdesi

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

Belirli bir bitüm yüzdesi ile hazırlanan karışımın maksimum özgül ağırlığı hesabı aşağıdaki formülle bulunur:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (4.6)$$

Burada:

G_{mm} = Karışımın maksimum özgül ağırlığı

P_{mm} = Toplam gevşek karışımın yüzdesi

P_b = Karışımdaki asfalt yüzdesi

P_s = Karışımdaki agrega yüzdesi

G_{se} = Agregaların efektif özgül ağırlığı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

Bitüm ile dolu boşluk yüzdesi, kalıptan çıkan briketin içerisindeki agregalar arasında dolu olan bitümü ifade eder. VFA mineral agregalar arasındaki oluşan en büyük boşluğu ve bununla beraber asfalt içeriğini sınırlamaktır. VFA'nın hesaplanabilmesi için aşağıda belirtilen formül kullanılmıştır:

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} 100 \quad (4.6)$$

Burada:

VFA = Karışımdaki bitüm ile dolu boşluk (%)

VMA= Mineral agregalar arasındaki boşluk (%)

VTM = Toplam karışımın boşluk oranı

Su banyosu 60°C sıcaklığa getirilir ve briketler 30 dakika süre ile bu su banyosunda bekletilir. Daha sonra briketler kurularak Marshall test cihazı ile yüke maruz bırakılır. Marshall test cihazı numunenin dayanımının bittiği ana kadar deformasyon ve yükleme değerlerini göstererek bu anda yüklemeyi durdurmaktadır. Cihaz bu yükleme değerlerine göre çizdiği grafikte stabiliteyi ve akma değerlerini Marshall test cihazı ile belirlenir.



Şekil 4.20. Su banyosu havuzu

Akma değeri, numunenin düşey deformasyon değeri ile eşittir. Stabilite sonuçları 63,5 mm'lik numuneler için doğrudur. 63,5 mm'den düşük ya da yüksek numuneler için düzeltme faktörleri kullanılmaktadır. Düzeltme faktörü uygulanmış sonuçların şartnameye uygunluğu kontrol edilir.



Şekil 4.21. Marshall test cihazı

Optimum bitüm oranının belirlenmesi için hacimsel parametrelerin, stabilite ve akma değerlerinin hesaplanması gerekmektedir ve gerekli hesaplamalar sonucunda şartnamelere uygun olarak %4 hava boşluğu oranını sağlayan bitüm oranı optimum bitüm oranı olarak belirlenmiştir. Bitüm yüzdesi ve boşluk oranı grafiğinde %4 hava boşluğuna denk gelen bitüm yüzdesi, VMA, VFA, stabilite ve akma değerleri şartnamelere bakılarak uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Değerler şartname sınırları içerisindeyse, optimum bitüm oranı belirlenmiştir. Tablo 4.6'da Binder gradasyonu için Karayolları Teknik Şartnamesinde yer alan Marshall tasarım yöntemi kriterleri verilmiştir.

Tablo 4.6. Marshall tasarım yönetimi kriterleri

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



(a) Yirmi bir adet briket

(b) Üç adet optimum bitüm oranlı briket

Şekil 4.22. Marshall deney numuneleri

Agrega ağırlığının %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 oranlarında bitüm ile 7 set 21 adet numune hazırlanarak optimum bitüm oranı hesaplanmıştır. Optimum bitüm oranı belirlendikten sonra bu oranla 3 adet numune hazırlanarak sonuçları kontrol edilmiştir.

Tablo 4.7. Optimum Bitüm %'si için formül tablosu

Kısaltma	Açıklama	Formül
W_a	Agregaya oranına göre bitüm %'si	$W_a = (W_B/W_A) \times 100$
W_b	Karşım oranında 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)	Tartımla elde edilen ağırlık değeri
W_{su}	Sudaki ağırlık (g)	Tartımla elde edilen ağırlık değeri
W_{doygun}	Doygun yüzey kuru ağırlık (g)	Tartımla 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 ağırlığı	$D_t = 100 / [(100 - W_b/G_{sc}) + (W_b/G_b)]$
V_h	Numunedeki boşluk %'si	$V_h = [(D_t - D_{port})/D_t] \times 100$
V_b	Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si	$V_b = (P_{be} \times D_{port})/G_b$
V_a	Numunedeki agrega 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 agreg	
%I	Karışımındaki % ince agreg	
%F	Karışımındaki % filler	

Optimum bitüm oranı bulunurken Tablo 4.7'de bulunan formüller kullanılır. Sonuçların optimum değeri sağladıktan sonra deney planında verilen 16 set (16x3=48 adet) Marshall numunesi hazırlanmıştır.



Şekil 4.23. Modifiye bitümler ile hazırlanan 48 adet Marshall briketleri

Yapılan stabilite deneyleri sonrası Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile stabiliteyi maksimum yapan optimum seviyeler belirlenmiş ve doğrulama amacıyla 3 adet kontrol numunesi hazırlanarak stabilite deneyi yapılmıştır.



Şekil 4.24. Optimum seviyeler ile hazırlanan 3 adet IKA Marshall briketi

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deneyi Sonuçları

Deneylerden elde edilen RTFOT öncesi penetrasyon değerleri ve L16 ortogonal dizisine göre Taguchi Yöntemi ile hesaplanan S/N değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Penetrasyon değerini maksimum yapan en büyük en iyi performans istatistiği kullanılmıştır. S/N değerleri hesaplandıktan sonra optimum seviyeleri belirlemek için hesaplanan ortalama S/N etkileri Tablo 5.2'de sunulmuştur.

Tablo 5.1. 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	60,70	60,60	61,00	60,77	35,67
2	61,00	60,90	61,30	61,07	35,72
3	60,30	60,10	60,00	60,13	35,58
4	59,60	60,10	60,00	59,90	35,55
5	67,20	67,80	67,50	67,50	36,59
6	58,90	58,70	59,10	58,90	35,40
7	69,10	68,80	68,70	68,87	36,76
8	66,00	65,70	65,80	65,83	36,37
9	66,50	66,20	66,30	66,33	36,43
10	68,80	68,50	68,60	68,63	36,73
11	70,10	69,60	69,50	69,73	36,87
12	71,50	71,70	71,40	71,53	37,09
13	70,80	71,20	71,00	71,00	37,03
14	61,70	61,20	61,60	61,50	35,78
15	60,70	61,30	60,90	60,97	35,70
16	63,70	64,10	63,50	63,77	36,09

Tablo 5.2. RTFOT öncesi penetrasyon ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	35,630	36,430	36,009	36,325
2. Seviye	36,279	35,907	36,274	36,495
3. Seviye	36,781	36,228	36,041	36,248
4. Seviye	36,149	36,275	36,516	35,772

RTFOT öncesi penetrasyon için optimum seviyeler Tablo 5.3'te verildiği üzere A3, B1, C4 ve D2 olarak bulunmuştur. Penetrasyona en yüksek etkiye sahip parametreler sırasıyla süre, Cecabase oranı, süre ve hız olmuştur. Tablo 4.5'teki deney planı dikkate alındığında optimum değerlere sahip deneyin olmadığı görülmektedir. Bu nedenle sonucu doğrulamak için ilgili parametre değerlerine (A3, B1, C4, D2) göre numune hazırlanarak doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyinin sonunda 72,4 (0,1 mm) penetrasyon değeri elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri 37,200'tir. Bu değer %95 güven seviyesinde 37,180 ile 38,005 arasında olmalıdır (Tablo 5.3). Dolayısıyla sonucun %95 güven aralığında doğru olduğu söylenebilir.

Tablo 5.3. RTFOT öncesi penetrasyon performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
Cecabase	A3	0,571
Sıcaklık	B1	0,220
Süre	C4	0,306
Hız	D2	0,285
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1,382
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		36,210
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (0,1 mm)		37,592 / 75,788
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (0,1 mm)		37,200 / 72,400
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		37,180 / 38,005

Tablo 5.1'den görüleceği üzere Cecabase RT BIO10 katkı oranı arttıkça bitümün penetrasyon değeri artmıştır. Katkı maddesi bitümü yumuşatmıştır. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde en yüksek penetrasyon değeri saf bitüme göre %6,459 artışla

71,53 (0,1 mm) olmuştur. Penetrasyon değerini en büyük yapan optimum seviyelere göre hesaplanan penetrasyon değeri ise saf bitüme göre %12,880 artışla 75,788 (0,1mm) olmuştur. Capayova vd. (2018) çalışmalarında Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin 50/70 bitümün penetrasyonunu %3,92 artırdığını ortaya koymuşlardır. Stienss ve Szydowski (2020), katkı maddesinin bitümün penetrasyon değerini %14,11 artırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

5.2. RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneyi Sonuçları

RTFOT sonrası penetrasyon değerleri ve hesaplanan S/N değerleri Tablo 5.4'de verilmiştir. S/N değerleri hesaplanırken penetrasyon değerini en büyük yapan en büyük en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

Tablo 5.4. 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	35,70	36,30	35,90	35,97	31,12
2	37,80	37,70	38,00	37,83	31,56
3	38,30	38,50	37,90	38,23	31,65
4	40,00	39,70	39,40	39,70	31,98
5	39,90	40,20	40,10	40,07	32,06
6	35,30	34,90	34,70	34,97	30,87
7	37,80	37,80	37,60	37,73	31,53
8	40,10	39,70	40,20	40,00	32,04
9	42,10	42,40	41,90	42,13	32,49
10	43,10	42,80	42,60	42,83	32,64
11	43,30	43,00	43,10	43,13	32,70
12	43,90	44,40	44,00	44,10	32,89
13	46,00	45,70	45,90	45,87	33,23
14	40,00	40,30	39,90	40,07	32,06
15	42,10	42,30	41,90	42,10	32,49
16	42,50	42,60	42,80	42,63	32,59

S/N değerleri hesaplandıktan sonra optimum seviyeleri belirlemek için hesaplanan ortalama S/N etkileri Tablo 5.5'de sunulmuştur.

Tablo 5.5. RTFOT sonrası penetrasyon ortalama S/N etkileri

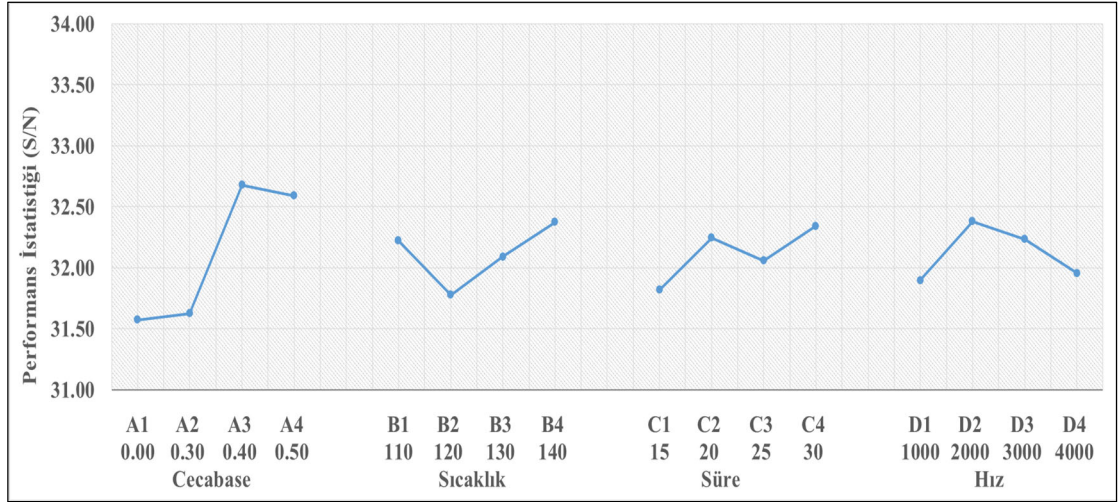
Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	31,575	32,224	31,821	31,899
2. Seviye	31,626	31,780	32,247	32,381
3. Seviye	32,678	32,091	32,060	32,234
4. Seviye	32,592	32,375	32,344	31,957

RTFOT sonrası penetrasyon için optimum seviyeler Şekil 5.1 ve Tablo 5.6’da gösterildiği üzere A3, B4, C4 ve D2 olarak bulunmuştur. Penetrasyon üzerinde en etkili parametre 0,561 değeri ile Cecabase katkı maddesi olmuştur. Bunu 0,263 değeri ile karıştırma hızı, 0,257 değeri ile karıştırma sıcaklığı ve 0,226 değeri ile karıştırma süresi izlemiştir.

Yapılan doğrulama deneyinin sonunda 45,2 (0,1 mm) penetrasyon değeri elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri 33,100 'tır. Bu değer %95 güven seviyesinde 32,998 ile 33,853 arasında olmalıdır. Dolayısıyla sonucun %95 güven aralığında doğru olduğu söylenebilir.

Tablo 5.6. RTFOT sonrası penetrasyon performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
Cecabase	A3	0,561
Sıcaklık	B4	0,257
Süre	C4	0,226
Hız	D2	0,263
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1,308
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		32,118
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (0.1 mm)		33,425 / 46,911
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (0.1 mm)		33,100 / 45,200
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		32,998 / 33,853



Şekil 5.1. RTFOT sonrası penetrasyonun tüm seviyeler için performans istatistikleri

Cecabase RT BIO10 katkı oranı arttıkça bitümün penetrasyon değeri artmıştır. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde en yüksek penetrasyon değeri saf bitüme göre %18,00 artışla 45,87 (0,1 mm) olmuştur. Penetrasyon değerini maksimum yapan optimum seviyelere göre hesaplanan penetrasyon değeri ise saf bitüme göre %20,684 artışla 46,911 (0,1mm) olmuştur.

5.3. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

RTFOT öncesi yumuşama noktası değerleri ve S/N değerleri Tablo 5.7'de verilmiştir. S/N değerleri hesaplanırken yumuşama noktası değerlerini minimum yapan en küçük en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

Tablo 5.7 RTFOT öncesi yumuşama noktası ve S/N değerleri

Deney No	1. Numune (°C)	2. Numune (°C)	Ortalama (°C)	S/N
1	55,00	54,80	54,90	-34,79
2	53,90	54,10	54,00	-34,65
3	53,30	53,40	53,35	-34,54
4	53,40	53,50	53,45	-34,56
5	53,80	53,50	53,65	-34,59
6	53,60	53,60	53,60	-34,58
7	52,50	52,70	52,60	-34,42
8	52,00	52,10	52,05	-34,33
9	52,60	52,40	52,50	-34,40
10	50,80	50,40	50,60	-34,08
11	50,20	50,40	50,30	-34,03
12	51,20	50,90	51,05	-34,16
13	51,20	51,50	51,35	-34,21
14	52,80	52,40	52,60	-34,42
15	51,70	51,90	51,80	-34,29
16	50,50	50,70	50,60	-34,08

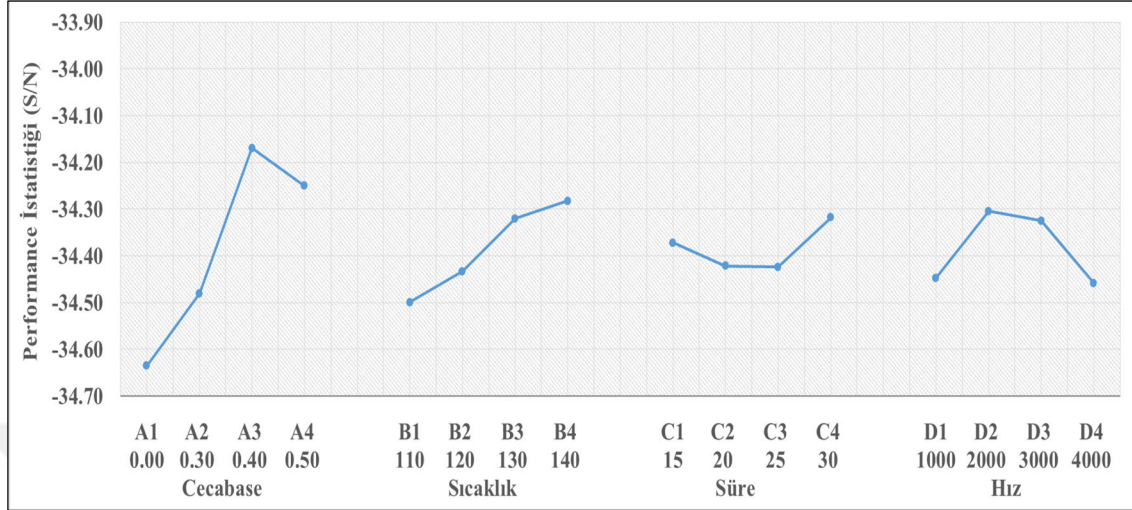
S/N değerleri hesaplandıktan sonra yumuşama noktası optimum seviyelerini belirlemek için hesaplanan ortalama S/N etkileri Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8. RTFOT öncesi yumuşama noktası ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	-34,635	-34,499	-34,372	-34,448
2. Seviye	-34,481	-34,433	-34,421	-34,305
3. Seviye	-34,169	-34,320	-34,424	-34,325
4. Seviye	-34,250	-34,283	-34,318	-34,458

RTFOT öncesi yumuşama noktası için optimum seviyeler Şekil 5.2 ve Tablo 5.9'da gösterildiği gibi A3, B4, C4 ve D2 olarak bulunmuştur. Yumuşama noktası üzerinde en etkili parametre 0,214 değeri ile Cecabase katkı maddesi olmuştur. Bunu 0,101 değeri ile

karıştırma sıcaklığı, 0,079 değeri karıştırma hızı ve 0,066 değeri ile karıştırma süresi izlemiştir.



Şekil 5.2. RTFOT öncesi yumuşama noktası için performans istatistikleri

Yapılan doğrulama deneyinin sonunda 49,3°C yumuşama noktası değeri elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri -33,860 'tır. Bu değer %95 güven seviyesinde -34,001 ile -33,845 arasındadır.

Tablo 5.9. RTFOT öncesi yumuşama noktası performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
Cecabase	A3	0,214
Sıcaklık	B4	0,101
Süre	C4	0,066
Hız	D2	0,079
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,461
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-34,384
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (°C)		-33,923 / 49,677
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (°C)		-33,860 / 49,300
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-34,001 / -33,845

Cecabase RT BIO10 katkı oranı arttıkça bitümün yumuşama noktası değeri azalmıştır. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde en düşük yumuşama noktası değeri saf

bitüme göre %2,43 azalışla 50.3°C olmuştur. Yumuşama noktası değerini minimum yapan optimum seviyelere göre hesaplanan yumuşama noktası değeri ise saf bitüme göre %3,628 azalışla 49,677°C olmuştur. Capayova vd. (2018) çalışmalarında Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin 50/70 bitümün yumuşama noktası değerini %4,08 azalttığını belirtmişlerdir. Stienss ve Szydlowski (2020), katkı maddesinin bitümün yumuşama noktasını %2,8 azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

5.4. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

RTFOT sonrası yumuşama noktası deney sonuçları ve en küçük en iyi performans istatistiğine göre hesaplanan S/N değerleri Tablo 5.10'da verilmiştir. Taguchi Yöntemi'ne göre optimum seviyelerin belirlenebilmesi için hesaplanan ortalama S/N etkileri Tablo 5.11'de sunulmuştur.

Tablo 5.10. RTFOT sonrası yumuşama noktası ve S/N değerleri

Deney No	1. Numune (°C)	2. Numune (°C)	Ortalama (°C)	S/N
1	62,70	62,90	62,80	-35,96
2	63,20	63,40	63,30	-36,03
3	62,10	61,90	62,00	-35,85
4	62,50	62,50	62,50	-35,92
5	62,50	62,70	62,60	-35,93
6	63,10	63,00	63,05	-35,99
7	62,90	62,70	62,80	-35,96
8	62,00	61,80	61,90	-35,83
9	59,90	60,10	60,00	-35,56
10	60,30	59,90	60,10	-35,58
11	60,00	60,00	60,00	-35,56
12	61,10	61,30	61,20	-35,74
13	60,20	60,00	60,10	-35,58
14	61,90	62,10	62,00	-35,85
15	61,50	61,30	61,40	-35,76
16	60,60	60,60	60,60	-35,65

Tablo 5.11. RTFOT sonrası yumuşama noktası ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	-35,938	-35,758	-35,791	-35,875
2. Seviye	-35,930	-35,862	-35,864	-35,751
3. Seviye	-35,610	-35,783	-35,773	-35,752
4. Seviye	-35,710	-35,784	-35,758	-35,809

RTFOT sonrası yumuşama noktası değerini minimum yapan optimum seviyeler A3, B1, C4, D2 olarak bulunmuştur. Tablo 5.12’de S/N’e en fazla katkısı olan parametre yumuşama noktası üzerinde de en fazla katkıyı vermektedir. Bu nedenle yumuşama noktası üzerinde en büyük etkiyi 0,187 değeri ile Cecabase RT BIO10’un yaptığı görülmektedir. Bunu sırasıyla karıştırma hızı, karıştırma süresi ve karıştırma sıcaklığı izlemiştir. Doğrulama deneyi sonucunda yumuşama noktası 59,8°C olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer %95 güven aralığındadır.

Tablo 5.12. RTFOT sonrası yumuşama noktası performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N’ e olan katkıları
Cecabase	A3	0,187
Sıcaklık	B1	0,039
Süre	C4	0,039
Hız	D2	0,046
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,311
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-35,797
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (°C)		-35,486 / 59,469
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (°C)		-35,530 / 59,800
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-35,569 / -35,403

Cecabase RT BIO10 katkı oranı arttıkça bitümün yumuşama noktası değeri azalmıştır. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde en düşük yumuşama noktası değeri saf bitüme göre %1,397 azalışla 60,0°C olmuştur.

5.5. Penetrasyon İndeksi

Penetrasyon ve yumuşama noktası testlerinden elde edilen sonuçlar, bitümün sıcaklık hassasiyetini değerlendirmek için aşağıda sunulan formüller kullanılarak Penetrasyon İndeksinin (PI) bulunmasında kullanılmaktadır.

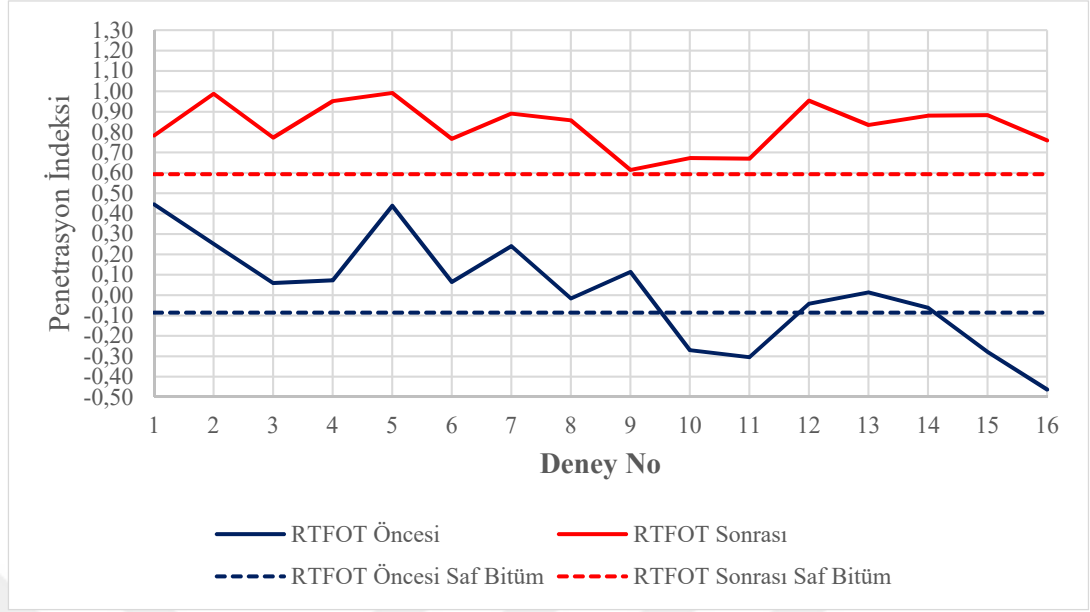
$$A = \frac{\log_{10}800 - \log_{10}P_{25}}{T_{SP} - 25} \quad (5.1)$$

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

Formülasyondaki P_{25} değeri bitümün 25 °C'deki penetrasyonunu, T_{SP} değeri ise yumuşama noktasını göstermektedir. -2'den küçük bir PI değeri yüksek ısı duyarlılığını, 2'den büyük bir PI değeri ise düşük ısı duyarlılığını göstermektedir (Geçkil, 2019). Penetrasyon İndeksi sonuçları Tablo 5.13 ve Şekil 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.13. Penetrasyon indeksi sonuçları

Deney No	RTFOT Öncesi	RTFOT Sonrası
Saf Bitüm	-0.09	0.59
1	0.45	0.78
2	0.25	0.91
3	0.06	0.82
4	0.11	1.05
5	0.44	1.01
6	0.06	0.78
7	0.18	0.87
8	-0.02	0.86
9	0.02	0.61
10	-0.27	0.67
11	-0.30	0.67
12	-0.04	0.96
13	0.01	0.84
14	0.04	0.88
15	-0.28	0.88
16	-0.46	0.76



Şekil 5.3. Saf bitüm ve deney sonuçlarının penetrasyon indeksi karşılaştırması

Şekil 5.3’de görüldüğü üzere B 50/70 saf bitüme eklenen Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin tüm seviyelerindeki yaşlanma sonrası PI değerlerinde artış görülmüştür. Yaşlanma öncesi ise PI değerindeki artış katkı oranının %0,30 olduğu karışımlarda daha fazla iken, %0,40 katkı oranlı karışımlarda nispeten azalmıştır. %0,50 katkı oranında, PI değerindeki bu azalış daha fazla olmuştur.

Cecabase RT BIO10, özellikle yaşlanma sonrası bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetini azaltmıştır. Daha yüksek PI değerlerine sahip karışımlar, kalıcı deformasyonun yanı sıra düşük sıcaklıktaki çatlamaya karşı daha dirençlidir (Sengoz ve Isikyakar, 2008).

5.6. RTFOT Sonuçları

RTFOT kütleli kayıp değerleri ve en küçük en iyi performans istatistiğine göre hesaplanan S/N değerleri Tablo 5.14’de verilmiştir. Ortalama S/N etkileri Tablo 5.15’te verilmiştir.

Tablo 5.14. RTFOT kütle kaybı değerleri ve S/N değerleri

Deney No	M1 (gr)	M2 (gr)	Kütle Kaybı (%)	S/N
1	147,88	147,71	-0,4944	-33,88
2	147,92	147,75	-0,4976	-33,94
3	148,10	147,92	-0,5043	-34,05
4	148,02	147,85	-0,4962	-33,91
5	148,13	147,96	-0,4728	-33,49
6	147,54	147,38	-0,4558	-33,18
7	147,32	147,16	-0,4611	-33,28
8	147,98	147,82	-0,4714	-33,47
9	148,07	147,91	-0,4493	-33,05
10	147,78	147,63	-0,4443	-32,95
11	148,50	148,34	-0,4412	-32,89
12	147,46	147,31	-0,4485	-33,04
13	147,68	147,53	-0,4342	-32,75
14	148,08	147,93	-0,4274	-32,62
15	147,22	147,07	-0,4328	-32,73
16	148,10	147,95	-0,4306	-32,68

Tablo 5.15. RTFOT ortalama S/N etkileri

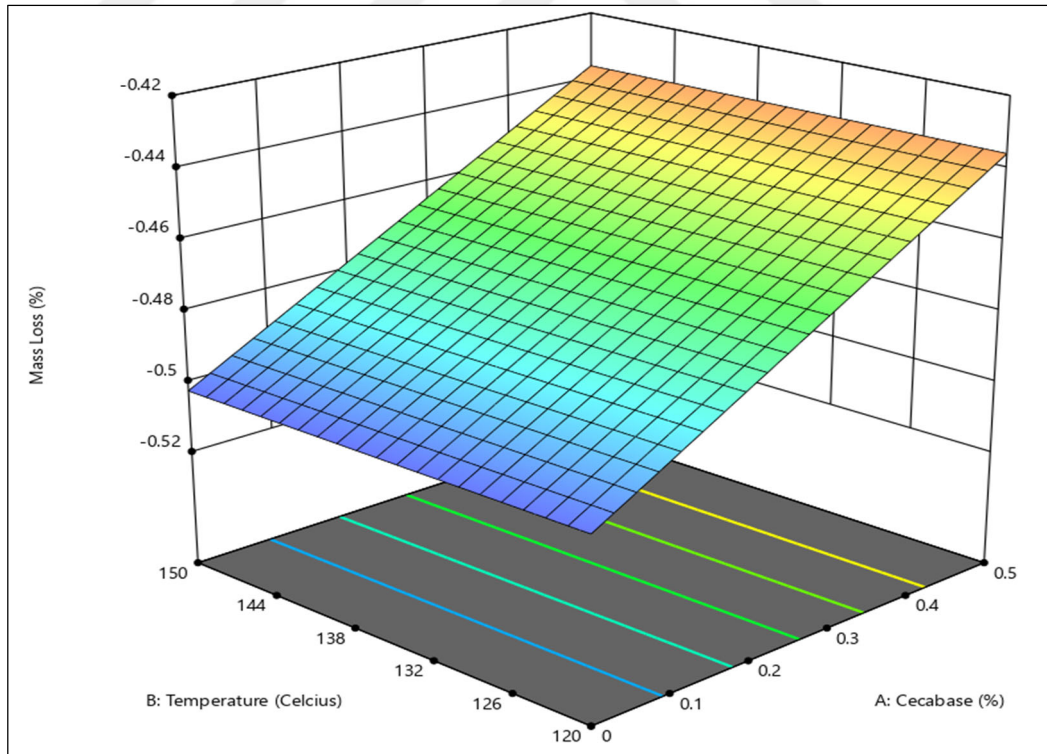
Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	-33,947	-33,295	-33,158	-33,202
2. Seviye	-33,353	-33,171	-33,298	-33,263
3. Seviye	-32,983	-33,237	-33,297	-33,296
4. Seviye	-32,695	-33,275	-33,224	-33,216

RTFOT kütle kaybı yüzdesini minimum yapan optimum seviyeler Tablo 5.16’da verildiği üzere A4, B2, C1, D1 olarak bulunmuştur. Cecabase RT BIO10 katkı oranının kütle kaybı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Katkı oranı arttıkça kütle kaybı da azalmıştır.

Tablo 5.16. RTFOT kütle kaybı performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
Cecabase	A4	0,550
Sıcaklık	B2	0,073
Süre	C1	0,087
Hız	D1	0,042
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,752
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-33.244
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (‰)		-32,493 / 42,133
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (‰)		-32,520 / 42,250
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-32,574 / -32,411

Kütlesel kayıpları gösteren 3 boyutlu yanıt yüzeyi ve 2 boyutlu kontur çizgileri Şekil 5.4'de verilmiştir. Karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve karıştırma sıcaklığının katkı oranına göre çok daha az etki ettiği görülmüştür.

**Şekil 5.4.** RTFOT kütle kayıpları için 2D ve 3D kontur çizgileri

RTFOT kütle kaybı, bitümün maruz kaldığı oksidatif yaşlanma ve sertleşme miktarının önemli bir göstergesidir. Katkı maddesi saf bitümü yaşlanmaya karşı daha dayanıklı hale getirerek kaplama performansını artırmış, durabilite ve esnekliği iyileştirmiştir.

5.7. Elastik Geri Dönme Deneyi Sonuçları

Elastik geri dönme deneyi sonuçları ve en büyük en iyi performans istatistiğine göre hesaplanan S/N değerleri Tablo 5.17’de verilmiştir. Elastik geri dönme yüzdesi (R_E) değeri aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır. R_E ’nin %0 olması, malzemenin elastik davranış göstermediğini belirtmektedir. %100 olması ise malzemenin orijinal şekline tamamen geri dönebilmesini belirtmektedir (Błażejowski vd., 2014). Formülasyondaki d değeri kesilen numunenin uçları arasındaki uzaklığı, L ise numunenin uzamasını göstermektedir.

$$R_E = \frac{d}{L} 100 \quad (5.3)$$

Tablo 5.17. Elastik geri dönme deney sonuçları ve S/N değerleri

Deney No	Uzama (mm)	d (mm)	R_E (%)	S/N
1	200	8	4,00	12,04
2	200	9	4,50	13,06
3	200	10	5,00	13,98
4	200	11	5,50	14,81
5	200	18	9,00	19,08
6	200	20	10,00	20,00
7	200	29	14,50	23,23
8	200	30	15,00	23,52
9	200	27	13,50	22,61
10	200	28	14,00	22,92
11	200	26	13,00	22,28
12	200	29	14,50	23,23
13	200	25	12,50	21,94
14	200	24	12,00	21,58
15	200	22	11,00	20,83
16	200	20	10,00	20,00

S/N değerleri hesaplandıktan sonra optimum seviyeleri belirlemek için hesaplanan elastik geri dönme yüzdesi ortalama S/N etkileri Tablo 5.18'de sunulmuştur.

Tablo 5.18. Elastik geri dönme yüzdesi ortalama S/N etkileri

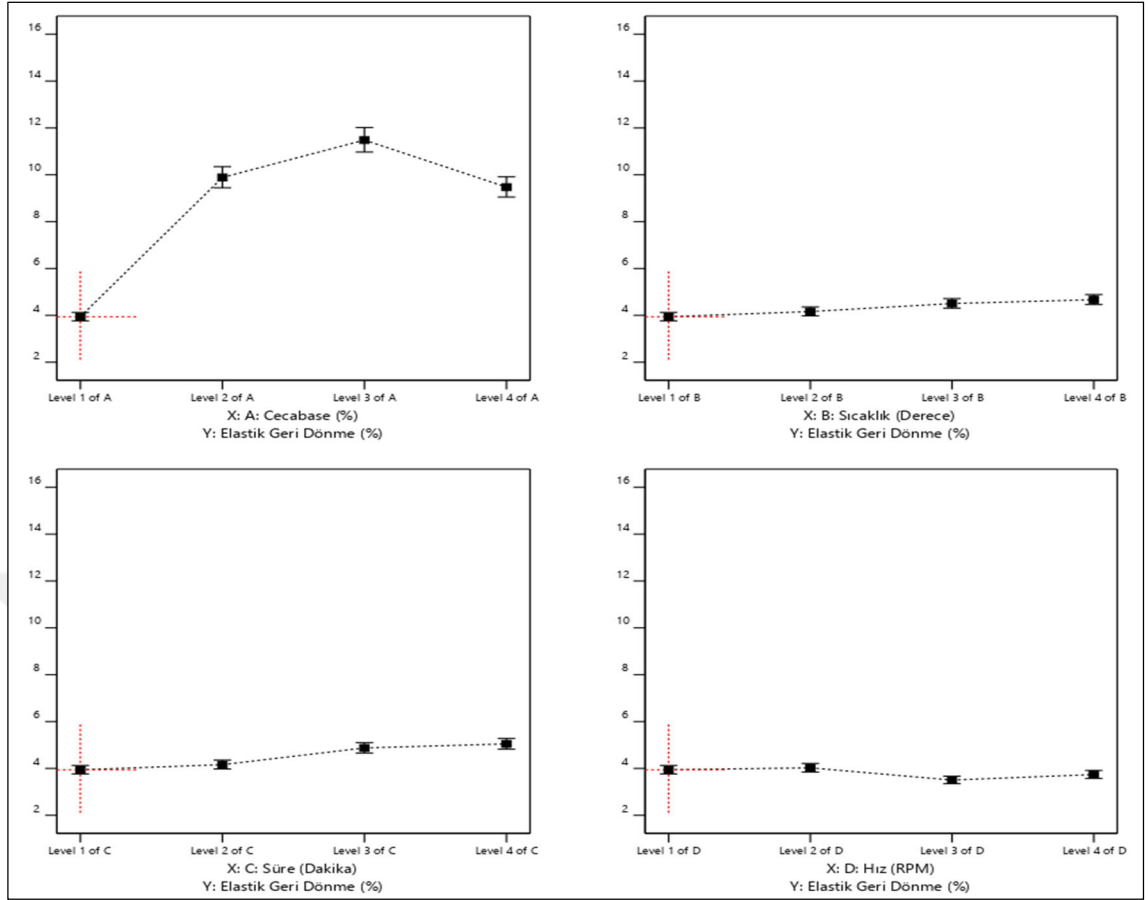
Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	13,473	18,918	18,580	20,020
2. Seviye	21,459	19,393	19,051	20,201
3. Seviye	22,759	20,078	20,423	18,997
4. Seviye	21,087	20,389	20,724	19,560

Elastik geri dönme yüzdesini maksimum yapan optimum seviyeler Tablo 5.19'da verildiği üzere A3, B4, C4, D2 olarak bulunmuştur. Elastik geri dönme yüzdesi üzerinde en önemli parametre Cecabase RT BIO10 katkı maddesi olmuştur.

Tablo 5.19. Elastik geri dönme yüzdesi performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
Cecabase	A3	3,064
Sıcaklık	B4	0,695
Süre	C4	1,029
Hız	D2	0,506
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		5,295
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		19,694
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (%)		24,989 / 17,761
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (%)		24,190 / 16,200
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		24,013 / 25,966

Elastik geri dönme testi esas olarak asfalt bağlayıcıların elastik deformasyonundan sonra geri dönme yeteneğini değerlendirmek için kullanılmaktadır (Ma vd., 2020). Yapılan analizler sonucunda elastik geri dönme yüzdesinin Şekil 5.5'de görüldüğü üzere Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin %0,40 oranına kadar arttığı sonra bir miktar azaldığı belirlenmiştir. Karıştırma sıcaklığı ve karıştırma süresi arttıkça elastik geri dönme yüzdesi artmıştır. Karıştırma hızı için ise elastik geri dönme yüzdesi 2000 rpm' e kadar artmış daha sonra azalış göstermiştir.



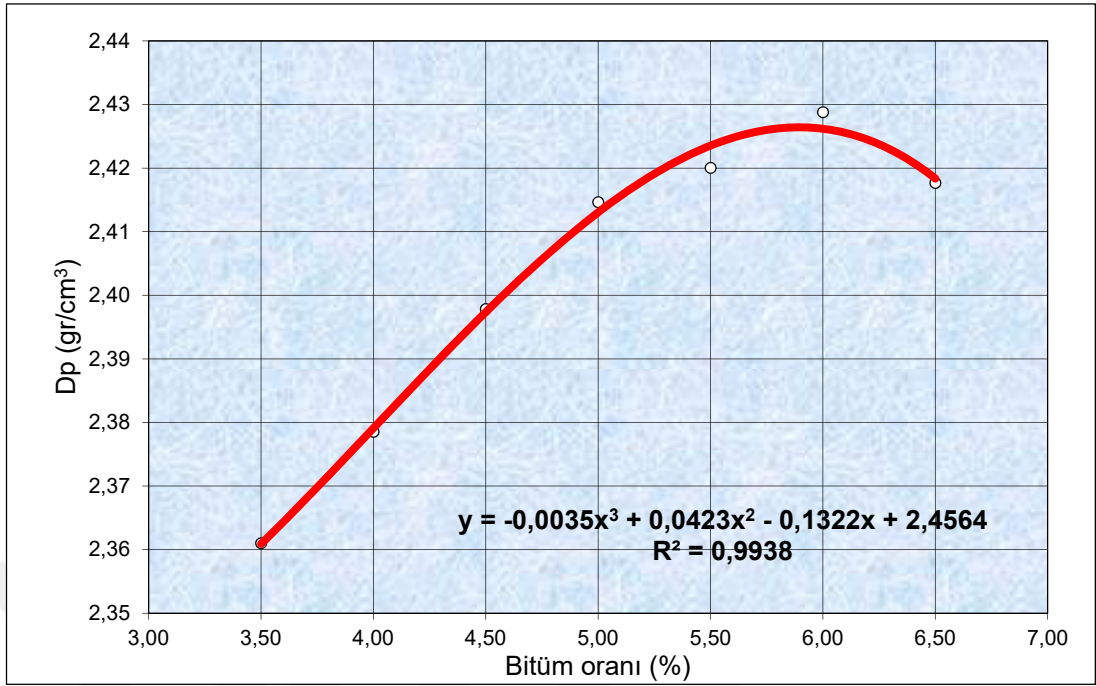
Şekil 5.5. Elastik geri dönme tüm seviyeler için performans istatistikleri

5.8. Marshall Stabilite Deneyi Sonuçları

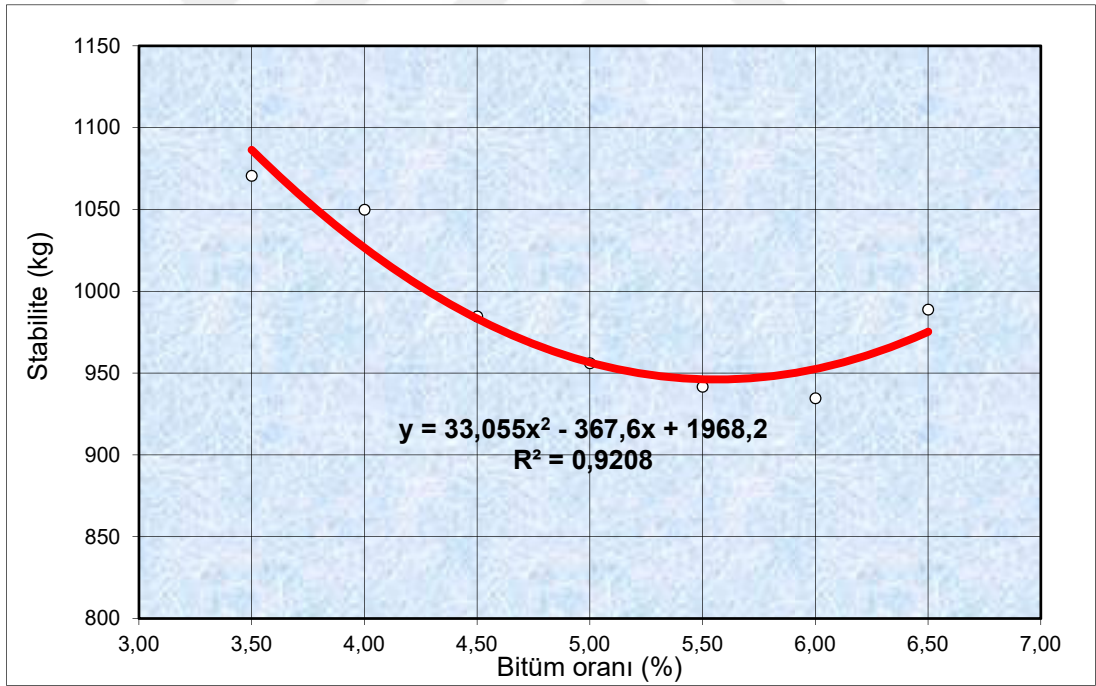
Optimum bitüm oranının belirlenebilmesi amacıyla karışımda kullanılan agrega miktarı sabit tutularak agrega ağırlığının %3,5 ila %6,5 oranında bitüm ilave edilmiş ve her yüzde için 3 adet olmak üzere toplam 21 adet numune hazırlanmıştır. Daha sonra Marshall stabilite testine tabi tutulan numunelerin stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.20’de verilmiştir. Şekil 5.6 ila 5.11'deki grafikler oluşturulduktan sonra gerekli hesaplamalar yapılarak boşluk oranının %4'e karşılık geldiği ve stabilitenin en yüksek değere karşılık geldiği bitüm oranı %4,85 olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.20. Optimum bitüm oranının belirlenmesi için deney sonuçları

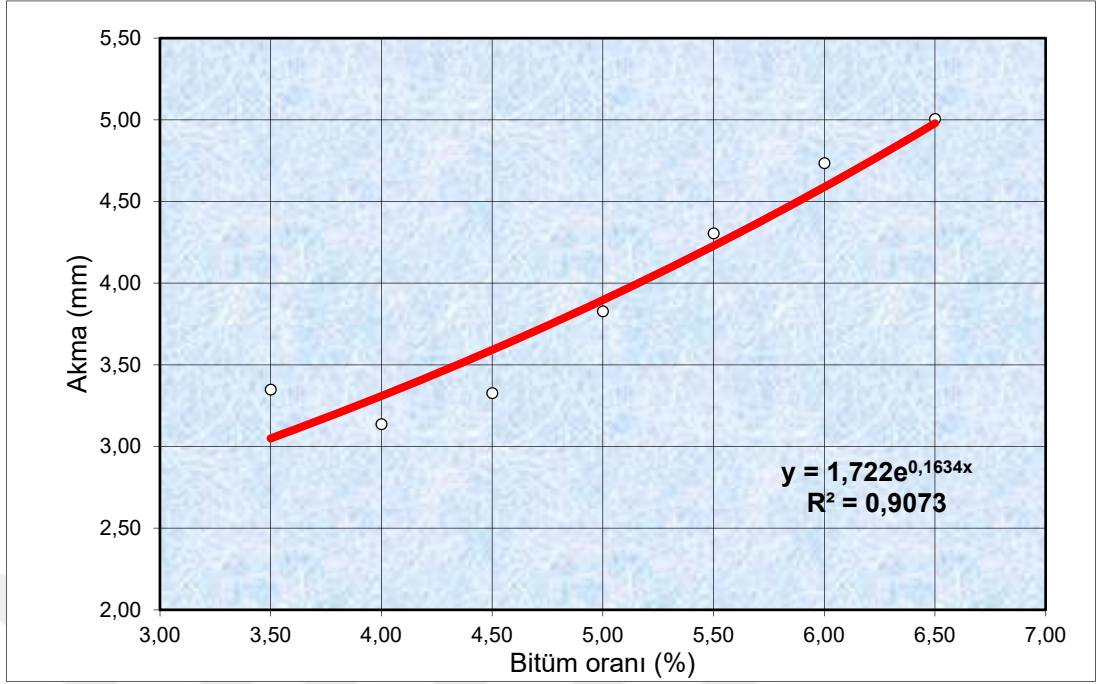
Deney No	Bitüm Oranı (%)	Bitüm Ağırlığı (g)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort} (mm)	W _{hava} (g)	W _{su} (g)	W _{doy.} (g)	V (cm ³)	D _p (g/cm ³)	D _t (g/cm ³)	V _a (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düz. Faktörü	Düz. Stabilite (kg)	M/Q (kg/mm)
1	3,50	40,25	62,40	62,40	62,43	62,41	1.181,4	689,2	1.190,0	500,8	2,359					3,22	1.052,59	1,03	1.081,47	
2	3,50	40,25	63,10	62,70	62,83	62,88	1.179,6	688,9	1.188,5	499,6	2,361					3,35	1.093,81	1,01	1.110,13	
3	3,50	40,25	62,80	62,80	62,90	62,83	1.181,0	687,5	1.187,3	499,8	2,363					3,47	1.004,35	1,02	1.020,48	
									Ortalama		2,361	2,563	7,881	15,353	48,665	3,35			1.070,69	319,71
4	4,00	46,00	62,80	63,00	63,10	62,97	1.186,3	691,5	1.192,2	500,7	2,369					3,00	977,86	1,01	990,14	
5	4,00	46,00	62,40	62,80	62,60	62,60	1.184,1	691,7	1.188,2	496,5	2,385					3,11	1.126,44	1,02	1.151,54	
6	4,00	46,00	62,40	62,80	62,80	62,67	1.182,4	689,5	1.186,0	496,5	2,381					3,30	988,06	1,02	1.008,30	
									Ortalama		2,379	2,545	6,522	15,134	56,903	3,14			1.049,99	334,71
7	4,50	51,75	62,60	62,20	62,30	62,37	1.191,5	695,7	1.192,5	496,8	2,398					3,20	1.003,15	1,03	1.031,87	
8	4,50	51,75	62,80	62,80	62,60	62,73	1.191,9	694,7	1.191,8	497,1	2,398					3,33	885,47	1,02	902,04	
9	4,50	51,75	62,10	62,30	62,50	62,30	1.188,9	695,1	1.191,0	495,9	2,397					3,45	990,23	1,03	1.020,41	
									Ortalama		2,398	2,526	5,090	14,855	65,734	3,33			984,77	295,93
10	5,00	57,50	62,60	62,10	62,10	62,27	1.204,1	708,1	1.205,7	497,6	2,420					4,21	940,00	1,03	969,51	
11	5,00	57,50	61,70	61,90	61,70	61,77	1.193,7	700,5	1.194,8	494,3	2,415					3,21	902,00	1,05	943,09	
12	5,00	57,50	62,20	62,00	61,80	62,00	1.194,5	699,8	1.195,6	495,8	2,409					4,06	920,00	1,04	955,77	
									Ortalama		2,415	2,509	3,752	14,666	74,415	3,83			956,12	249,77
13	5,50	63,25	62,30	62,00	62,40	62,23	1.193,2	700,3	1.194,3	494,0	2,415					4,21	929,46	1,03	959,50	
14	5,50	63,25	61,90	61,60	62,00	61,83	1.189,9	699,7	1.191,4	491,7	2,420					3,50	900,74	1,04	940,04	
15	5,50	63,25	62,00	62,20	62,30	62,17	1.195,9	704,2	1.197,4	493,2	2,425					5,20	895,16	1,03	925,76	
									Ortalama		2,420	2,492	2,870	14,881	80,711	4,31			941,77	218,76
16	6,00	69,00	62,10	62,20	62,00	62,10	1.212,1	715,1	1.212,5	497,4	2,437					4,48	909,00	1,04	941,77	
17	6,00	69,00	61,80	61,90	61,90	61,87	1.206,4	709,6	1.207,2	497,6	2,424					5,13	890,00	1,04	927,98	
18	6,00	69,00	61,50	61,60	62,00	61,70	1.195,6	703,4	1.196,4	493,0	2,425					4,60	892,00	1,05	934,35	
									Ortalama		2,429	2,475	1,855	14,976	87,614	4,74			934,70	197,39
19	6,50	74,75	61,90	61,80	62,00	61,90	1.200,0	705,2	1.200,3	495,1	2,424					5,00	969,85	1,04	1.010,31	
20	6,50	74,75	63,20	63,00	62,90	63,03	1.213,8	710,8	1.214,3	503,5	2,411					4,71	1.019,21	1,01	1.030,25	
21	6,50	74,75	62,10	62,50	62,10	62,23	1.201,8	705,3	1.202,2	496,9	2,419					5,31	897,31	1,03	926,31	
									Ortalama		2,418	2,458	1,650	15,762	89,530	5,01			988,96	197,55
Şartname Limitleri													4-6	13-15	60-75	2-4			> 750	



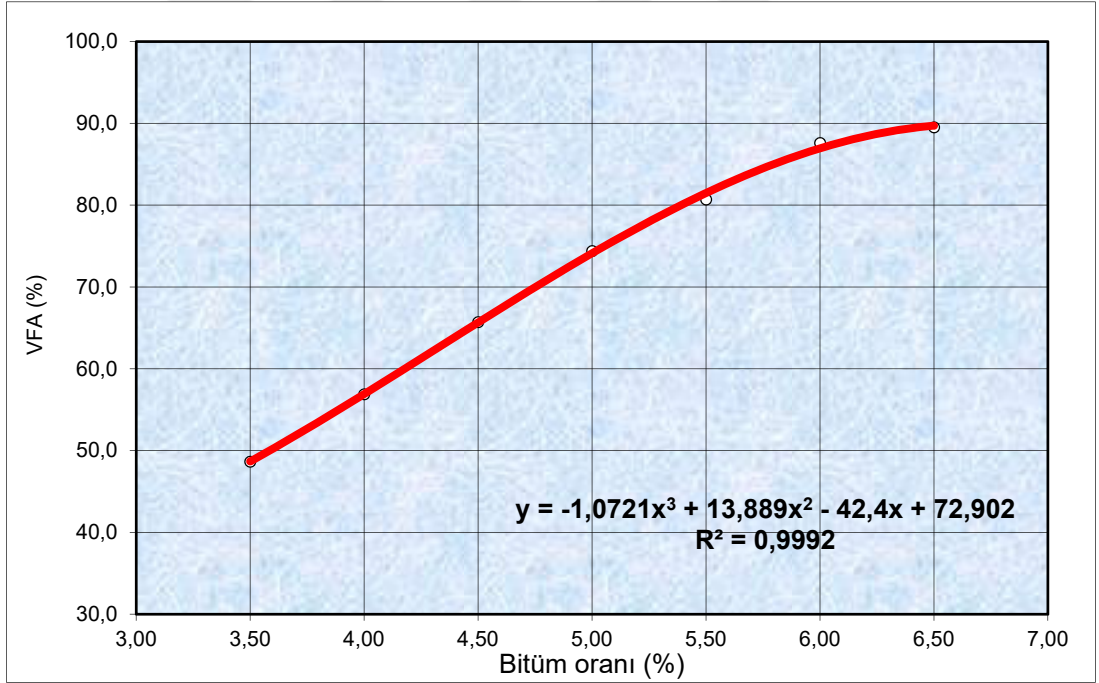
Şekil 5.6. Dp-Bitüm oranı



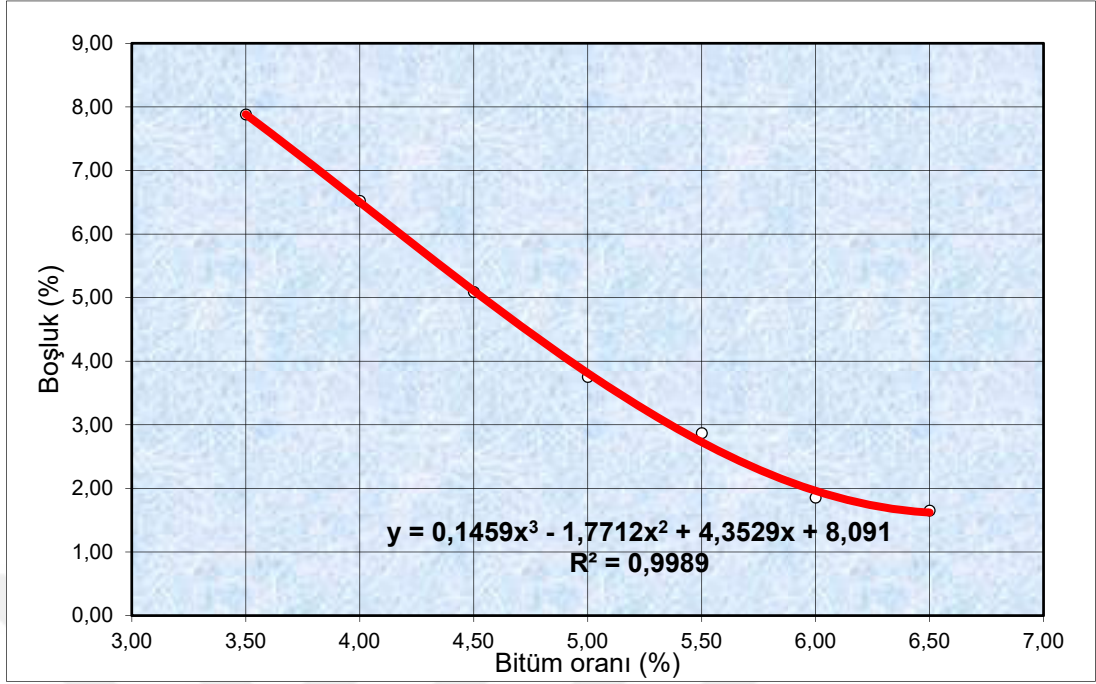
Şekil 5.7. Stabllite-Bitüm oranı



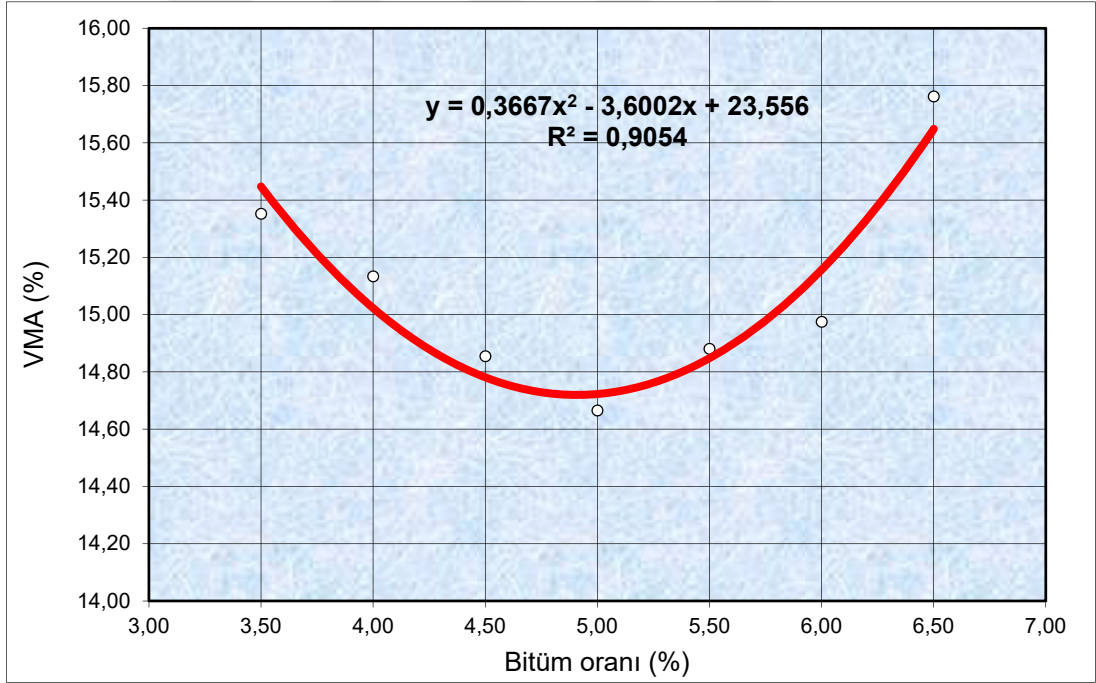
Şekil 5.8. Akma-Bitüm oranı



Şekil 5.9. VFA-Bitüm oranı



Şekil 5.10. Boşluk oranı-Bitüm oranı



Şekil 5.11. VMA-Bitüm oranı

Optimum bitüm yüzdesi ile deney planına göre $16 \times 3 = 48$ adet karışım hazırlanarak Marshall numuneleri dökülmüştür. Stabilite deney sonuçları ve hesaplanan değerleri Tablo 5.21’de verilmiştir.

Tablo 5.21. Optimum bitüm yüzdesi ile Marshall stabilite deney sonuçları

Deney No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort.} (mm)	W _{hava} (g)	W _{su} (g)	W _{doy.} (g)	V (cm ³)	D _p (g/cm ³)	D _t (g/cm ³)	V _h (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düz. Fak.	Düz. Stabilite (kg)	M/Q (kg/m ³)
1A	62,10	62,00	62,30	62,13	1.198,6	705,0	1.199,6	494,6	2,423					3,86	1.025	1,04	1.061	
1B	62,40	62,60	62,80	62,60	1.197,3	698,6	1.198,2	499,6	2,397					3,62	1.057	1,02	1.080	
1C	62,40	62,90	62,50	62,60	1.198,5	700,6	1.200,1	499,5	2,399					3,77	1.045	1,02	1.068	
									2,406	2,51	4,28	14,84	71,15	3,75			1.070	285
2A	62,40	62,40	62,80	62,53	1.196,2	698,8	1.197,6	498,8	2,398					4,04	831	1,02	851	
2B	63,20	62,80	62,80	62,93	1.192,1	693,0	1.195,3	502,3	2,373					3,92	843	1,01	854	
2C	63,40	62,90	63,00	63,10	1.191,9	693,5	1.194,8	501,3	2,378					3,98	857	1,01	865	
									2,383	2,51	5,21	15,66	66,73	3,98			857	215
3A	61,70	61,50	61,80	61,67	1.195,9	696,2	1.197,1	500,9	2,388					4,50	993	1,05	1.042	
3B	61,50	61,80	62,10	61,80	1.192,6	697,3	1.193,8	496,5	2,402					4,70	996	1,04	1.040	
3C	62,40	61,80	62,00	62,07	1.195,1	696,6	1.196,0	499,4	2,393					4,75	1.019	1,04	1.057	
									2,394	2,51	4,77	15,27	68,78	4,65			1.046	225
4A	61,80	61,80	61,90	61,83	1.188,9	696,4	1.191,3	494,9	2,402					4,19	920	1,04	960	
4B	62,50	62,40	62,40	62,43	1.188,8	694,4	1.191,8	497,4	2,390					3,97	953	1,03	978	
4C	62,40	62,50	62,40	62,43	1.197,3	700,7	1.198,9	498,2	2,403					4,14	920	1,03	945	
									2,399	2,51	4,60	15,12	69,60	4,10			961	234
5A	61,50	61,70	61,80	61,67	1.189,2	697,7	1.193,4	495,7	2,399					4,53	1.270	1,05	1.331	
5B	61,70	61,90	61,80	61,80	1.190,1	699,5	1.194,2	494,7	2,406					4,40	1.279	1,04	1.336	
5C	61,40	61,90	61,70	61,67	1.189,7	696,4	1.194,8	498,4	2,387					4,66	1.281	1,05	1.343	
									2,397	2,51	4,65	15,16	69,36	4,53			1.337	295
6A	62,70	63,20	62,90	62,93	1.193,9	698,1	1.197,0	498,9	2,393					3,65	949	1,01	961	
6B	62,60	62,20	62,50	62,43	1.190,1	695,0	1.191,7	496,7	2,396					3,55	949	1,03	974	
6C	62,60	62,90	62,50	62,67	1.196,6	700,7	1.198,6	497,9	2,403					3,51	947	1,02	967	
									2,397	2,51	4,64	15,15	69,39	3,57			967	271
7A	61,90	61,90	61,70	61,83	1.194,2	698,7	1.195,2	496,5	2,405					4,11	1.161	1,04	1.211	
7B	61,70	61,60	61,70	61,67	1.197,5	699,6	1.198,3	498,7	2,401					4,08	1.172	1,05	1.229	
7C	62,00	62,00	62,40	62,13	1.198,5	700,1	1.199,2	499,1	2,401					4,11	1.169	1,04	1.210	
									2,403	2,51	4,43	14,97	70,39	4,10			1.217	297
8A	62,00	61,70	61,80	61,83	1.193,5	701,7	1.195,0	493,3	2,419					4,05	1.016	1,04	1.061	
8B	63,20	62,80	63,20	63,07	1.197,1	700,3	1.199,6	499,3	2,398					3,99	1.058	1,01	1.068	
8C	62,70	62,40	62,60	62,57	1.194,6	698,7	1.199,6	500,9	2,385					3,93	1.054	1,02	1.079	
									2,401	2,51	4,51	15,04	70,00	3,99			1.069	268

9A	62,10	61,70	62,10	61,97	1.196,2	700,2	1.198,8	498,6	2,399						3,60	1.126	1,04	1.171	
9B	61,60	61,80	61,80	61,73	1.195,6	699,9	1.197,8	497,9	2,401						3,52	1.124	1,05	1.177	
9C	62,10	61,90	61,80	61,93	1.193,9	700,4	1.195,0	494,6	2,414						3,50	1.136	1,04	1.182	
									2,405	2,51	4,35	14,89	70,81		3,54			1.177	332
10A	62,90	62,60	63,00	62,83	1.192,6	694,6	1.194,8	500,2	2,384						3,35	936	1,02	951	
10B	61,90	62,20	62,00	62,03	1.190,9	699,0	1.192,2	493,2	2,415						3,24	921	1,04	956	
10C	61,60	61,90	61,80	61,77	1.192,6	701,7	1.193,8	492,1	2,423						3,28	925	1,05	967	
									2,407	2,51	4,24	14,80	71,35		3,29			958	291
11A	61,50	61,10	61,60	61,40	1.191,6	696,8	1.192,5	495,7	2,404						3,20	975	1,06	1.030	
11B	61,70	61,60	61,80	61,70	1.190,5	698,2	1.192,2	494,0	2,410						3,10	999	1,05	1.047	
11C	62,10	62,20	62,00	62,10	1.189,0	697,3	1.190,4	493,1	2,411						3,33	1.003	1,04	1.039	
									2,408	2,51	4,20	14,77	71,53		3,21			1.039	324
12A	62,00	62,10	62,30	62,13	1.197,7	704,7	1.198,8	494,1	2,424						3,54	1.141	1,04	1.181	
12B	62,00	62,40	62,10	62,17	1.197,1	699,1	1.197,9	498,8	2,400						3,41	1.160	1,03	1.200	
12C	62,40	62,60	62,40	62,47	1.190,1	694,7	1.192,2	497,5	2,392						3,37	1.144	1,03	1.174	
									2,405	2,51	4,32	14,87	70,94		3,44			1.185	344
13A	62,00	62,10	62,40	62,17	1.195,3	701,2	1.196,7	495,5	2,412						3,60	1.056	1,03	1.092	
13B	62,10	62,00	62,30	62,13	1.194,7	700,7	1.196,2	495,5	2,411						3,59	1.060	1,04	1.097	
13C	62,20	62,10	62,10	62,13	1.198,0	703,4	1.199,8	496,4	2,413						3,55	1.051	1,04	1.088	
									2,412	2,51	4,05	14,63	72,32		3,58			1.092	305
14A	62,80	62,80	62,80	62,80	1.194,1	702,7	1.198,7	496,0	2,407						3,21	944	1,02	960	
14B	61,80	62,00	61,80	61,87	1.193,3	701,8	1.197,1	495,3	2,409						3,33	931	1,04	971	
14C	61,40	61,30	61,20	61,30	1.196,3	701,0	1.198,0	497,0	2,407						3,18	905	1,06	959	
									2,408	2,51	4,22	14,78	71,44		3,24			963	297
15A	62,10	62,30	62,40	62,27	1.193,9	699,0	1.195,2	496,2	2,406						3,84	1.048	1,03	1.081	
15B	62,60	62,60	62,80	62,67	1.192,9	696,6	1.194,5	497,9	2,396						3,72	1.073	1,02	1.095	
15C	61,90	61,30	61,50	61,57	1.191,1	700,5	1.192,8	492,3	2,419						3,66	1.039	1,05	1.092	
									2,407	2,51	4,25	14,81	71,29		3,74			1.089	291
16A	62,20	62,50	62,50	62,40	1.195,2	699,5	1.197,5	498,0	2,400						3,47	975	1,03	1.002	
16B	62,30	62,50	62,50	62,43	1.190,0	696,1	1.191,8	495,7	2,401						3,36	993	1,03	1.020	
16C	62,10	61,80	62,20	62,03	1.194,0	702,2	1.195,6	493,4	2,420						3,40	961	1,04	998	
									2,407	2,51	4,26	14,82	71,23		3,41			1.007	295
Şartname Limitleri											4-6	13-15	60-75	2-4				> 750	

Taguchi Yöntemi ile hesaplanan stabilite üzerindeki ortalama S/N etkileri Tablo 5.22’te verilmiştir. En büyük en iyi performans istatistiği kullanılarak stabiliteyi maksimum yapan optimum seviyeler Tablo 5.23’de görüldüğü üzere A2, B1, C2, D1 olarak bulunmuştur. Doğrulama deneyinin sonunda 1286,57 kg stabilite değeri elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri 62,190 'tır. Bu değer %95 güven seviyesinde 62,139 ile 63,220 arasındadır. Stabilite üzerinde en büyük etkiyi 0,828 değeri ile sıcaklığın yaptığı görülmektedir. Bunu sırasıyla katkı oranı, karıştırma hızı ve karıştırma süresi izlemiştir.

Tablo 5.22. Marshall stabilite ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	59,823	61,321	60,171	60,860
2. Seviye	61,130	59,417	60,848	60,084
3. Seviye	60,710	60,792	60,515	60,649
4. Seviye	60,310	60,442	60,438	60,380

Tablo 5.23. Marshall stabilite performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N’ e olan katkıları
Cecabase	A2	0,637
Sıcaklık	B1	0,828
Süre	C2	0,355
Hız	D1	0,367
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		2,186
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		60,493
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (kg)		62,679 / 1361,337
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (kg)		62,190 / 1286,570
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		62,139 / 63,220

Stabilite bitümlü kaplamaların deformasyonlara karşı koyabildiği en yüksek yükü; akma değeri ise bu yük değerine ulaşıldığında oluşan düşeyde meydana gelen deformasyonu belirtmektedir (Geçkil, AKSAĞAN, vd., 2021). Stabilite değeri katkı maddesinin %0,2 oranına kadar artmış, daha yüksek oranlarda ise azalmıştır. Ancak bu azalışa rağmen elde edilen stabilite değerleri saf bitümle hazırlanan numunelerin stabilite değerlerinden daha yüksek olmuştur. Deney planı esas alınarak yapılan deneylerde en yüksek stabilite değeri saf bitümle hazırlanan karışımlara göre %29,515 artışla 1336,59 kg olmuştur. Stabilite değerini maksimum yapan optimum seviyelere göre hesaplanan stabilite değeri ise saf bitümle hazırlanan karışımlara göre %31,913 artışla 1361,337kg olmuştur. Anand vd. (2023) benzer şekilde, Cecabase ilave ederek hazırladıkları IKA Marshall numunelerinin, BSK kontrol numuneler kadar iyi hatta daha iyi performans gösterdiklerini belirtmişlerdir.

Katkı maddesi oranının artması ile akma değeri azalmış, Marshall katsayısı (MQ) oranı ise artmıştır. MQ, karışımların sertliklerini ve aynı zamanda tekerlek izine ve çeşitli deformasyonlara karşı dirençlerini gösteren önemli bir parametredir (Geçkil, Önal, vd., 2021; Adnan vd., 2022). Cecabase RT BIO10 katkı maddesinin karışımlara çeşitli oranlarda eklenmesiyle, MQ yükselerek kalıcı deformasyona karşı daha fazla direnç sağlamıştır.

5.9. Çoklu Yanıt Performans İndeksi (MRPI) ile Optimizasyon

Taguchi optimizasyonunda yalnızca bir bağımlı değişken (tepki) dikkate alınmış ve S/N performans istatistiklerine göre RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası, RTFOT kütle kaybı, elastik geri dönme ve Marshall stabilitesi için en uygun seviyeler bulunmuştur.

Ancak uygulamada bizim çalışmamızda olduğu gibi daha fazla bağımlı değişken mevcuttur. Taguchi yöntemi literatürü öncelikli olarak tek bir yanıt senaryosuna odaklanmıştır. Çok yanıtlı problemleri optimize etmek için Taguchi yöntemi doğrudan kullanılamamıştır. Ancak Taguchi tasarımları kullanılarak her bir yanıt için elde edilen veriler, çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen farklı yaklaşımlarla analiz edilebilir (Çolak vd., 2023). Jeyapaul vd. (2005) Taguchi yönteminde çok yanıtlı problemlerin çözümüne ilişkin bir literatür taraması sunmuştur.

Bu çalışmada, çoklu yanıtları tek bir yanıtla dönüştürmek için Ağırlıkların Atanması Yöntemi kullanılmıştır (Krishnaiah ve Shahabudeen, 2012). En büyük - en iyi performans istatistiği kullanılarak elde edilen Taguchi Metodu sonuçlarında, 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 kullanılarak hesaplanan S/N değerleri için ise (RTFOT öncesi ve sonrası yumuşama noktası, RTFOT kütle kaybı) ters normalizasyon prosedürü kullanılmıştır.

MRPI ağırlıklı bir skor olduğundan optimal seviyeler maksimum MRPI değerlerine göre belirlenmiştir. Ağırlık Atanması Yöntemi kullanılarak S/N değerleri ile hesaplanan ağırlıklar ve çoklu yanıt performans indeksleri (MRPI) Tablo 5.24'te sunulmuştur. MRPI ortalama S/N etkileri Tablo 5.25'te verilmiştir.

Tablo 5.24. 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	35,67	0,062	31,12	0,061	-34,79	0,062	-35,96	0,062	-33,88	0,061	12,04	0,038	60,59	0,063	1,870
2	35,72	0,062	31,56	0,061	-34,65	0,062	-36,03	0,062	-33,94	0,061	13,06	0,041	58,66	0,061	1,773
3	35,58	0,061	31,65	0,062	-34,54	0,062	-35,85	0,062	-34,05	0,061	13,98	0,044	60,39	0,062	2,060
4	35,55	0,061	31,98	0,062	-34,56	0,062	-35,92	0,062	-33,91	0,061	14,81	0,047	59,66	0,062	2,080
5	36,59	0,063	32,06	0,062	-34,59	0,062	-35,93	0,062	-33,49	0,062	19,08	0,061	62,52	0,065	3,041
6	35,40	0,061	30,87	0,060	-34,58	0,062	-35,99	0,062	-33,18	0,063	20,00	0,063	59,71	0,062	2,508
7	36,76	0,063	31,53	0,061	-34,42	0,062	-35,96	0,062	-33,28	0,062	23,23	0,074	61,70	0,064	3,450
8	36,37	0,063	32,04	0,062	-34,33	0,063	-35,83	0,062	-33,47	0,062	23,52	0,075	60,58	0,063	3,365
9	36,43	0,063	32,49	0,063	-34,40	0,062	-35,56	0,063	-33,05	0,063	22,61	0,072	61,41	0,063	3,401
10	36,73	0,063	32,64	0,064	-34,08	0,063	-35,58	0,063	-32,95	0,063	22,92	0,073	59,62	0,062	3,278
11	36,87	0,064	32,70	0,064	-34,03	0,063	-35,56	0,063	-32,89	0,063	22,28	0,071	60,33	0,062	3,299
12	37,09	0,064	32,89	0,064	-34,16	0,063	-35,74	0,063	-33,04	0,063	23,23	0,074	61,47	0,064	3,632
13	37,03	0,064	33,23	0,065	-34,21	0,063	-35,58	0,063	-32,75	0,063	21,94	0,070	60,77	0,063	3,394
14	35,78	0,062	32,06	0,062	-34,42	0,062	-35,85	0,062	-32,62	0,064	21,58	0,068	59,67	0,062	2,903
15	35,70	0,062	32,49	0,063	-34,29	0,063	-35,76	0,063	-32,73	0,063	20,83	0,066	60,74	0,063	2,979
16	36,09	0,062	32,59	0,063	-34,08	0,063	-35,65	0,063	-32,68	0,064	20,00	0,063	60,06	0,062	2,848

Tablo 5.25. MRPI ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Cecabase	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	1,95	2,93	2,63	2,96
2. Seviye	3,09	2,62	2,86	2,96
3. Seviye	3,40	2,95	2,93	2,81
4. Seviye	3,03	2,98	3,05	2,74

Yapılan tüm deneylerden elden edilen yanıtların tek bir yanıtla dönüştürülmesi ile elde edilen MRPI sonuçları için optimum seviyeler Tablo 5.26’da verildiği gibi A3, B4, C4 ve D1 olarak bulunmuştur. Çoklu yanıt performans indislerine en yüksek etkiye sahip parametreler sırasıyla Cecabase RT BIO10 oranı, süre, sıcaklık ve hız olmuştur.

Tablo 5.26. MRPI performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N’ e olan katkıları
Cecabase	A3	0,535
Sıcaklık	B4	0,114
Süre	C4	0,183
Hız	D1	0,096
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,928
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		2,867

MRPI optimum seviyeleri için yapılan doğrulama deney sonuçları ve performans istatistikleri Tablo 5.27’de verilmiştir. MRPI için yapılan doğrulama deney sonuçları %95 güven aralığında hesaplanan sınırlar içerisinde bulunmuştur.

Tablo 5.27 MRPI performans istatistikleri ve doğrulama deney sonuçları

	Penetrasyon (RTFOT Öncesi)		Penetrasyon (RTFOT Sonrası)		Yumuşama Noktası (RTFOT Öncesi)		Yumuşama Noktası (RTFOT Sonrası)		Marshall Stabilite	
MRPI Optimum Şartlarında Beklenen Değer	37,268	S/N	32,943	S/N	-34,066	S/N	-35,637	S/N	60,970	S/N
	73,010	0,1 mm	44,378	0,1 mm	50,502	C ⁰	60,511	C ⁰	1118,192	kg
Doğrulama Deney Sonucu	37,013	S/N	32,690	S/N	-34,134	S/N	-35,577	S/N	61,331	S/N
	70,900	0,1 mm	43,100	0,1 mm	50,900	C ⁰	60,100	C ⁰	1165,580	kg
S/N Güven Aralığı ($\alpha=95\%$)	36,855	37,680	32,516	33,371	-34,139	-33,993	-35,720	-35,554	60,430	61,511

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, modifiye edilmiş bitümün optimum Cecabase RT BIO10 miktarını belirleyebilmek için Taguchi Optimizasyonu kullanılmıştır. Burada amaç Cecabase RT BIO10 katkı oranının, karıştırma sıcaklığının, karıştırma süresinin ve karıştırma hızının optimum kombinasyonunu belirlemektir. Taguchi metoduna göre en büyük en iyi, en küçük en iyi ve nominal en iyi olmak üzere üç tane performans istatistiği vardır. Yapılan çalışmanın durumuna göre bu üç istatistikten bir tanesi seçilebilmektedir. Bu çalışmada penetrasyon, elastik geri dönme ve Marshall stabilitesi deneyleri için en büyük en iyi performans istatistiği seçilerek elde edilen sonuçların en büyük olması en iyi durum olarak değerlendirilmiştir. Yumuşama noktası ve RTFOT kütle kaybı deneyleri için ise en küçük en iyi performans istatistiği seçilerek elde edilen sonuçların en küçük olması en iyi durum olarak değerlendirilmiştir.

Tam faktöriyel deney tasarımı, seçilen parametreler değiştirilirken diğer tüm parametreler sabit tutulur. Bu çalışmada, Taguchi Yöntemi kullanılsaydı her deney için (penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönme, Marshall stabilitesi vb.) 256'şar adet deney yapılması gerekecekti. Ancak Taguchi Metodu kullanılarak her deney tipi için 16 deney yapılmıştır. Toplamda $7 \times 16 = 112$ deney yapılarak optimum seviyeler belirlenmiştir.

RTFOT öncesinde penetrasyon değerini maksimuma çıkaran optimum seviyeler sırasıyla A3, B1, C4, D2 olmuştur. Penetrasyon değeri üzerinde en etkili parametreler sırasıyla katkı oranı ve karıştırma süresi olmuştur. Penetrasyon değeri katkı maddesinin %0,4 oranına kadar artmış, %0,5 oranında ise bir miktar azalmıştır. Karıştırma süresinin artması ile penetrasyon değerinde artış görülmüştür. Karıştırma hızı 2000 RPM'e kadar penetrasyon değerinde artışa, daha yüksek hızlarda ise azalışa sebep olmuştur. RTFOT öncesi saf bitümün penetrasyon değeri 67,19 (0,1mm) olarak bulunmuştur. Yapılan deneylerde penetrasyon değeri 58,90 – 71,53 (0,1mm) aralığında değişmiştir.

RTFOT sonrasında penetrasyon değerini maksimuma çıkaran optimum seviyeler sırasıyla A3, B4, C4, D2 olmuştur. Penetrasyon değeri katkı maddesinin %0,4 oranına kadar artmış, %0,5 oranında ise bir miktar azalmıştır. Karıştırma sıcaklığının ve süresinin artması ile penetrasyon değerinde artış görülmüştür. Karıştırma hızı 2000 RPM'e kadar

penetrasyon değeri artısa, daha yüksek hızlarda ise azalışa sebep olmuştur. RTFOT sonrası saf bitümün penetrasyon değeri 38,87 (0,1mm) olarak bulunmuştur. Yapılan deneylerde penetrasyon değeri 34,97 – 45,87 (0,1mm) aralığında değişmiştir.

Penetrasyon değeri, bitümün test sıcaklığındaki kıvamının bir göstergesidir. Daha yüksek penetrasyon değerlerine sahip bitüm daha yumuşak veya daha akışkandır, daha düşük penetrasyon değerleri ise daha sert veya daha viskoz bitümü gösterir (Błażejowski vd., 2014). Genel olarak, soğuk iklimlerde çatlama potansiyeline karşı koymak için daha yüksek penetrasyon değerlerine sahip bağlayıcılar kullanılırken, daha sıcak iklimlerde tekerlek izi oluşma potansiyeline karşı daha düşük penetrasyon değerlerine sahip bağlayıcılar kullanılır (Mirza vd., 2011).

RTFOT öncesinde yumuşama noktası değerini minimum yapan optimum seviyeler sırasıyla A3, B4, C4, D2 olmuştur. Yumuşama noktası değeri katkı maddesinin %0,4 oranına kadar azalmış, %0,5 oranında ise bir miktar artmıştır. Karıştırma sıcaklığı yumuşama noktası üzerinde artışa neden olmuştur. Karıştırma süresinin etkisi minimum olmuştur. Karıştırma hızı 2000 RPM'e kadar yumuşama noktası değerinde azalışa, 3000 ve 4000 RPM'de ise artışa sebep olmuştur. RTFOT öncesi saf bitümün yumuşama noktası değeri 51,55 °C olarak bulunmuştur. Yapılan deneylerde yumuşama noktası değeri 50,30 – 54,90 °C aralığında değişmiştir.

RTFOT sonrasında yumuşama noktası değerini minimize eden optimum seviyeler sırasıyla A3, B1, C4, D2 olmuştur. Yumuşama noktası değeri katkı maddesinin %0,4 oranına kadar azalmış, %0,5 oranında ise bir miktar artmıştır. Karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve karıştırma hızının etkileri minimum olmuştur. RTFOT sonrası saf bitümün yumuşama noktası değeri 60,85 °C olarak bulunmuştur. Yapılan deneylerde yumuşama noktası değeri 60,00 – 63,30 °C aralığında değişmiştir.

RTFOT kütle kaybını en aza indiren optimum seviyeler sırasıyla A4, B2, C1, D1 olmuştur. Kütle kaybı değeri katkı maddesi oranının artması ile azalmıştır. Karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve karıştırma hızının etkileri az olmuştur. Saf bitümün kütle kaybı değeri % 0,44 olarak bulunmuştur. Yapılan deneylerde kütle kaybı değeri % 0,42 – 0,50 aralığında değişmiştir.

Elastik geri dönme değerini maksimuma çıkaran optimum seviyeler sırasıyla A3, B4, C4, D2 olmuştur. Elastik geri dönme değeri katkı maddesinin %0,4 oranına kadar artmış, %0,5 oranında ise bir miktar azalmıştır. Karıştırma sıcaklığının ve süresinin artması ile elastik geri dönme değerinde artış görülmüştür. Karıştırma hızı 2000 RPM'e kadar artışa, daha yüksek hızlarda ise azalışa sebep olmuştur. Saf bitümün elastik geri dönme değeri % 4,50 olarak bulunmuştur. Yapılan deneylerde elastik geri dönme değeri %4.00 – 15.00 aralığında değişmiştir.

Marshall stabilite değerini maksimuma çıkaran optimum seviyeler sırasıyla A2, B1, C2, D1 olmuştur. Stabilite değeri katkı maddesinin %0,2 oranına kadar artmış, daha yüksek oranlarda ise azalmıştır. Karıştırma sıcaklığının ve karıştırma hızının artması ile stabilite değerinde azalış görülmüştür. Karıştırma süresi 20 dakikaya kadar stabilite değerinde artışa, daha fazla sürelerde ise azalışa sebep olmuştur. Optimum bitüm oranı ile saf bitümlü karışımın stabilite değeri 1032 kg olarak bulunmuştur. Yapılan deneylerde stabilite değeri 856.73 – 1336.59 kg aralığında değişmiştir.

Gerek saf bitümde gerekse Cecabase RT BIO10 ile modifiye edilmiş bitümlerde TS EN ISO 2592'de istenen minimum 230°C sıcaklığın üstünde parlama noktaları elde edilmiştir. Bu nedenle Cecabase RT BIO10 katkı maddesi ile bitümün modifiye edilmesinde parlama noktası açısından bir sakınca görülmemiştir.

Cecabase RT BIO10, saf bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetini azaltmış, elastik geri dönme kabiliyetini ise artırmıştır. Dolayısıyla modifiye edilmiş karışımlar, yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonun yanı sıra düşük sıcaklıklardaki çatlama ve kırılmaya karşı daha dirençli hale gelmiştir.

IAK numuneleri ve BSK kontrol numuneleri için sıkıştırma sıcaklığı 160°C olarak alınmıştır. Katkı maddesi ile modifiye edilmiş karışımların Marshall stabilite değerleri saf bitümle 160°C'de karıştırılarak sıkıştırılan numunelerin stabilite değerlerinden daha yüksek olmuştur. Katkı maddesi oranının artması ile akma değeri azalmış, Marshall katsayısı (MQ) oranı ise artmıştır. Bu durum modifiye edilmiş karışımların, tekerlek izine ve çeşitli deformasyonlara karşı daha dirençli hale geldiklerini göstermiştir.

Çalışmada kullanılan 50/70 penetrasyonlu bitüm ile seçilen parametre ve seviyelerde hesaplanan MRPI sonuçlarına göre optimum seviyeler %0,4 Cecabase RT BIO10 oranı, 140°C karıştırma sıcaklığı, 30 dakika karıştırma süresi ve 1000 RPM karıştırma hızı olarak bulunmuştur. Katkı maddesi, optimum karıştırma sıcaklığını 140°C'ye düşürerek enerji tasarrufu ve çevresel avantajlar sağlamıştır. Ayrıca bitümün düşük sıcaklıkta karıştırılması bitümün daha az yaşlanarak daha yüksek performans göstermesini sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Buhari, R., Bakar, S. A., Kamaruddin, N. M., Nayan, N. and Yusoff, N. M. (2014) "Warm mix asphalt technology: a review", *Jurnal Teknologi*, 71(3), 39-52.
- Adnan, A. M., Luo, X., Lü, C., Wang, J. and 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.
- Almeida-Costa, A. and Benta, A. (2016) "Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt", *Journal of Cleaner Production*, 112, 2308-2317.
- Aman, A., Bhardwaj, R., Gahlot, P. and Kumar Phanden, R. (2023) "Selection of cutting tool for desired surface finish in milling Machine using Taguchi optimization methodology", *Materials Today: Proceedings*, 78, 444-448. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.253>
- Anand, S., Gaur, A. and 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.
- Arega, Z., Bhasin, A., Motamed, A. and Turner, F. (2011) "Influence of warm-mix additives and reduced aging on the rheology of asphalt binders with different natural wax contents", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(10), 1453-1459.
- ARKEMA. (2023) Warm Mix Asphalt Additives. Retrieved from <https://specialtysurfactants.arkema.com/en/functionalities/asphalt-bitumen/asphalt-additives/warm-mix-additives/>
- ASMÜD. (2023). Asfalt Mütahitleri Derneği. Retrieved from http://www.asmud.org.tr/Asfalt_Ilik_Karisim.asp
- Bairgi, B. K. and Tarefder, R. A. (2021) "Field performance characteristics of warm mix asphalt (WMA) with various additives", *Paper presented at the International Conference on Transportation and Development* 2021.
- Baş, F. İ., Bayrak, O. Ü. and Bayata, H. F. (2022) "A Practical Design Guide for Unbonded Jointed Plain Concrete Roads over Deteriorated HMA Roads: Realistic Traffic Loading", *Coatings*, 12(12), 1817.
- Behnood, A. (2020) "A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties", *Journal of Cleaner Production*, 259, 120817.

- Błażejowski, K., Olszacki, J. and Peciakowski, H. (2014) "Bitumen handbook", *Orlen Asfalt*, 2015.
- Bower, N., Wen, H., Wu, S., Willoughby, K., Weston, J. and DeVol, J. (2016) "Evaluation of the performance of warm mix asphalt in Washington state", *International Journal of Pavement Engineering*, 17(5), 423-434.
- Capayova, S., Unčík, S. and Cihlářová, D. (2018) "Experience with The Use of Warm Mix Asphalt Additives in Bitumen Binders", *Slovak Journal of Civil Engineering*, 26(1), 33-39.
- Capayova, S., Zuzulova, A., Hodakova, D. and Schlosser, T. (2017) "Influence of Chemical Additives on Asphalt Binder Properties", *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 17, 487-493.
- Carmen Rubio, M., Martinez, G., Baena, L. and Moreno, F. (2012) "Warm mix asphalt: an overview", *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84.
- Chen, S., You, Z., Sharifi, N. P., Yao, H. and Gong, F. (2019) "Material selections in asphalt pavement for wet-freeze climate zones: A review", *Construction Building Materials*, 201, 510-525.
- Cheraghian, G., Falchetto, A. C., You, Z., Chen, S., Kim, Y. S., Westerhoff, J. and Wistuba, M. P. (2020) "Warm mix asphalt technology: An up to date review", *Journal of Cleaner Production*, 268, 122128.
- Chowdhury, A. and Button, J. W. (2008) "A review of warm mix asphalt". *In: Texas Transportation Institute*.
- Çolak, M. A. (2012) "Ilık Asfalt Karışımları için Optimum Asphamin Oranının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum,
- Çolak, M. A., Zorlu, E., Çodur, M. Y., Baş, F. İ., Yalçın, Ö. and 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.
- Dokandari, P. A., Oner, J., Topal, A. and Sengoz, B. (2014) "Organik Ilık Karışım Asfalt Katkı Maddesinin Bitümlü Karışımların Yaşlanma Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(9), 332-337.
- Doyle, J. D., Rushing, J. F., Mejías-Santiago, M., McCaffrey, T. J., Warnock, L. C. and Taylor, M. K. (2013) "Laboratory performance testing of warm-mix asphalt technologies for airfield pavements", *Retrieved from*.
- EAPA. (2010) "The use of warm mix asphalt". *In EAPA position paper: European Asphalt Pavement Association Brussels*, Belgium.

- Ge, D., Yan, K., You, L. and Wang, Z. (2017) "Modification mechanism of asphalt modified with Sasobit and Polyphosphoric acid (PPA)", *Construction Building Materials*, 143, 419-428.
- Geçkil, T. (2019) "Physical, chemical, microstructural and rheological properties of reactive terpolymer-modified bitumen", *Materials*, 12(6), 921.
- Geçkil, T., Aksağan, Z. and İnce, C. B. (2021) "Asfalt kaplamaların nem performansı üzerinde siyah karbonun etkisi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(5), 2102-2115.
- Geçkil, T., Önal, Y. and İnce, C. B. (2021) "Atık PET ile modifiye edilmiş bitümlü sıcak karışımların nem direnci", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 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.
- Gonzalez Leon, J. A., Grampre, L. and Barreto, G. (2009) "Warm-mix asphalts with low-dosage chemical additives", *Retrieved from*.
- Gökalp, İ. (2021) "Investigation the Physical and Rheological Properties of Bitumen Modified with Warm Mix Asphalt Additive", *European Journal of Technique*, 11(2), 182-189.
- Hamzah, M. O., Jamshidi, A. and Shahadan, Z. (2010) "Evaluation of the potential of Sasobit® to reduce required heat energy and CO₂ emission in the asphalt industry", *Journal of Cleaner Production*, 18(18), 1859-1865.
- Hasan, M. R. M., You, Z., Porter, D., Goh, S. W. (2015b) "Laboratory moisture susceptibility evaluation of WMA under possible field conditions", *J. Construction and materials*, 101, 57-64.
- Hassan, M. (2010) "Evaluation of the environmental and economic impacts of warm-mix asphalt using life-cycle assessment", *International Journal of Construction Education Research*, 6(3), 238-250.
- Hurley, G. C. and Prowell, B. D. (2006a) "Evaluation of Evotherm for use in warm mix asphalt", *NCAT report*, 2, 15-35.
- Hurley, G. C. and Prowell, B. D. (2006b) "Evaluation of potential processes for use in warm mix asphalt (With Discussion)", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 75.
- İbiş, A. B. (2022) "Investigation Of Mechanical Properties Of Porous Asphalt Pavement With Warm Mix Asphalt Additive" Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

- Jeyapaul, R., Shahabudeen, P. and Krishnaiah, K. (2005) "Quality management research by considering multi-response problems in the Taguchi method—a review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 1331-1337.
- Karn, A. K., Agrawal, R., Kumar, A. and Mukhopadhyay, A. (2023) "Deposition and process parameter optimization of electroless Ni-B coating from a stabilizer free bath to achieve enhanced microhardness, scratch-hardness and adhesion using taguchi's methodology", *Engineering Research Express*, 5(3), 035036.
- Koh, S., Noda, S. and Taguchi, S. (2023) "Population Dynamics in the Biogenesis of Single-/Multi-Layered Membrane Vesicles Revealed by Encapsulated GFP-Monitoring Analysis", *Applied Microbiology*, 3(3), 1027-1036. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2673-8007/3/3/70>
- Kök, B. V., Yılmaz, M. and Akpolat, M. (2014) "Evaluation of the conventional and rheological properties of SBS+ Sasobit modified binder", *Construction Building Materials*, 63, 174-179.
- Köse, H. (2015) "Bitümlü ılık karışımların kimyasal buz çözücülere karşı direncinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yozgat.
- Krishnaiah, K. and Shahabudeen, P. (2012) "Applied design of experiments and Taguchi methods", *PHI Learning Private Limited*, New Delhi.
- Lav, A. H. and Lav, M. A. (2004) "Shell Bitüm El Kitabı", *İsfalt Bilimsel Yayınları*, No:3, İstanbul, 334s.
- Liu, J., Yan, K. and Liu, J. (2018) "Rheological properties of warm mix asphalt binders and warm mix asphalt binders containing polyphosphoric acid", *International Journal of Pavement Research Technology*, 11(5), 481-487.
- Ma, F., Luo, X., Huang, Z. and Wang, J. (2020) "Characterization of recovery in asphalt binders", *Materials*, 13(4), 920.
- Mercan, Ş. (2019). "Deney tasarımı ve yapay zeka tekniklerinden yararlanarak ürün kalitesinin geliştirilmesi" *Balikesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- Mirza, M. W., Abbas, Z. and Rizvi, M. A. (2011) "Temperature zoning of Pakistan for asphalt mix design", *Pakistan Journal of Engineering Applied Sciences*.
- Mola, E., Bayrak, O. Ü., Baş, F. İ. and Bayata, H. F. (2021) "Investigating the usability of Kevlar and steel fibers as a hybrid in concrete pavements", *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, *Yildiz Technical University Press*, İstanbul, Turkey, 39, 1-12.

- Naik, N., Bhat, R., Shivamurthy, B., Shetty, R., Parashar, P. R. and Hegde, A. L. (2023) "Statistical and Artificial Neural Network Coupled Technique for Prediction of Tribo-Performance in Amine-Cured Bio-Based Epoxy/MMT Nanocomposites", *Journal of Composites Science*, 7(9), 372. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2504-477X/7/9/372>
- 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.
- Ouni, A. E., Dony, A. and Colin, J. (2014) "Probabilistic parametric approach for rutting evaluation: application to hot and warm asphalt", *International Journal of Pavement Engineering*, 15(1), 58-65.
- Oylumluoğlu, J. (2012) "The utilization of recycled asphalt concrete with warm mix asphalt", The Degree Of Master Of Science, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Pamuk, Ö. C. (2019) "Effect of warm mix additives on compactability of mixtures", The Degree Of Master Of Science, *Middle East Technical University*, Ankara.
- Prowell, B. D., Hurley, G. C. and Crews, E. (2007) "Field performance of warm mix asphalt at the NCAT test track", *Paper presented at the 86th TRB Annual Meeting, Transportation Research Board*, Washington, DC.
- Punith, V., Xiao, F. and Amir Khanian, S. N. (2011) "Effects of moist aggregates on the performance of warm mix asphalt mixtures containing non-foaming additives", *Journal of Testing Evaluation*, 39(5), 1.
- Rajkumar, G., Saravanan, M., Bejathin, A. B. H., Sharma, S., Dwivedi, S. P., Kumar, R. and Singh, S. (2023) "Parametric Optimization of Powder-Mixed EDM of AA2014/Si3N4/Mg/Cenosphere Hybrid Composites Using Fuzzy Logic: Analysis of Mechanical, Machining, Microstructural, and Morphological Characterizations", *Journal of Composites Science*, 7(9), 380. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2504-477X/7/9/380>
- Rodríguez-Alloza, A. M., Malik, A., Lenzen, M. and Gallego, J. (2015) "Hybrid input–output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures", *Journal of Cleaner Production*, 90, 171-182.
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L. and Moreno, F. (2012) "Warm mix asphalt: an overview", *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84.
- Sengoz, B. and 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.
- Sharma, A., Mir, M. S. and Farooq, M. A. (2019) "Performance of WMA additives under freeze–thaw action", *Road Materials Pavement Design*, 20(6), 1468-1480.

- Sheth, N. M. (2010) "Evaluation of selected warm mix asphalt additives", *The University of Iowa*, Iowa City.
- Stienss, M. and Szydlowski, C. (2020) "Influence of selected warm mix asphalt additives on cracking susceptibility of asphalt mixtures", *Materials*, 13(1), 202.
- Sun, L. (2016) "Structural behavior of asphalt pavements: Intergrated analysis and design of conventional and heavy duty asphalt pavement" *Butterworth-Heinemann*.
- Sutton, C. (2003) "Hot mix blue smoke emissions", *Paper presented at the Australasian Flexible Pavements Industry Conference on Health, Safety and Environment*, 9th, 2003, Sydney, New South Wales, Australia.
- 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.
- Tunç, A. (2002) "Yol Mühendisliğinde Geoteknik Uygulamaları", *Atlas Yayın Dağıtım*, İstanbul.
- UN. (2021) "Global Population Growth and Sustainable Development", *Retrieved from UN: New York*, NY, USA, 2021.
- Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A. and Perveneckas, Z. (2009) "Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania", *The Baltic Journal of Road Bridge Engineering*, 4(2), 80-86.
- Valdés-Vidal, G., Calabi-Floody, A., Sanchez-Alonso, E., Díaz, C. and Fonseca, C. (2020) "Highway trial sections: Performance evaluation of warm mix asphalt and recycled warm mix asphalt", *Construction Building Materials*, 262, 120069.
- Xiao, F., Amirkhanian, S. N. and Zhang, R. (2012) "Influence of short-term aging on rheological characteristics of non-foaming WMA binders", *Journal of performance of Constructed Facilities*, 26(2), 145-152.
- Xu, S., Xiao, F., Amirkhanian, S. and Singh, D. (2017) "Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies—A review", *Construction Building Materials*, 142, 148-161.
- Yang, X., You, Z., Perram, D., Hand, D., Ahmed, Z., Wei, W. and Luo, S. (2019) "Emission analysis of recycled tire rubber modified asphalt in hot and warm mix conditions", *Journal of hazardous materials*, 365, 942-951.
- Yüknü, K., Öztürk, T. and Komut, M. (2021) "Bitümlü bağlayıcılar laboratuvar el kitabı", *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara.
- Zhao, P., Ren, R., Zhou, H., Ouyang, J., Li, Z. and Sun, D. (2021) "Preparation and properties of imidazoline surfactant as additive for warm mix asphalt", *Construction Building Materials*, 273, 121692.