



Termik Santral Taban Cürüflarının Sıcak Asfalt Betonu Özelliklerine Etkisi

Mustafa İNCE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2024

Effect of Thermal Plant Bottom Ash on Hot Asphalt Concrete Properties

Mustafa İNCE

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

July 2024

Termik Santral Taban Cürüflarının Sıcak Asfalt Betonu Özelliklerine Etkisi

Mustafa İNCE

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğı Uyarınca

İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı

Ulaştırma Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Murat KARACASU

Temmuz 2024

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Mustafa İNCE**'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Termik Santral Taban Cüruflarının Sıcak Asfalt Betonu Özelliklerine Etkisi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman :Prof. Dr. Murat KARACASU

İkinci Danışman : --

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Murat KARACASU

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Şafak BİLGİÇ

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Yaşar VİTOŞOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nuntarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Murat Karacasu danışmanlığında hazırlanmış olduğum “Termik Santral Taban Cürufıların Sıcak Asfalt Betonu Özelliklerine Etkisi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 26/07/2024

Mustafa İNCE

İmza

ÖZET

Dünya nüfusunun hızla artmasıyla birlikte doğal kaynaklara olan talep giderek artmaktadır. Bununla beraber kullanılabilir kaynak rezervi her geçen gün azalmaktadır. Buna paralel olarak endüstriyel üretim, inşaat ve yıkımlar sonucunda pek çok farklı atık ortaya çıkmaktadır. Çevresel ve ekonomik açıdan endişe verici bir konu haline gelen bu atık malzemelerin depolanacağı alanlar da sorun oluşturmaktadır.

Günümüzde birçok ülke bu tür atıkları yeniden kullanmanın ve dolayısıyla bunun neden olduğu ekonomik ve çevresel etkileri azaltmanın yollarını aramaktadır. Atık malzemeleri değerlendirmenin en yaygın yollarından biri, çok büyük miktarda malzeme kullanılan yol inşaatlarıdır. Atık malzemelerin yol yapım sektöründe kullanımı maliyet ve çevre açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma kapsamında ince agregalar termik santral taban cürufu içeren bitümlü sıcak karışımların asfalt betonunun performans özelliklerini nasıl ve ne ölçüde etkilediği incelenmiştir. Öğütme ve eleme teknikleri ile kırılıp parçalanmış atık, 0,425 mm'lik elekten geçebilecek malzemeye dönüştürülmüştür. Daha sonra ince tane ağırlığının %25, %50, %75 ve %100'ü oranında karıştırılarak numuneler oluşturulmuştur ve bu numuneler Marshall tasarımına tabi tutulmuştur. Marshall tasarımına ilave olarak numuneler üzerinde dinamik-statik sünme testleri uygulanmıştır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde ince agregalar yerine termik santral taban cürufunun asfalt betonunda %25 oranında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Termik santral taban cürufunun asfalt betonunda kullanılmasıyla çevre kirliliği önlenilecek ve ülke ekonomisine katkı, çevre ve sürdürülebilir yaşamla ilgili olmak üzere pek çok fayda sağlanabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, Marshall Deneyi, Asfalt Betonu, Geri Dönüşüm, Sünme Deneyi, Termik Santral Taban Cürufu.

SUMMARY

The need for natural resources is growing along with the world population's fast rise. However, the available resource reserves are decreasing day by day. Parallel to this, many different types of waste are generated as a result of industrial production, construction, and demolitions. The areas where these waste materials will be stored, which has become a concern both environmentally and economically, are also problematic.

Today, many countries are looking for ways to reuse this type of waste and thus reduce the economic and environmental impacts it causes. One of the most common ways of utilizing waste materials is road construction, where a very large amount of material is used. In terms of costs and the environment, waste material utilization is crucial in the road construction industry.

This study examined the effects of bituminous hot mixes using thermal power plant floor slag as fine aggregate on the features of asphalt concrete's performance, additionally the amount to which these effects occur. The waste was crushed and shredded by grinding and sieving techniques and transformed into a material that could pass through a 0.425 mm sieve. Then, samples were formed by mixing 25%, 50%, 75% and 100% of the fine grain weight and these samples were subjected to Marshall design. In addition to the Marshall design, dynamic-static creep tests were applied to the samples. After analyzing the test findings, it was determined that bottom ash from thermal power plants may be substituted for fine aggregate about 25 per cent of asphalt concrete. By using thermal power plant floor slag in asphalt concrete, environmental pollution can be prevented and many benefits, including contribution to the national economy, environment and sustainable living, can be achieved.

Keywords: Sustainability, Marshall Test, Asphalt Concrete, Recycling, Creep Test, Thermal Plant Bottom Ash.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında benden bilgisini ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Ulaştırma Anabilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Murat KARACASU'ya,

Değerli katkılarından dolayı Sayın Doç Dr. Mehmet CANBAZ, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şafak BİLGİÇ ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yaşar VİTOŞOĞLU Hocalarıma,

Uzun yıllar süren eğitim-öğretim hayatımın tamamında beni teşvik eden ve her zaman destekleyen çok değerli anne ve babama,

Tez süresince gösterdiği sabır ve anlayıştan dolayı çok kıymetli eşim Dr. Nihal İNCE hanımefendiye, çocuklarımız Hasan Hüseyin İNCE ve Ömer Ali İNCE'ye,

En içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. KARAYOLU YAPISAL ÖZELLİKLERİ.....	8
3.1. Karayolu Altyapıları	8
3.2. Karayolu Üstyapıları	8
3.2.1. Kompozit üstyapılar.....	9
3.2.2. Rijit üstyapılar.....	10
3.2.3. Esnek üstyapılar	10
3.2.3.1 <u>Sathi kaplama</u>	11
3.2.3.2 <u>Bitümlü sıcak karışım (BSK)</u>	12
4. KÖMÜRÜN TARİHİ, TANIMI VE ÖZELLİKLERİ.....	13
4.1. Kömürün Tanımı ve Tarihçesi	13
4.2. Kömürün Sınıflandırılması.....	14
4.3. Kömür Kullanımı	15
4.3.1. Elektrik.....	15
4.3.2. Çelik üretimi	15
4.3.3. Endüstri	15
4.3.4. Gaz ve sıvıya dönüştürme.....	16
4.4. Termik Santral.....	16
4.4.1. Termik santrallerin avantajları	16

İÇİNDEKİLER

Sayfa

4.4.2. Termik santrallerin dezavantajları	17
4.4.3. Türkiye'de termik santrallerde elektrik üretim oranları	18
5. MATERİYAL VE YÖNTEM	19
5.1. Agregalar.....	19
5.1.1. Agregaların sınıflandırılması	19
5.1.2. Agregaların şekle göre sınıflandırılması	19
5.1.2.1 Yuvarlak agregalar.....	19
5.1.2.2 Düzensiz agregalar.....	20
5.1.2.3 Açısal agregalar	20
5.1.2.4 Yassı agregalar.....	20
5.1.2.5 Uzun agregalar.....	20
5.1.2.6 Yassı ve uzun agregalar	21
5.1.3. Agregaların boyutlarına göre sınıflandırılması	21
5.1.3.1 İnce agregalar.....	22
5.1.3.2 Kaba agregalar	22
5.2. Bitüm.....	22
5.3. Termik Santral Taban Cürufırları	24
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
6.1. Agregalar Deneyleri	28
6.1.1. Elek Analizi	28
6.1.1.1 Deneyin yapılışı	29
6.1.1.2 Deney sonuçlarının hesaplanması.....	30
6.1.2. Los Angeles (aşınma kaybı) deneyi	33
6.1.2.1 Kullanılan deney aletleri	34
6.1.2.2 Deneyin yapılışı	34
6.1.2.3 Deney sonuçlarının hesaplanması.....	35
6.1.3. Yassılık indeksi deneyi	36
6.1.3.1 Kullanılan deney aletleri	36
6.1.3.2 Deneyin yapılışı	37

İÇİNDEKİLER

Sayfa

6.1.3.3 Deney sonuçlarının hesaplanması.....	37
6.1.4. Agrega birim hacim ağırlık deneyi	38
6.1.4.1 Kullanılan deney aletleri.....	38
6.1.4.2 Deney sonuçlarının hesaplanması.....	39
6.1.5. Özgül ağırlık ve su emme deneyi.....	41
6.1.6. Kaba agreg a özgül ağırlık ve su emme deneyi.....	41
6.1.6.1 Kullanılan deney aletleri.....	41
6.1.6.2 Numune hazırlama ve deneyin yapılışı.....	42
6.1.6.3 Deney sonuçlarının hesaplanması.....	43
6.1.7. İnce agreg a özgül ağırlık ve su emme deneyi	45
6.1.7.1 Kullanılan deney aletleri.....	45
6.1.7.2 Numune hazırlama ve deneyin yapılışı.....	47
6.1.7.3 Deney sonuçlarının hesaplanması.....	47
6.1.8. Filler agreg a özgül ağırlık deneyi	49
6.1.8.1 Kullanılan deney aletleri.....	49
6.1.8.2 Deneyin yapılışı.....	50
6.1.8.3 Deney sonuçlarının hesaplanması.....	50
6.2. Karışım Deneyleri	52
6.2.1. Marshall tasarımı	52
6.2.1.1 Kullanılan deney aletleri.....	53
6.2.1.2 Asfalt betonu numunelerinin hazırlanması	56
6.2.2. Marshall stabilite ve akma deneyi.....	58
6.2.2.1 Deney sonuçlarının hesaplanması.....	60
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	65
7.1. Statik ve Dinamik Sünme Deneyi.....	72
7.1.1. Kullanılan deney aletleri.....	72
7.1.2. Deneyin yapılışı	74
7.1.3. Deney sonuçlarının hesaplanması.....	76

İÇİNDEKİLER

Sayfa

7.2. Ekonomik Analiz	79
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	83
EK AÇIKLAMALAR.....	90
Ek Açıklama-A.....	91
Ek Açıklama-B.....	96
Ek Açıklama-C.....	101
Ek Açıklama-D.....	106
Ek Açıklama-E	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Karayolu üstyapı enkesiti .	9
3.2. Tipik esnek kaplama kesiti.	10
5.1. Agregaların şekle göre sınıflandırılması.....	21
5.2. İnce ve kaba agregalar	22
5.3. TSTC atık	25
5.4. TSTC malzemesinin yüzey morfolojisi (X500)	25
5.5. TSTC malzemesinin yüzey morfolojisi (X2.5)	26
5.6. TSTC malzemesinin yüzey morfolojisi (X6)	26
6.1. Etüv, elekler ve terazi	29
6.2. Agreg a numunelerinin tane boyutu dağılımı	31
6.3. Kullanılan agreg a gradasyonu ve superpave tasarım limitleri	33
6.4. Los Angeles (aşınma kaybı) deney makinesi ve malzeme	35
6.5. Yassılık indeksi şablonu	37
6.6. Birim hacim ölçü kabı	39
6.7. Kaba agreg a, kafes örgülü sepet ve özgül ağırlık sehpası.	42
6.8. İnce agreganın özgül ağırlığının bulunması.	46
6.9. Filler agreganın özgül ağırlığının bulunması.....	50
6.10. Mikser, mikser ısıtma kabı, kürek ve şişleme çubuğu, numune kalıpları	54
6.11. Marshall test cihazı, sıcak su banyosu ve Marshall tokmağı.....	55
6.12. Kriko, sıcaklık ölçer ve kumpas	55
6.13. Agreg a numunelerinin hazırlanması.....	56
6.14. Agreg a ve bitüm karışımının hazırlanması.....	57
6.15. BSK numunesinin kalıba yerleştirilmesi ve kompaktör ile sıkıştırılması.	58
6.16. Kalıptan çıkarılmış numunelerin havadaki ve sudaki ağırlıklarının tespit edilmesi	59
6.17. Marshall test cihazı ve kırılmış numuneler.....	60
7.1. TSTC katkı oranı - OBO grafiğı.....	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.2. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık (PÖA) grafiği.....	66
7.3. Bitüm oranı - boşluk oranı (V) grafiği	67
7.4. Bitüm oranı - bitümle dolu boşluk oranı (VFA) grafiği	68
7.5. Bitüm oranı - Marshall stabilite (MS) grafiği.....	69
7.6. Bitüm oranı – Akma (F) grafiği.....	70
7.7. Bitüm oranı – Marshall katsayısı (MQ) grafiği	71
7.8. Bitüm oranı – VMA grafiği	72
7.9. Sünme deneyi set aletleri	74
7.10. Sünme ve yükleme çerçevesine yerleştirilmiş numuneler.....	75
7.11. Sünme deneyi numune genel bilgileri	75
7.12. Dinamik sünme modülü - Vuruş Sayısı grafiği	76
7.13. Birikimli şekil değiştirme miktarı - vuruş sayısı grafiği	77
7.14. Statik sünme modülü - zaman grafiği.....	78
7.15. Birikimli şekil değiştirme miktarı - zaman grafiği	79
A.1. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık grafiği (kontrol numunesi).....	92
A.2. Bitüm oranı - boşluk oranı grafiği (kontrol numunesi)	92
A. 3. Bitüm oranı - BDBO grafiği (kontrol numunesi)	93
A.4. Bitüm oranı - Marshall stabilite grafiği (kontrol numunesi)	93
A.5. Bitüm oranı - akma grafiği (kontrol numunesi).....	94
A.6. Bitüm oranı - Marshall katsayısı grafiği (kontrol numunesi)	94
A.7. Bitüm oranı - VMA grafiği (kontrol numunesi)	95
B.1. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık grafiği (%25 TSTC katkılı).....	97
B.2. Bitüm oranı - boşluk oranı grafiği (%25 TSTC katkılı)	97
B.3. Bitüm oranı - BDBO grafiği (%25 TSTC katkılı)	98
B.4. Bitüm oranı - Marshall stabilite grafiği (%25 TSTC katkılı)	98
B.5. Bitüm oranı - akma grafiği (%25 TSTC katkılı).....	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

B.6. Bitüm oranı - Marshall katsayısı grafiği (%25 TSTC katkılı)	99
B.7. Bitüm oranı - VMA grafiği (%25 TSTC katkılı)	100
C.1. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık grafiği (%50 TSTC katkılı)	102
C.2. Bitüm oranı - boşluk oranı grafiği (%50 TSTC katkılı)	102
C.3. Bitüm oranı - BDBO grafiği (%50 TSTC katkılı)	103
C.4. Bitüm oranı - Marshall stabilite grafiği (%50 TSTC katkılı)	103
C.5. Bitüm oranı - akma grafiği (%50 TSTC katkılı)	104
C.6. Bitüm oranı - Marshall katsayısı grafiği (%50 TSTC katkılı)	104
C.7. Bitüm oranı - VMA grafiği (%50 TSTC katkılı)	105
D.1. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık grafiği (%75 TSTC katkılı)	107
D.2. Bitüm oranı - boşluk oranı grafiği (%75 TSTC katkılı)	107
D.3. Bitüm oranı - BDBO grafiği (%75 TSTC katkılı)	108
D.4. Bitüm oranı - Marshall stabilite grafiği (%75 TSTC katkılı)	108
D.5. Bitüm oranı - akma grafiği (%75 TSTC katkılı)	109
D.6. Bitüm oranı - Marshall katsayısı grafiği (%75 TSTC katkılı)	109
D.7. Bitüm oranı - VMA grafiği (%75 TSTC katkılı)	110
E.1. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık grafiği (%100 TSTC katkılı)	112
E.2. Bitüm oranı - boşluk oranı grafiği (%100 TSTC katkılı)	112
E.3. Bitüm oranı - BDBO grafiği (%100 TSTC katkılı)	113
E.4. Bitüm oranı - Marshall stabilite grafiği (%100 TSTC katkılı)	113
E.5. Bitüm oranı - akma grafiği (%100 TSTC katkılı)	114
E.6. Bitüm oranı - Marshall katsayısı grafiği (%100 TSTC katkılı)	114
E.7. Bitüm oranı - VMA grafiği (%100 TSTC katkılı)	115

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. Bitüm özellikleri	23
5.2. TSTC'nin XRF analiz sonuçları	27
6.1. Aşınma tabakası tip-1 için agrega gradasyonu ve şartname limitleri	31
6.2. Superpave agrega gradasyonu ve şartname limitleri	33
6.3. Los Angeles deneyi sonuçları	37
6.4. Agrega boyutlarına göre alınması gereken minimum malzeme miktarları	37
6.5. Agrega sıkışık birim hacim ağırlık deneyi sonucu	41
6.6. Agrega gevşek birim hacim ağırlık deneyi sonucu	41
6.7. Kaba agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi sonucu	45
6.8. İnce agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi sonucu	49
6.9. Filler agrega özgül ağırlık deneyi sonucu	52
6.10. Agregaların fiziksel özellikleri	53
6.11. Marshall tasarım kriterleri	62
6.12. Kontrol numunelerinin deney sonuçları	63
6.13. %25 TSTC katkılı numunelerin deney sonuçları	64
6.14. %50 TSTC katkılı numunelerin deney sonuçları	64
6.15. %75 TSTC katkılı numunelerin deney sonuçları	65
6.16. %100 TSTC katkılı numunelerin deney sonuçları	65
7.1. Katkısız, %25, %50, %75 ve %100 TSTC katkılı agrega ile oluşturulmuş 1 km'lik yolun maliyet analizi	80
A.1. Kontrol (katkısız) Marshall deney sonuçları	91
B.1. %25 TSTC katkılı Marshall deney sonuçları	96
C.1. %50 TSTC katkılı Marshall deney sonuçları	101
D.1. %75 TSTC katkılı Marshall deney sonuçları	106
E.1. %100 TSTC katkılı Marshall deney sonuçları	111

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

Açıklama

TSTC	Termik Santral Taban Cürufu
G_{ag}	Agreganın Özgöl Ağırlığı (kg/m^3)
D_t	Maksimum Teorik Özgöl Ağırlık (kg/m^3)
%KA	Kaba Agrega Yüzdesi
%İA	İnce Agrega Yüzdesi
%F	Filler Yüzdesi
%B	Bitüm Yüzdesi
G_{KA}	Kaba Agrega Özgöl Ağırlığı (gr/cm^3)
$G_{İA}$	İnce Agrega Özgöl Ağırlığı (gr/cm^3)
G_F	Filler Özgöl Ağırlığı (gr/cm^3)
G_B	Bitüm Özgöl Ağırlığı (gr/cm^3)
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
BHAs	Sıkı Birim Hacim Ağırlık
BHAg	Gevşek Birim Hacim Ağırlık
SKA	Seramik Kek Atık
D_p	Birim Ağırlık
V	Hava Boşluğu
VFA	Bitümle Dolu Boşluk Oranı
VMA	Agregalar Arası Boşluk oranı
MS	Marshall Dayanımı
MQ	Marshall katsayısı
OBO	Optimum Bitüm Oranı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRF	Dalga Boyu Dağılımlı X-ışını Floresans Spektrometresi
ICP-MS	İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi
LVDT	Linear Variable Displacement Transducers

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Kısaltmalar****Açıklama**

PCC

Portland Çimento Betonu

F

Akma

PÖA

Pratik Özgöl Ağırlık

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzde nüfusun hızlı artışı, enerji kaynaklarının hızla tükenmesi ve atık bertaraf sorunları bilim insanlarını yeni çözümler aramaya yöneltmiştir. Sanayi, teknolojinin gelişimi ve dünya nüfusunun sürekli artması sonucunda doğal kaynaklar azalmıştır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarına ve hammaddeye olan talep artmıştır. Atıkların hammadde kaynağı olarak görülmesiyle kullanılmış hammaddelerin yeniden kullanılması büyük önem kazanmış ve ülkeleri enerjiyi etkin bir şekilde kullanmaya ve geliştirmeye yöneltmiştir.

Doğal kaynakların (hammadde ve enerji) hızlı tüketimi, doğal hammadde eksikliği başta olmak üzere önemli sorunları da beraberinde getirmiştir. Birçok ülke ve uluslararası kuruluş bu sorunları en aza indirmeye ve atıkları yeni düzenlemelere göre yeniden kullanmaya çalışmaktadır (Bayraktar, 2019). Diğer taraftan endüstriyel üretim sonucu oluşan atık miktarı da her geçen gün artmaktadır. Çevresel atık toplama alanları sınırlıdır ve bu toplama alanları görsel kirlilik oluşturmaktadır (Buzkan ve Onur, 2020). Tüm bu sorunlar göz önünde bulundurulduğunda depolama sorunu yaratan atık malzemeler yeniden değerlendirilebilecek ve böylece ilgili ürünlerin üretim maliyetleri azalırken çevrenin korunması da sağlanabilecektir. Diğer taraftan geri dönüşüm uzun vadeli bir ekonomik yatırımdır. Hammaddelerin bulunabilirliği ve doğal kaynakların hızla tükenmesi ekonomik sorunların artmasına yol açabilir. Dolayısıyla geri dönüşümün ekonomi üzerinde olumlu etkileri vardır. (Ferdousvd, 2021). Bu nedenle dünya çapında farklı üretim alanlarında atık kullanımı ve geri dönüşüm çalışmaları hız kazanmıştır. Bu üretim alanlarından biri de yol yapım sektörüdür (Karacasu ve Wafaie, 2023). Bu atıkların sıcak karışım asfaltta katkı maddesi olarak kullanılması çevresel tehlikelerin en aza indirilmesi ve ekonomik açıdan katkı sağlanması açısından oldukça önemlidir.

Araştırma çalışmaları, sıcak karışım asfaltın (HMA) mukavemetinin dolgu maddesi, agrega türü ve bitüm sınıfı gibi farklı faktörlere bağlı olduğunu göstermiştir. Bunlar arasında dolgu maddesi, özellikle karışım uyumluluğu ve agrega-bitüm yapışması ile ilgili olarak HMA'nın çeşitli özelliklerinde önemli bir rol oynar (Gardiner ve Epps, 2009). Ayrıca,

işlenebilirlik, nem hassasiyeti, sertlik, dayanıklılık, yorulma davranışı ve HMA'nın uzun vadeli özellikleri gibi çeşitli HMA özelliklerini de etkiler (Yan vd, 2013). Dolgu maddeleri, fiziksel ve kimyasal özellikler, şekil ve doku, boyut ve derecelendirme açısından farklılık gösterir. Bu nedenle, HMA'nın ideal performansı için uygun dolgu maddesinin seçimi çok önemlidir (Muniandy ve Aburkaba, 2011). Günümüzde çevresel ve ekonomik kaygılar nedeniyle geri dönüştürülmüş atık malzemelerin yol kaplamalarında kullanımı önemli ölçüde artmıştır (Yılmaz vd, 2011). Kömür külü, yol yapımında kullanılan en yaygın atıklardan biridir ve tüm dünyada inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Colonna vd, 2012).

Kömür bol ve ucuz bir enerji kaynağıdır. Kömür, tarih boyunca birçok ülkenin sanayileşmesine yardımcı olmuştur ve günümüzde de devam etmektedir. Günümüz enerji sisteminin önemli bir oyuncusu olup dünya elektriğinin %40'ını sağlamaktadır. Kömür çoğunlukla karbondan oluştuğu için yakıldığında en fazla karbondioksit gazı çıkaran fosil yakıttır. Kömür ayrıca kirlilik sorununa neden olan kükürt, nitrojen, civa ve ağır metaller gibi diğer elementleri de içerir. Ayrıca kömürle ilgili en büyük endişelerden biri de termik santral dip cürufu adı verilen ve yandıktan sonra santrallerin altında kalan atık malzemedir. Bu da insanlara zararlı çevresel etkiler ve güvenlik sorunları getirmektedir (Akyazılı, 2009).

Bu çalışmada Kütahya ilindeki Seyitömer Termik Santral fabrikasından elde edilen termik santral taban cürufu (TSTC) öğütülmüş ve asfalt betonunun bileşenlerinden biri olan ince agrega sınıfı 0,425 mm altı agregalar ile karıştırılmıştır. Bu tez çalışması, %25, %50, %75 ve %100 ikame maddelerinin kullanımının asfalt betonun performans özellikleri üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğunu ve hammaddelerin yerine kullanılıp kullanılamayacağını incelemek için yapılmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün teknik şartnameleri takip edilmiş ve her bir agrega karışımı mekanik özelliklerini, mukavemetini ve akma değerlerini belirlemek için Marshall tasarımı ile test edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Üstyapı katmanları özelliklerine göre esnek, rijit ve yarı-rijit olarak sınıflandırılır. Üstyapı kaplamasını oluşturan bitümlü veya bitümsüz katmanlar, esnek bir üstyapıdaki yüklerin çoğunu taşımaktan sorumludur. Rijit üstyapıda yükler normal çimento, agrega ve donatıdan oluşan beton plaka tarafından taşınır. Yarı-rijit üstyapıda ise, bitümlü kaplama ve rijit kaplama birlikte görev alarak üzerine gelen yükü taşır. Bu üç farklı üstyapının birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Yapım, bakım ve onarım kolaylığının yanı sıra estetik görünümleri ve sessiz olması nedeniyle esnek kaplamalar son yıllarda giderek daha popüler hale gelmiştir. Ülkeler esnek kaplamaları kullanırken önemli bir maliyetle karşı karşıya kalmaktadır. Asfalt betonunda kullanılan bitüm birçok ülke için özkaynak değildir. Bitüm ve diğer kullanılan girdilerin maliyetini minimuma düşürmek için sayısız çalışma yürütülmektedir. Asfalt betonu içinde kullanılan malzemelerin doğal kaynaklar yerine atık madde kullanımı bu araştırmaların odak noktasıdır. Amaç, daha verimli, uygun maliyetli, çevre dostu ve yükler altında daha az deforme olan asfalt betonu elde etmektir. (Karacasu ve Keskin, 2019).

Normal beton ve asfalt betonu üzerinde gerek performans artırmak gerekse çevresel atıkların değerlendirilmesi bağlamında birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Behera vd., 2014; Silva vd., 2014; Arabani ve Mirabdolazimi, 2011; Modarres ve Rahmanzadeh, 2014; Morova ve Terzi, 2016). Kullanılan katkı maddeleri bitüm çeşitliliği (Yilmaz ve Yalcin, 2015; Subhy, 2017; Sienkiewicz vd., 2017; Çeloğlu vd., 2018; Zhang vd., 2020) ve karışım çeşitliliği (Shafabakhsh vd., 2014; Androjić vd., 2019; Erkuş vd., 2020; Sukhija ve Saboo, 2020) olarak çeşitlendirilebilir. Katkı maddeleri doğrudan endüstriyel veya bir üretimin sonunda açığa çıkan katkılar şeklinde olabilir. Endüstriyel katkılar; polimerler, Stiren Butadien Stiren (SBS), Kraton, Etilen-vinil asetat (EVA) şeklinde olabilir (Kök vd., 2011; Kaçaroglu ve Saltan, 2020). Atık katkılara da cam elyaf, plastik, kauçuk vb. atık malzemeler örnek verilebilir (Sengoz ve Topal, 2005; Shafabakhsh vd., 2014; Mazumder vd., 2016; Sanchez-Cotte vd., 2020).

Çevresel atıklar asfalt betonunda kullanılırken, bu atıkların asfalt betonunun bazı performans özelliklerini iyileştirmesi beklenir. Karacasu vd. asfalt betonunda atık lastik parçacıklarını kullanarak yaptıkları çalışmada, kauçuk maddesinin sönümleyici özelliğinden faydalanmışlardır. Atık lastikler asfalt betonuna esneklik kazandırmıştır (Kara ve Karacasu, 2015).

Wafaie (2022) yol inşaatlarında en çok kullanılan asfalt betonu imalatında alternatif bir agrega malzemesi olarak seramik keki atığının (SKA) kullanılmasına yönelik yeni bir yöntem araştırmıştır. Bu çalışma, SKA'yı agrega ve bitümden yapılan geleneksel asfalt betonuna eklemenin uygulanabilirliğini araştırarak test ve analizler neticesinde bazı önemli sonuçlar ortaya çıkarmıştır. SKA'nın %20'ye kadar asfalt beton üretiminde kullanılması endüstriyel açıdan uygundur. Bu yöntem sadece çevre ve görsel kirliliği azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda atık depolama ve kaynak kullanımını optimize ederek daha sağlıklı bir çevreyi ve daha yüksek bir yaşam kalitesini de teşvik eder. Neticede, yol yapım çalışmalarında sürdürülebilirliği sağlamak için önemli bir ilerleme kaydedilmiştir.

Sang vd. (2021) mermer blok endüstrisinde işlenen toplam blok hacminin yaklaşık %30-50'sini oluşturan mermer tozunun bitümlü sıcak karışımında filler malzeme olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Deney sonrasında elde edilen bulgulara göre atık mermer tozunun gözenekleri doldurarak boşluk oranını azalttığı ve karışım içindeki malzemelerin birbirine bağlanmasını sağladığı görülmüştür. Sonuç olarak, Marshall ve çekme mukavemeti artma yönünde eğilim göstermiştir. Bitümlü sıcak karışımında hacimce %3 oranında atık mermer tozunun, %4,5 bağlayıcı ile eklenmesinin yol kaplama kullanımı için en uygun karışım olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Fatima vd. (2014) dolgu agregası yerine %3 ve %5 oranlarında seramik ve kiremit atıklarının etkilerini, Marshall tasarım deneyi ile değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak seramik atık oranının artmasıyla birlikte her iki seramik atık oranında da Marshall dayanımı değerlerinin kontrol numunelerine göre daha yüksek değerlere ulaştığı ve numunelerin akma değerlerinin de kontrol numunelere göre daha yüksek değerlere ulaştığı halde sınır değerler arasında kaldığını görmüşlerdir. Asfalt betonunda seramik atıklarıyla hazırlanan numuneler gerekli şartları karşılamakla beraber çevrenin korunması açısından uygun bir çözüm olacaktır.

Vasudevan (2013) bitümlü sıcak karışımda kömür taban külünün performansını değerlendirmiştir. Bu araştırmanın amacı yol temellerinde, alt temellerde ve kaldırımlarda agrega olarak kömür taban külü uygulamalarının performansını araştırmaktır. Elde edilen sonuçlara göre kömür dip külü içeren numunenin dayanım, sertlik ve akma açısından normal numunelerden daha iyi olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, yüksek trafik yükü altında kaplama daha güçlü hale gelir ve kaplama deformasyonu azaltılabilir. Bununla birlikte, karışımın yoğunluğunu azaltırken hava boşluklarının (V) miktarını arttırması nedeniyle kömür taban külünün dolgu maddesi olarak kullanılmasının dezavantajları vardır. Pratik özgül ağırlığı (PÖA), bitümle dolu boşluk oranı (BDBO) ve hava boşlukları (V) geleneksel numunelerin performansıyla karşılaştırıldığında üç özelliği, belirtilen spesifikasyonları bile aşmıştır. Bu nedenle, kömür taban külü kullanımının kaplamanın dayanımını arttırabileceği ancak kullanım eksikliğinin giderilmesi için düzeltmeler yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Kömür taban külünün büyük miktarlarda kullanılabilmesi, bu atıkların mümkün olduğu kadar geri dönüştürülebilmesi anlamına gelir ve bu da çevre kirliliğini önlemek adına önemli hale gelir. Ancak BSK'da kömür taban külünün kullanımını en üst düzeye çıkarmak için daha kapsamlı ve derinlemesine bir çalışma yapılmalıdır.

Kara ve Karacasu (2015) bitümlü sıcak karışımına ilave edilen seramik atıklarının (CW) yük altındaki davranışını araştırmışlardır. Marshall tasarım testi sonrasında atık oranının artmasıyla agregalar arası boşluk oranı (VMA), hava boşluğu miktarı (V) ve optimum bitüm oranı (OBO) artmaktadır. Sonuç olarak, PÖA, Marshall stabilite değerleri ve VFA atık miktarı arttıkça azalmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü teknik şartnamelerine göre yeterli mekanik koşulları sağlayan atık seramik agregaların binder tabakasının %30'una kadar, aşınma tabakasının ise %20'sine kadar kullanılabileceği tespit edilmiştir. Normal agregalı karışımlar aynı ebatlardaki %30 seramik atığı ihtiva eden asfalt karışımlarından daha ağır çıktığı gözlenmiştir. Bu da asfalt taşıyan araçların eskiye kıyasla daha fazla BSK taşıyabilecekleri sonucunu doğurmaktadır. Dolayısıyla, sürdürülebilir bir çevrenin sağlanması bağlamında, BSK'da atık seramik agregaların kullanılması çevre kirliliğine engel olmaktadır.

Yoo vd. (2016) enerji santralindeki kömür külünün yan ürünü olan taban külünü, bitümlü sıcak karışımlarda ince agrega olarak geri dönüştürmüşlerdir. Taban külü, BSK'nın ince agregasını %10, %20 ve %30 oranlarında 4,75 mm elekten geçen ince agreganın çeşitli

kısımlarıyla değiştirmek için kullanılmıştır. Taban külündeki toksisite konsantrasyonunu ölçmek için liç testi yapılmıştır. Marshall karışım tasarımı yöntemi kullanılarak ince agregalar olarak kullanılan taban külünün her bir kısmı için optimum asfalt içeriği ölçülmüştür. Stabilité, akış değeri ve karışım hacimsel özellikleri, taban külünün BSK'da ince agregalar olarak uygulanabilirliğini doğrulamak için karşılaştırılmıştır. Taban külü ve uçucu kül içeren asfalt karışımının nem duyarlılığı ve yorulma çatlaması direnci araştırılmıştır. Kömür külünün asfalt karışımında ince agregalar olarak verimli bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Yüceer ve Çelik (1991) çevre kirliliği açısından zararlı atık plastiklerin kullanımının asfalt betonunun mekanik davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Granül polimer ve sert atık plastiklerden elde edilen numuneler üzerinde Marshall testleri yapılmıştır. Sonuç olarak atık plastik katkılı numunelerin mukavemet ve sertliklerinde artış gözlenmiştir. Bu nedenle genel olarak polimer karışımlarının eklenmesiyle ortaya çıkan ürünün normal agregalı asfalt betonuna kıyasla daha dayanımlı ve uzun ömürlü olacağı neticesine varmışlardır.

Thanaya vd. (2006) kömür külünün sıcak ve soğuk karışım asfaltların teknik özellikleri üzerindeki etkisini incelediler. Kömür külünün hem soğuk hem de sıcak karışım asfaltlarda dolgu maddesi olarak kullanılmaya uygun bir malzeme olduğunu gösteren sonuçlar elde ettiler. Kömür külü içeren hem soğuk hem de sıcak karışımların düşük ile orta yoğunluklu trafiğe sahip alanlarda, yaya yollarında ve patikalarda kullanılmaya uygun olacağını önermektedirler.

Chen vd. (2011) geri dönüştürülmüş ince agregalar tozunun asfalt karışımında dolgu maddesi olarak kullanımını incelediler. Bu çalışmada kullanılan geri dönüştürülmüş agregalar, beton kaldırım geri dönüşüm sürecinin yan ürünleriydi. Araştırma sonucunda, geri dönüştürülmüş ince agregaların, incelenen karışımların su hassasiyetini ve yorulma direnci özelliklerini iyileştirebileceğini gösterdi. Ancak, geri dönüştürülmüş ince agregaların kullanımının HMA'nın düşük sıcaklık özellikleri üzerinde ters etkilere sahip olabileceğini göstermiştir.

Bitüm laboratuvar çalışmalarının amacı, kalitesini belirlemek, uygunluğunu değerlendirmek ve kaplamanın hizmet ömrü boyunca davranışını tahmin etmektir. Teknolojik, mekanik, reolojik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin tümü önemli hale gelmektedir. Mekanik ve reolojik niteliklerin aksine, teknolojik nitelikler temel testlerden ziyade ampirik testlerle belirlenir. Penetrasyon, yumuşama noktası, süneklik, parlama noktası, çözünürlük, ısıtma sonrası ağırlık kaybı ve Fraass kırılma noktası önemli teknik özelliklerdir. Yukarıda belirtilen tüm teknik özellikler ve viskozite (reolojik özellik), bitümün kabul edilebilirliği veya uluslararası standartlar tarafından belirlenen uygunluğu için birincil kriterdir. Normatif testlere ek olarak laboratuvarlar, bitümün sertlik modülü, çekme mukavemeti ve yorulma direnci gibi temel mekanik özelliklerini belirlemek için ek testler gerçekleştirir. Bu nitelikler bitümün ve buna bağlı olarak bitümlü karışımın mekanik davranışını tahmin etmek için kritik öneme sahiptir. Modifiye edilmiş bitümün varlığı nedeniyle daha ileri testler gerekmektedir. Sonuç olarak elastik toparlanma, kohezyon ve stabilite testleri uygulamaya konulmuştur (Nikolaides, 2014).

Asfalt yollar iki ana malzemeden oluşur: Agregalar ve Bitüm. Agregalar yolun yapı kısmını destekler ve yolun iskeleti olarak işlev görür. Bitümün temel işlevi ise agrega parçacıklarını sıkı bir şekilde birbirine bağlamaktır. Agregalar kaba, ince ve dolgu agregalar olmak üzere üç gruba ayrılır. Dolgu ve bitüm içeriğinin kombinasyonu yolun neme, yorulmaya ve kalıcı deformasyona karşı etkinliğini ve direncini belirler. Dolayısıyla dolgu ve bitüm kombinasyonu ne kadar iyi olursa yolun fiziksel bozulmalara karşı direnci de o kadar artar (Arabani vd, 2017).

3. KARAYOLU YAPISAL ÖZELLİKLERİ

Karayolu; arazi şeritlerine, köprülere ve halkın kullanımına açık alanlara denir. Karayolu yapısı ise, önceden belirlenmiş şekil ve boyut standartlarına göre bir hat boyunca yol sathını en ideal yükseltiye getirmek ve yolu kullanan araçların öncelikle güvenlik, daha sonra hız ve konfor koşullarında onun üzerinde hareket etmesini sağlamak amacıyla inşa edilen yapılar olarak tanımlanabilir (Hacıoğlu, 2013). Karayolu, üstyapı ve altyapı olarak iki tabakaya ayrılmıştır (İlcalı vd., 2001).

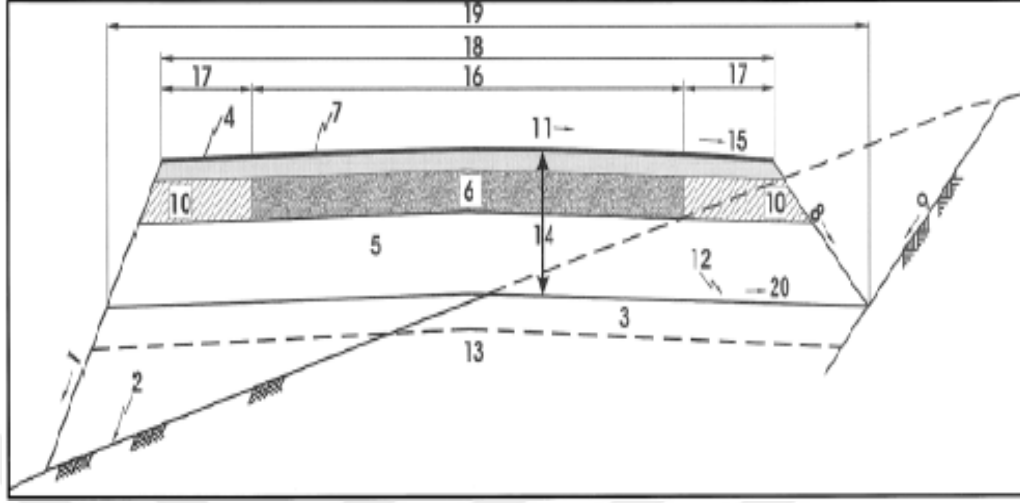
3.1. Karayolu Altyapıları

Karayolu altyapısı veya yol verimliliği, yolların ve karayolu ulaşım sistemlerinin oluşturulmasını ve bakımını sağlayan bir dizi faktör ve yapıdır. Bu altyapılar, toplu ve ticari taşımacılığın güvenliğini, konforunu ve verimliliğini artırmak için gereklidir. Karayolu hattı boyunca yapılacak yarma, dolgu ve tesviye işlerinin yanı sıra köprü, viyadük, tünel, istinat duvarı, menfez gibi sanat yapıları da yol altyapısıdır (Karakaş, 2014).

3.2. Karayolu Üstyapıları

Trafik yüklerini taşıyarak alt tabakalara aktaran, trafiğin akışı için düzgün bir yuvarlanma yüzeyi oluşturan ve yol gövdesini dış etkilere karşı koruyan tabakalı yapıya “karayolu üstyapısı” denir (Karacasu, 2016).

Üstyapılar, karayolu inşaatı ve bakımıyla ilgili en pahalı öğeler arasında yer alır ve karayolu sisteminin herhangi bir topluluk tarafından üstlenilen en pahalı bayındırlık işleri projesi haline gelmesinden büyük ölçüde sorumludur. Kaplama ve ilgili yapılar inşa edilmesi ve bakımı en pahalı öğeler olduğundan, karayolu mühendislerinin kaplama tasarım ilkeleri konusunda temel bir anlayışa sahip olmaları gerekir. Genellikle üç tür üstyapı çeşidi tanımlanmaktadır. Bunlar, hem sert hem de esnek üstyapı katmanlarından oluşan kompozit üstyapılar, rijit üstyapı ve esnek üstyapı (Wafaie, 2022).



Şekil 3.1. Karayolu üstyapı enkesiti

- | | |
|-----------------------|---------------------------------|
| 1- Dolgu Şevi | 11- Yolun Enine Eğimi |
| 2- Doğal Zemin | 12- Tesviye Yüzeyi |
| 3- Üstyapı Tabanı | 13- Yol Gövdesi Taban Zemini |
| 4- Banket Kaplaması | 14- Üstyapı Proje Kalınlığı |
| 5- Alt temel Tabakası | 15- Banket Eğimi |
| 6- Temel Tabakası | 16- Trafik Şeritleri Genişliği |
| 7- Kaplama Tabakası | 17- Banket Genişliği |
| 8- Hendek Şevi | 18- Yol (Platform) Genişliği |
| 9- Yarma Şevi | 19- Üstyapı Tabanı Genişliği |
| 10- Banket Temeli | 20- Taban Yüzeyinin Enine Eğimi |

3.2.1. Kompozit üstyapılar

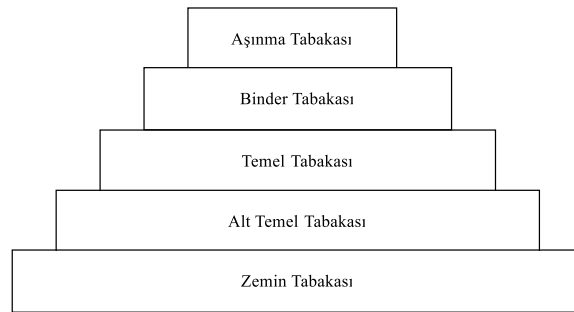
Rijit üstyapı olarak imal edilmiş yolların zaman içerisinde bozulması ile üzerine bitümlü sıcak karışım takviye edilerek veya BSK olarak uygulanmış kaplamaların ağır tonaj ve mevsim şartları gibi farklı nedenlerle bozulmasından sonra üzerine beton kaplama inşa edilmesiyle oluşan (beton – asfalt) karışımı üstyapı tipidir.

3.2.2. Rijit üstyapılar

Rijit karayolu üstyapıları genellikle Portland çimentosu betonundan yapılır ve alt zemin ile beton yüzey arasında bir temel tabakası sağlar. Rijit kaplamalar, alttaki malzemedeki küçük düzensizlikler boyunca kırış benzeri bir hareketi sürdürmelerine olanak tanıyan bir miktar bükülme mukavemetine sahiptir. Düzgün tasarlanmış ve inşa edilmiş rijit kaplamaların servis ömrü uzundur ve bakımı genellikle esnek kaplamalara göre daha az maliyetlidir. Beton otoyol kaplamalarının kalınlığı genellikle 15 ile 30 cm arasında değişir. Kaplama türleri genellikle ağır trafik yüklerini taşıyacak şekilde inşa edilmekle birlikte, konut ve yerel yollarda da kullanılmaktadır (Garber, 2019).

3.2.3. Esnek üstyapılar

Esnek kaplama genellikle asfalt çimentosu ve agregalarla yapılır (Garber, 2019). Kullanılan malzemeler benzer olmakla birlikte yapım tekniği düşünüldüğünde sathi kaplama ve bitümlü sıcak karışım olarak iki kategoriye ayrılır. Her iki kaplama da bazı katmanlardan oluşur. Her katmanın kendine has özellikleri vardır ve bu özellikler yolun kalitesini belirler (Ahmed, 2023). Bu katmanlar araçların kuvvetinden, çevresel değişikliklerden ve etkilerden kaynaklanan hasarlara karşı koruma sağlar. Bu katmanların taşıma kapasitesi yolun uzun vadeli ve kısa vadeli kalitesini belirleyen unsurdur. Bu katmanlardan alt temel ve temel katmanı her iki kaplama için de aynı şekilde imal edilmektedir. Esnek kaplamanın katmanları Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Tipik esnek kaplama kesiti

Alt temel tabakası: Önceden hazırlanmış zemine uygulanan ilk katman olan alt temel, don etkisi ile kar ve yağmur suyu etkisine karşı adeta bir kalkan gibi davranır (İlcalı, 1988). Alt temeller, trafik yüklerinin taban üzerinde dağılımını sağlar ve tabandaki küçük parçacıkların taban katmanına nüfuz etmesini engeller. Bazı özelliklere ve kalınlığa sahip olan bu tabaka, kaplama yatağının tüm genişliğine yayılarak dövlmektedir. Bu katmanın belirli bir dereceye kadar iyi sıkıştırılması, katmanın mukavemetinin çok yüksek olmasını sağlamaktadır. Temel tabakası için zemin oluşturmaya yarayan bu tabakada kullanılan malzemeler temel tabakasında kullanılan malzemelerden daha düşük niteliktedir. Yol yapılacak zeminin dayanıklı ve sağlam bulunduğu alanlarda alt temel tabakası uygulanmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Ekonomik ve çevresel faktörler göz önüne alındığında yol yapımında moloz, cüruf ve inşaat artıkları gibi malzemelerin kullanılması uygundur (Karacasu vd. 2023).

Temel tabakası: Alt temel katmanının üzerine ve tüm genişliği boyunca belirli özelliklerde ve kalınlıkta uygulanan yol kaplamasının ikinci katmanı da temel tabakasıdır. Bu katman bir veya daha fazla doğal kum, doğal çakıl ve kırma taş gibi malzemelerin su veya az miktarda ince bağlayıcının karıştırılarak serilip sıkıştırılmasından oluşur. Kaplamanın üst katmanlarından gelen yükler bu katman tarafından yumuşatılır ve alt temel katmanına aktarılır. Böylece izin verilen gerilme, oturma veya izinsiz deformasyona neden olmaz. Belirli teknik özelliklerle hazırlanıp yayılan taban katmanı, alt taban katmanına göre daha fazla geçirgenliğe sahiptir. Yol inşaatları için önemli olan bu katman stabil bir yapıya sahip olup üst katmanlara gelen yükleri kendi içinde absorbe ederek yüklerden doğan bozulmaları ve dağılmaları en aza indirmektedir. Bu yapıyla yolun enkesiti düşünüldüğünde oldukça kalın bir tabakadan oluşmalıdır (Karakaş, 2014).

3.2.3.1 Sathi kaplama

Alt temel ve temel tabakası yapıldıktan sonra yolun yüzeyi düzeltilerek temizlenir. Sathi kaplamanın daha iyi yapışması ve alt katmanlara su geçişini önlemek için asfalt distribütörü aracı ile isteğe bağlı olarak astar püskürtülebilir. Daha sonra asfalt distribütörü

aracı ile yolun yüzeyine bitüm püskürtüldükten sonra mıcır serme aracı ile mıcırlar serilerek silindir ile sıkıştırılır. Yol yüzeyinin düzgün ve pürüzsüz olması için mıcırların eşit ve homojen miktarda serilmesine dikkat edilmelidir. Silindirme işlemi tüm yüzeye dikkatlice uygulanmalıdır. Mıcırların bitüm içine gömülme miktarı ortalama tane boyutunun %30'unu geçmeli, %70'inden fazla olmamalıdır. Gömülme miktarı %30'dan az olursa trafik etkisiyle beraber sökölme gerçekleşir. Eğer %70'den fazla olursa da kasma dediğimiz olay oluşur. Silindirme işleminden sonra yol yüzeyindeki fazlalık olan mıcırlar süpürge aracı ile süpürülmelidir. Bu işlem bir defa yapılırsa tek kat asfalt sathi kaplama, iki kat yapılırsa çift kat asfalt sathi kaplama adını alır.

3.2.3.2 Bitümlü sıcak karışım (BSK)

Alt temel ve temel tabakası yapıldıktan sonra yolun yüzeyi düzeltilerek temizlenir. Kaplama tabakasının daha iyi yapışması ve alt katmanlara su geçişini önlemek için asfalt distribütörü aracı ile isteğe bağlı olarak astar püskürtülebilir. Asfalt üretim tesisinde üretilen bitümlü sıcak karışım yol şantiyesine getirilerek hazırlanmış olan alt temel ve temel tabakası üzerine asfaltlama ekipmanları (finişer) ile binder ve aşınma katmanı olarak serilir ve silindirme işlemine tabi tutulur.

Kaplama tabakası: Bu katman trafik yükleriyle doğrudan temas halinde olduğundan sürtünme, düzgünlük, tekerlek izi direnci ve drenaj gibi özellikler sağlar. Kaplama tabakası, üzerine gelen yüklerin meydana getirdiği basınç ve yanal çekme gerilmelerinin maksimuma ulaştığı bölgedir. Ayrıca, araç içine gelen tekerlek sesini de en aza indirmek gerektiğinden dolayı diğer katmanlara kıyasla daha fazla esnek ve işlenebilir bir yapıya sahiptir. Ayrıca yüzey suyunun temel ve alt temele girişini engeller. Bu üst yapısal malzeme katmanı bazen iki katmana ayrılır: Aşınma katmanı (üst) ve binder katmanı (alt). Yüzey katmanlar genellikle HMA'dan yapılır (Karakaş, 2014; Kara, 2012).

4. KÖMÜRÜN TARİHİ, TANIMI VE ÖZELLİKLERİ

4.1. Kömürün Tanımı ve Tarihçesi

Kömür, esas olarak karbondan oluşan ve kolayca yanabilen bir tür yanıcı tortul kayadır. Kömür, ağırlıkça %50'den fazlası ve hacimce %70'ten fazlası karbon malzemelerinin birleşiminden oluşan siyah veya siyahımsı kahverengi bir renge sahiptir. Jeolojik zaman boyunca sıkışmış, sertleşmiş, kimyasal olarak değişerek ısı ve basınçla başkalaşıma uğramış bitki kalıntılarından oluşur. (Ateşok, 2004).

Kömürün kalitesi oksijen içeriğine, asitliğine, kömürün olgunluğunu etkileyebilecek bakterilerin varlığına ve ne tür bitki kalıntısına (ağaçlar, algler, yosunlar, çiçekler ve bataklıklarda yaygın olarak yaşayan bitkiler) sahip olduğuna bağlıdır. Kömür oluşumu süreci, bitki artıklarının değişmesiyle başlar, önce turbanın (turflaşma), ardından linyitin oluşmasıyla devam eder ve çeşitli düzeylerde kömüre dönüşür. Son olarak en kaliteli kömür olan antrasit halini alır. Bu işleme kömürleşme süreci denir (Ateşok, 2004).

Kömürün oluşumu, üretilen kömürün kalitesiyle ilgili olup, bitki artıklarının metamorfozunu içeren süreç, aynı zamanda jeolojik zaman koşulları ile iklim ve basınç gibi yerel koşullara da bağlıdır. Değişim sürecinde mikroorganizmaların etkisi de çok önemli bir rol oynar (Akyazılı, 2009).

Bazı tarihçiler kömürün ticari olarak ilk kez Çin'de kullanıldığına inanmaktadır. M.Ö. 1000 yıllarında Çin'in kuzeydoğusundaki bir maden sahasından bakır eritmek ve madeni para basmak için kömür temin edildiğine dair bilgiler bulunmaktadır. Kömürle ilgili ilk ipuçlarının, taş benzer bir kömür olduğunu söyleyen Yunan filozof ve bilim adamı Aristoteles'ten geldiği ortaya çıkmıştır. İngiltere'deki Roma yapılarının kalıntılarında bulunan kömür külü de kömürün M.Ö. 400 yıllarında Romalılar tarafından kullanıldığını göstermektedir (Akyazılı, 2009).

Kömür madenciliği ve kullanımı, esas olarak demir-çelik üretimi, ulaşım için demiryolu ve buharlı gemi yakıtı ile sanayi devrimi tarihinden ayrılamaz. Ancak petrol kullanımının artmasıyla birlikte kömürün birincil enerji kaynağı olarak kullanımı azalmaya başlamış ve 1960 yılından bu yana petrol, birincil enerji kaynağı olarak kömürün yerini almıştır.

4.2. Kömürün Sınıflandırılması

Kömür, karbon ve ısı içeriğine göre dört ana türe ve/veya dereceye ayrılır. Genel kural, kömürün kalitesi ne kadar yüksek olursa, o kadar temiz yanar ve kullanım alanları da o kadar çok yönlü olur (Ateşok, 2004).

- **Linyit (%25-%35 karbon):** Kahverengi kömür olarak da adlandırılır. Kömürün en alt sırasında yer alır ve neredeyse yalnızca elektrik enerjisi üretiminde yakıt olarak kullanılır.
- **Alt bitümlü kömür (%35-%45 karbon):** Özellikleri linyitten bitümlü kömüre kadar değişir. Öncelikle elektrik enerjisi üretiminde yakıt olarak kullanılır. Bu kömür genel olarak diğer türlere göre daha düşük kükürt içeriğine sahiptir. Bu özelliğinden dolayı daha temiz yandığı için kullanımını çekici kılmaktadır.
- **Bitümlü kömür (%45-%86 karbon):** Siyah veya bazen koyu kahverengi renktedir. Genellikle sıkıştırılmış bitki kalıntılarından oluşan farklı kıvamda bantlar veya şeritler içerir. Esas olarak elektrik enerjisi üretiminde yakıt olarak kullanılır. Önemli miktarları da imalattaki ısı ve güç uygulamaları ile çelik yapımı için koklaşabilir taş kömürü yapımında kullanılır.
- **Antrasit kömürü (%86-%97 karbon):** Evsel ısıtma ve çelik üretimi için kullanılan siyah renkli, parlak, sert bir kömür türüdür. Yüksek kaliteli bir ürün olduğu için sorunsuz yanar ve çok az is açığa çıkarır. Antrasit ayrıca su filtreleme sistemlerinde de kullanılır.

4.3. Kömür Kullanımı

Kömür, enerji üretiminde ve endüstriyel işlemlerde yaygın olarak kullanılan bir fosil yakıttır. Kömürün kullanımı dünya çapında önemli miktarda enerji sağlamakta ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda temel bir hammadde olarak hizmet vermektedir. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir (Ateşok, 2004).

4.3.1. Elektrik

Kömür genellikle termik santrallerde, enerji üretiminde yüksek sıcaklıkla suyu buhara dönüştürerek güçlü bir manyetik alanda türbinlerin yüksek hızda döndürülmesinde kullanılır ve sonunda elektrik üretilir.

4.3.2. Çelik üretimi

Çelik endüstrisinde kömür, dolaylı olarak çelik yapımında kullanılır. Burada olan şey, kok kömürü oluşturmak için kömürün fırınlarda pişirilmesidir. Demir cevherini eritmek ve çelik üretmek için kok kömürü kullanılmaktadır. Bu arada, amonyak gazı genellikle kok fırınlarından geri kazanılır. Amonyak gazı da nitrik asit, amonyak tuzları ve gübre üretmek için kullanılır.

4.3.3. Endüstri

Kömür bazı ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Kömür kullanan endüstrilerden bazıları çimento endüstrisi, kâğıt ve alüminyum endüstrisi, kimya ve ilaç endüstrileridir. Kömür, kimya sanayine benzen, kömür katranı, amonyak sülfat, kreozot vb. gibi sayısız hammadde sağlamakla birlikte çoğunlukla enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır.

4.3.4. Gaz ve sıvıya dönüştürme

Kömür, karbon monoksit ve hidrojen karışımı olan sentetik bir gaza dönüştürülebilir. Bu gazlar üre, metanol, saf hidrojen vb. gibi çeşitli ürünlere dönüştürülebilen bir ara üründür. Kömür ayrıca sentetik yakıtlar olarak bilinen sıvılara da dönüştürülebilir.

Ancak, kömürden üretilen kimyasallar öncelikle diğer ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca piyasadaki birçok üründe (aspirin, solventler, sabun, boya, plastik, naylon ve suni ipek gibi lifler) kömür veya bileşenlerinden biri olarak kömür yan ürünleri bulunmaktadır.

4.4. Termik Santral

Enerji ihtiyacını karşılamamanın en popüler yollarından biri termik santrallerdir. Bu santraller linyit, taş kömürü ve doğal gaz gibi çeşitli fosil yakıtların kimyasal enerjisinden elektrik enerjisi üretmektedir. (Akyazılı, 2009).

Termik santrallerde, enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtlar uygun koşullar altında yakılır. Fosil yakıtlardan elde edilen enerji, mekanik enerjiyi alternatif enerjiye dönüştüren alternatörler tarafından elektrik enerjisine dönüştürülür.

4.4.1. Termik santrallerin avantajları

Termik santrallerin ilk avantajı, düşük maliyetli bir elektrik üretim yöntemi olmalarıdır. Fosil yakıt tedariği ve termik santrallerin inşaat maliyetleri, hidroelektrik ve nükleer santraller gibi diğer santrallere göre daha ekonomiktir. Şehir merkezlerine yakın konumlandırılma imkânları sayesinde elektrik dağıtım maliyeti azalır.

Termik santrallerin bir diğer avantajı da her yerde inşa edilebilmeleridir. Kurulumla ilgili olarak tek ön koşul, dağıtım alanına yakın bir yerde bulunmasıdır. Yer sorunu, özellikle

hidroelektrik enerji tesislerine kıyasla çok geniş bir alana ihtiyaç duyulmaması ile çözülmektedir.

Termik santrallerin kurulum aşamasında çok büyük bir alana ihtiyaç duyulmadığı için çevredeki canlılara ve yaşam alanlarına çoğunlukla zarar verilmez. Ayrıca, inşaat süreci hızlı olduğundan hava ve toprağın kirlenme olasılığı çok daha düşüktür.

Enerji talebini sürekli olarak karşılamanın güvenilir yöntemlerinden biridir. Termik santraller uzun süredir tercih edilen bir enerji üretim yöntemi olduğu için süreç basit ve sistematiktir.

4.4.2. Termik santrallerin dezavantajları

Elektrik tedarikinde termik santraller güvenilir ve az maliyetli olsalar da, ekolojiye ve doğal dünyaya çeşitli şekillerde zarar vermektedirler. En büyük dezavantajlarından biri de bu sistemlerin büyük miktarda suya ihtiyaç duyması ve bunun da su kaynaklarının azalmasına yol açmasıdır.

Termik santrallerin inşası aşamasında çok fazla çevresel bozulma olmamasına rağmen, santraller faaliyete geçtiğinde tablo değişmektedir. Uzun vadede, termik santraller karbondioksit ve kükürtdioksit gibi havadan yayılan kirleticileri yaydıkları için çevreyi önemli ölçüde kirlletmekte ve hatta iklim değişikliğine sebep olmaktadır.

Enerji üretmek için fosil yakıtların kullanılması termik santrallerin bir diğer dezavantajıdır. Fosil yakıtların yenilenemediği göz önüne alındığında, termik santraller sürdürülebilir bir enerji üretim yöntemi değildir.

Bu enerji üretim tesislerinin önemli ölçüde çalıştırma ve işletme giderleri bulunmaktadır. Santrallerin verimliliğini sağlamak için makine ve diğer ekipmanları iyi bilen kalifiye personel çalıştırılması gerekmektedir.

Ayrıca büyük miktarlarda uçucu kül ve civanın açığa çıkması sonucu hava, su ve toprak kirlenmektedir. Bu nedenle termik santraller karbon ayak izinin artmasına neden olmaktadır.

4.4.3. Türkiye'de termik santrallerde elektrik üretim oranları

Türkiye'nin enerji üretim sürecinde yenilenebilir ve yenilenemez kaynakların her ikisi de kullanılmaktadır. Karşılaştırıldığında, yenilenemeyen kaynaklar ve özellikle termik santraller enerji üretiminde başı çekmektedir.

Türkiye 2020 yılında toplam 305.458.957,06 MWh elektrik üretmiştir. Aşağıda 2020 yılında enerji üretmek için kullanılan enerji kaynaklarının bir listesi yer almaktadır:

- Hidrolik: 78.084.434,68 MWh
- Doğal gaz: 69.307.466,84 MWh
- İthal kömür: 62.466.466,26 MWh
- Linyit: 38.148.076,03 MWh
- Rüzgâr: 24.591.438,09 MWh
- Jeotermal: 9.884.548,79 MWh
- Biyokütle: 5.132.992,39 MWh
- Taş kömürü: 3.539.741,91 MWh
- Asfaltit: 2.222.875,31 MWh
- Güneş: 420.223,11 MWh
- Yakıt yağı: 313.038,65 MWh
- Lisanssız üretim: 11.347.655,00 MWh

Üretim açısından enerji kaynakları sıralamasına göre termik santraller Türkiye'nin elektrik ihtiyacının %58'i gibi büyük bir kısmını karşılamaktadır.

5. MATERİYAL VE YÖNTEM

5.1. Agregalar

Agrega; kum, çakıl ve kırılmış agregalar gibi farklı tane yapısı ve dağılımına sahip özel kaliteli mineral malzemeleri ifade eder ve asfalt kaplamanın çoğunu oluşturur. Genel olarak mineral agregaları, karışımın ağırlıkça yaklaşık %90-95'ini, hacimce ise %75-85'ini oluşturur. Bu nedenle agregaların özellikleri asfalt kaplamaların performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Granülasyon, sıcak karışım asfaltın kalıcı deformasyonunu etkileyen agregaların önemli özelliklerinden biridir. (Wafaie, 2022; Papagiannakis, 2008; Keskin, 2018; Golalipour, vd. 2012)

5.1.1. Agregaların sınıflandırılması

Agregalar genellikle boyut ve şekil olmak üzere iki biçimde sınıflandırılmaktadır (Uçar, 2008).

5.1.2. Agregaların şekle göre sınıflandırılması

Agreganın doğal olarak oluşan kayalardan patlatma veya kırma vb. yöntemlerle elde edildiğinden dolayı gerekli agrega şeklini elde etmek zordur. Ancak agreganın şekli, betonun işlenebilirliğini etkilemektedir. Bu nedenle kırma makinesi, anaç kaya ve agreganın şekline dikkat edilmelidir. Agregalar şekillerine göre aşağıdaki türlere ayrılır (Golalipour, vd. 2012; Keskin, 2018). Agregaların şekle göre sınıflandırılması Şekil 5.1'de gösterilmektedir.

5.1.2.1 Yuvarlak agregalar

Yuvarlatılmış agregalar tamamen aşınmayla şekillenir ve deniz kıyısı çakılı formunda bulunur. Yuvarlak agregalar minimum boşluk yüzdesine (%32 – 33) neden olur, dolayısıyla daha fazla işlenebilirlik sağlar. Daha az miktarda su-çimento oranına ihtiyaç duyarlar. Zayıf

kenetlenme davranışı ve zayıf bağ mukavemeti nedeniyle yüksek dayanımlı betonda agregalar değerlendirilmezler.

5.1.2.2 Düzensiz agregalar

Düzensiz agregalar kısmen aşınmayla şekillenir ve bunlar çukur kumu ve çakıl şeklinde bulunur. Düzensiz agregalar %35-37 oranında boşluk oluşmasına neden olabilir. Bunlar yuvarlak agregalarla karşılaştırıldığında daha az işlenebilirlik sağlayacaktır. Bağ mukavemeti yuvarlak agregalardan biraz daha yüksektir ancak yüksek mukavemetli beton için gerekli değildir.

5.1.2.3 Açısız agregalar

Köşeli agregalar, kabaca düzlemsel yüzeylerin kesişiminde oluşan iyi tanımlanmış kenarlardan oluşur ve bunlar kayaların ezilmesiyle elde edilir. Açısız agregalar, maksimum boşluk yüzdesine (%38-45) neden olur, dolayısıyla daha az işlenebilirlik sağlar. Agregalar-harç bağının daha güçlü gelişmesi nedeniyle %10-20 daha fazla basınç dayanımı verirler. Dolayısıyla bunlar yüksek dayanımlı beton üretiminde faydalıdır.

5.1.2.4 Yassı agregalar

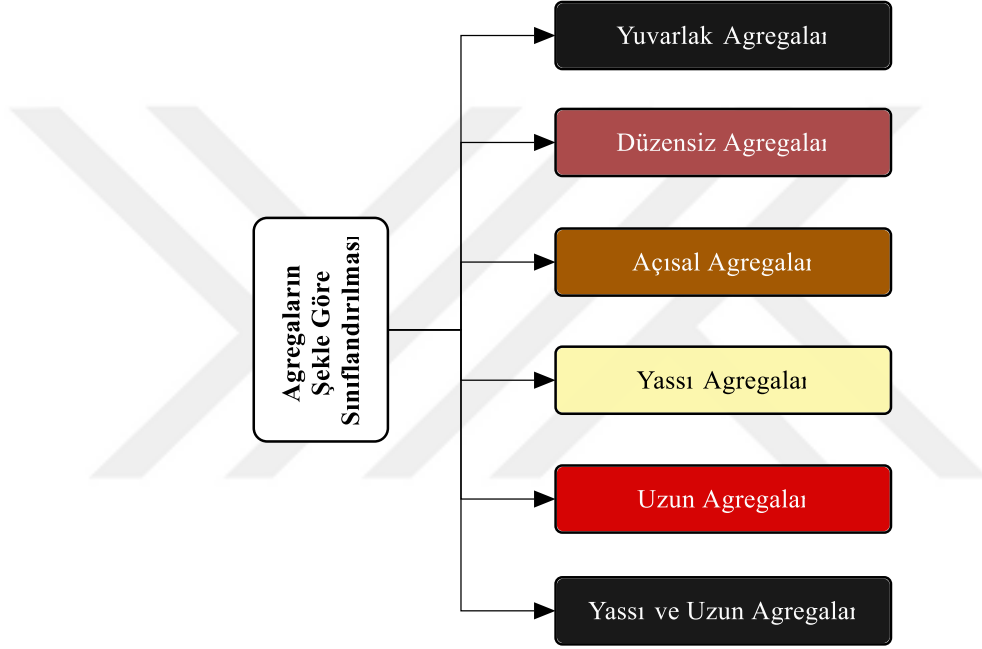
Agrega kalınlığı, o agreganın genişliği ve uzunluğu ile karşılaştırıldığında küçük ise buna yassı agrega denir. Diğer bir ifadeyle agreganın en küçük boyutu ortalama boyutunun %60'ından küçükse yassı agrega denir.

5.1.2.5 Uzun agregalar

Agreganın boyu diğer iki boyuttan büyükse bu duruma uzun agrega denir. Agreganın boyu ortalama boyutunun %180'inden büyüktür.

5.1.2.6 Yassı ve uzun agregalar

Bir agreganın uzunluğu genişliğinden ve genişliği kalınlığından daha büyük olduğunda, buna yassıl ve uzun agrega denir. Yukarıdaki 3 tip agrega beton karışımına uygun değildir. Bunlar genellikle zayıf ve kırılğan kayalardan elde edilir.



Şekil 5.1. Agregaların şekle göre sınıflandırılması

5.1.3. Agregaların boyutlarına göre sınıflandırılması

Agregalar doğada farklı boyutlarda mevcuttur. Kullanılan agreganın boyutu, karışım oranlarına, işin türüne vb. bağlı olabilir. Agregaların boyut dağılımına agregaların sınıflandırılması denir. Agregaların boyutlarına göre sınıflandırılması aşağıdaki gibi 2 tipe ayrılır (Kumar ve Singh, 2023).

- İnce agrega
- Kaba agrega

5.1.3.1 İnce agreg

Agrega, 4,75 mm'lik elekten elendiğinde altta kalan agregaya ince agregaya denir. Doğal kum genellikle ince agregaya olarak kullanılır. Silt ve kil de bu kategoriye girer. Kum, silt ve kilden oluşan yumuşak birikintiyeye tın adı verilir. İnce agreganın amacı, iri agregadaki boşlukları doldurmak ve işlenebilirlik maddesi olarak görev yapmaktır.

5.1.3.2 Kaba agreg

Agrega, 4,75 mm'lik elekten elendiğinde üstte kalan agregaya kaba agregaya adı verilir. Çakıl ve kayalar bu kategoriye girer. Kullanılan maksimum agregaya boyutu bazı koşullara bağlı olabilir. Genel olarak normal dayanımlı betonlarda 40 mm, yüksek dayanımlı betonlarda ise 20 mm agregaya kullanılmaktadır. Şekil 5.2'de çeşitli boyutlardaki agregalar gösterilmektedir.



Şekil 5.2. İnce ve kaba agregalar

5.2. Bitüm

Bitüm, ham petrolden elde edilen, neredeyse uçucu olmayan, yapışkan ve su geçirmez bir maddedir. Tolüen içinde tamamen veya tamamına yakın çözünür. Ortam sıcaklığında çok viskoz veya hemen hemen katıdır (Paliukaite, vd. 2014). Ticari açıdan bakıldığında bitüm,

uzun süredir çatı kaplama ve kaplama uygulamalarında, kaplama karışımlarında ve endüstriyel ürünlerde yaygın olarak kullanılan ucuz bir termoplastik malzemedir. Hem kaldırım hem de endüstriyel uygulamalarda bitümün daha şiddetli hava ve trafik yüklerine dayanıklı olması gerekir, bu nedenle reolojik özellikler çeşitli yönlerden önemli bir rol oynar (Lesueur,2009; Olli-Ville, 2015). Kimyasal açıdan bitüm, esas olarak hidrokarbonlardan ve bunların türevlerinden oluşan, tolüen içinde tamamen çözünen ve ısıya maruz kaldığında yavaş yavaş yumuşayan akışkan bir madde (oda sıcaklığında) olarak tanımlanır (McNally, 2011; Porto, vd., 2019).

Bu araştırmada kullanılan yapıştırıcı, TÜPRAŞ (Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi) Kırıkkale üretim tesislerinden temin edilen 50/70 penetrasyonlu bitümdür. Bitümlü malzemelerin özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Bitüm özellikleri

Deney Adı	Değer	Standart
Bitüm Kaynak	Tüpraş, Kırıkkale, Türkiye	
Penetrasyon (25°C, 100 gr)	64	ASTM D5
Yumuşama Noktası (°C)	48	ASTM D36/D36M-09
Düktilite (25°C, 5 cm/dk)	>100 cm	ASTM D113-07
Isıtma kaybı (%)	0,43	ASTM D6-95
Parlama Noktası (°C)	314	ASTM D92-05’a
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1,026	ASTM D70-09e1
Viskozite (135°C, cP)	437,5	ASTM D4402-06
Viskozite (165°C, cP)	137,5	ASTM D4402-06

5.3. Termik Santral Taban Cürufları

Termik santrallerde uçucu külün yanı sıra, uçucu külden daha iri olan ve baca gazları ile taşınamayan kazan külü de kazan tabanına düşmektedir. Bununla beraber cürufun eritilmesiyle de bir miktar taban külü oluşmaktadır. Toz kömür yakan santrallerde yanma ürünlerinin büyük bir kısmı (yaklaşık %80) uçucu külden, geri kalan miktar (yaklaşık %20) ise taban külü ve cüruftan oluşmaktadır.

Kömür taban külü ve uçucu kül fiziksel, mineralojik ve kimyasal olarak tamamen farklıdır. Taban külü, buhar ve/veya elektrik üretmek için kömür yakan fırınların tabanından toplanan kaba, granüler ve yanıcı olmayan bir yan üründür.

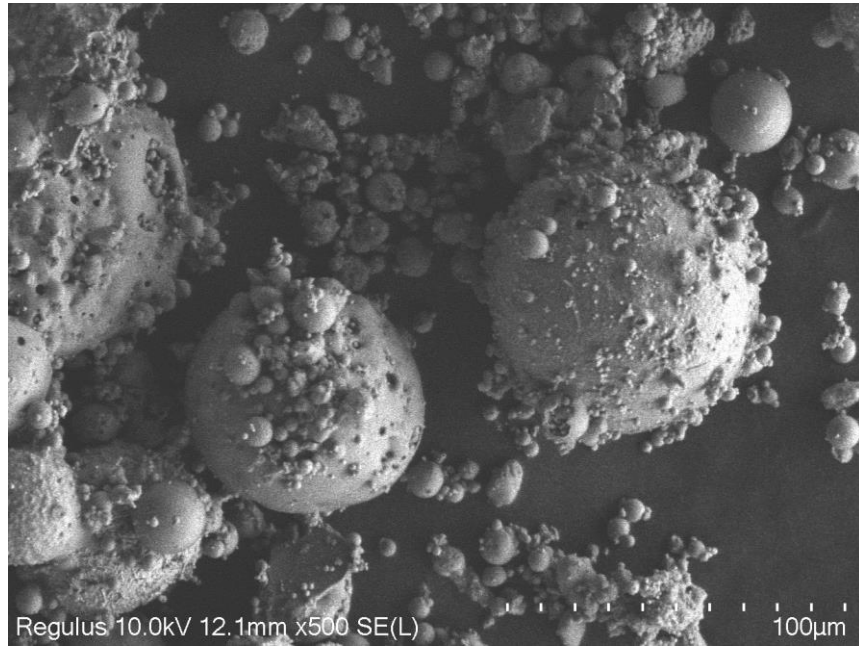
Termik santral taban külünün açık ve geniş alanlarda depolanması doğal yaşam, tarımsal ürünler, hava ve su kalitesi, yerel ekonomi ve çevresel bozulma üzerinde zararlı etkilere sahiptir. Ayrıca nakliye ve depolama masrafları da önemli ölçüde bir maliyet içermektedir.

Bu çalışmada Seyitömer Termik Santral fabrikasından getirilen katı haldeki taban cürufları işleme alınmıştır. Laboratuvar ortamında 30-45 dakikalık öğütme işlemi için Los Angeles test cihazı kullanılmıştır. Daha sonra 0,425 mm'lik bir elekten geçirilerek altta kalan malzeme elek sınıflarına göre agrega içerisine karıştırılmıştır. Cüruf malzemenin genel durumu Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

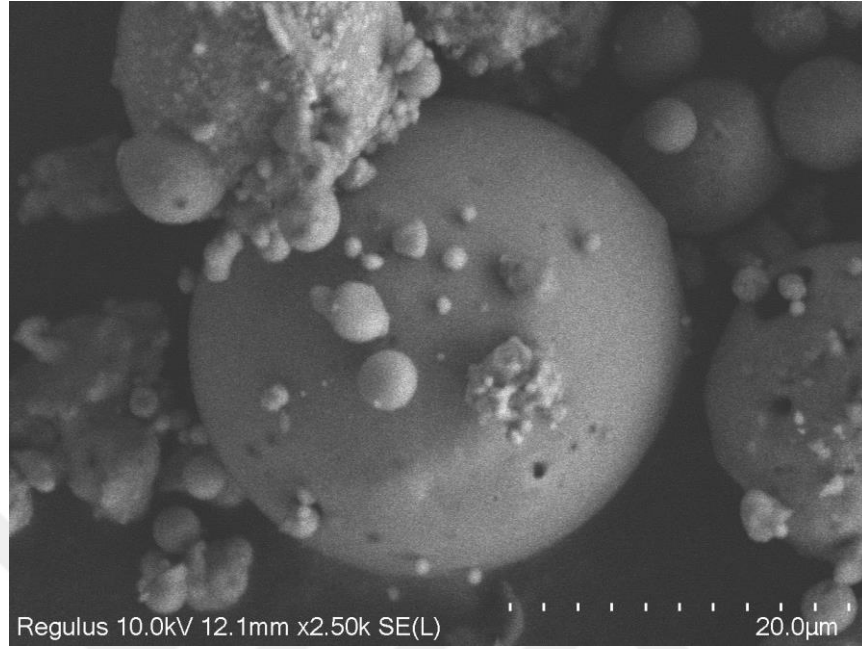


Şekil 5.3. TSTC atık

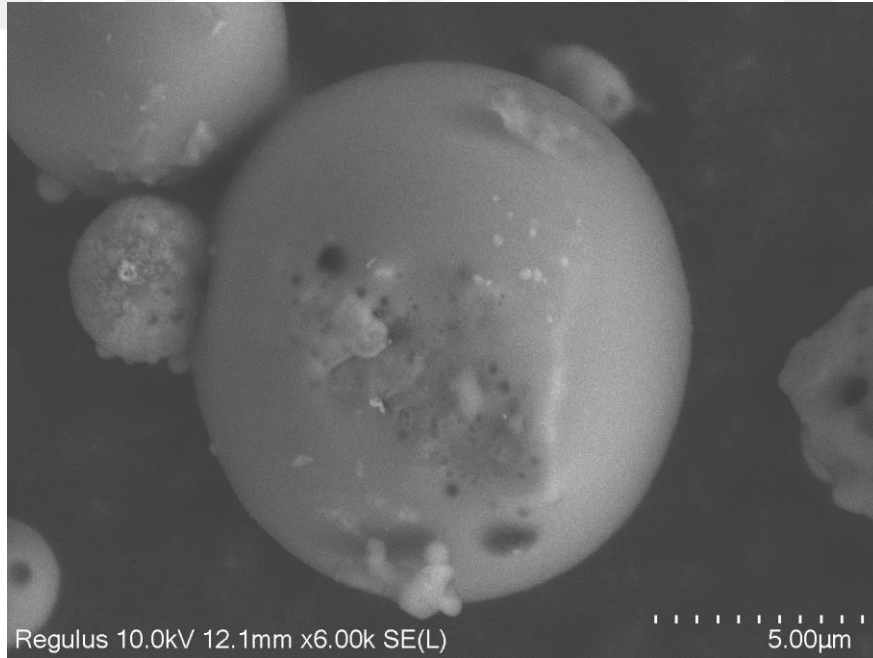
TSTC malzemesinin özelliklerini tespit etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu analizi için Hitachi Regulus 8230 model SEM cihazı kullanılmıştır (Arum, 2024). TSTC malzemesinin yüzey morfolojisi Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.4. TSTC malzemesinin yüzey morfolojisi (X500)



Şekil 5.5. TSTC malzemesinin yüzey morfolojisi (X2.5)



Şekil 5.6. TSTC malzemesinin yüzey morfolojisi (X6)

TSTC malzemesinin XRF analiz sonuçları Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. TSTC'nin XRF analiz sonuçları

Element	Wt %	Wt % sigma
C	18,42	1,68
O	51,59	1,10
Mg	1,79	0,09
AL	8,15	0,2
Si	14,46	0,33
K	1,03	0,07
Ca	0,55	0,07
Ti	0,38	0,09
Fe	3,63	0,19
Total	100	

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

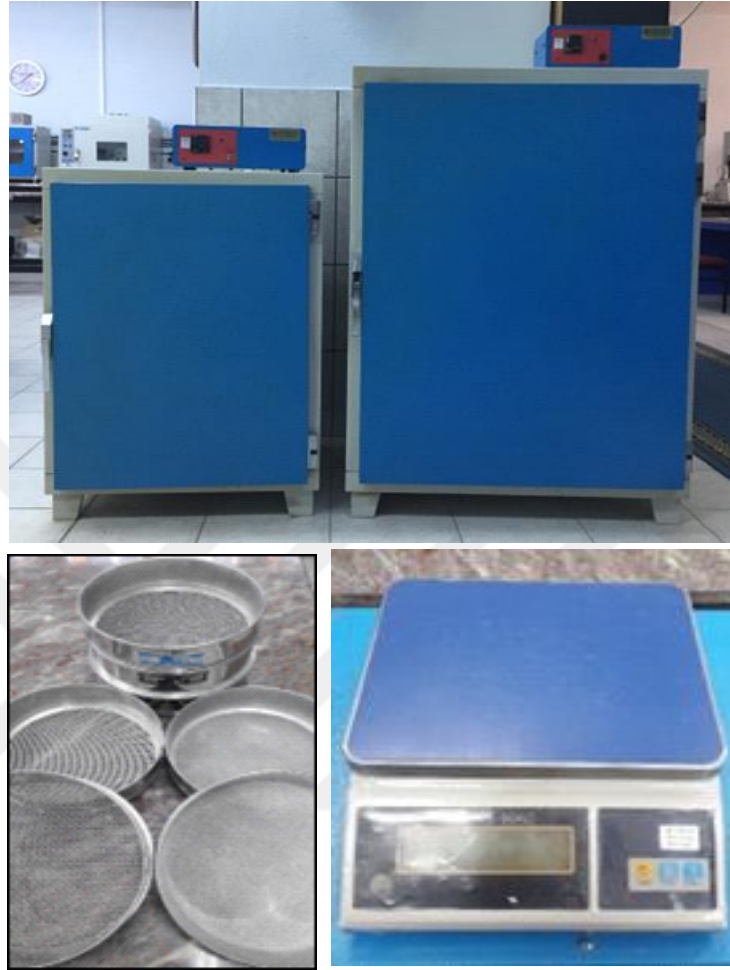
6.1. Agrega Deneyleri

Karayolu kaplamasında kullanılacak malzemelerin nasıl ve ne miktarda kullanılacağını belirlemek için öncelikle fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bilinmesi ve boyutlarına göre düzenlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla agregalar üzerinde çeşitli deneyler yapılmaktadır. Bu deneyler aşağıda açıklanmaktadır (Karacasu, 2016).

- Elek Analizi
- Los Angeles (Aşınma Kaybı) Deneyi
- Yassılık İndeksi Deneyi
- Kaba Agrega Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi
- İnce Agrega Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi
- Filler Agrega Özgül Ağırlığı Deneyi

6.1.1. Elek analizi

Elek analizleri KTŞ 2013 limit tip 1 esas alınarak yapılmaktadır. Elek analizi, HMA deneylerinde kullanılması gereken agrega boyutlarını ayırmak, standartlara uygun gradasyon boyutları elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Boyut dağılımı, bir numunedeki tanelerin boyutu ve miktarı arasındaki ilişkisidir ve bir numunenin boyut dağılımı, o numunede her boyuttan ne kadar malzemenin mevcut olduğunu göstermektedir. Bu deneyde kullanılan deney aletleri: Etüv, terazi ve elek Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Etüv, elekler ve terazi

6.1.1.1 Deneyin yapılışı

Öncelikle homojenliği sağlamak için agrega numuneleri iyice karıştırılır. Homojenizasyonun ardından, numune 110 ± 5 °C sıcaklıktaki bir etüvde 24 saat bekletilerek tamamen kuruduktan sonra oda sıcaklığında bekletilerek tartılır. Elekler, elek açıklığının büyüklüğüne göre en küçük elekten en büyük eleğe doğru, aşağıdan başlayarak sarsma makinesinin üstüne yerleştirilir. Tartılan homojen numuneler en üstteki eleğe konulur. Elek sarsma makinesi çalışmaya başlar ve her elek için yaklaşık bir dakika sürer. Elek üzerindeki malzemenin %1'inden daha azı elekten geçiyorsa çalkalama süresinin yeterli olduğunu

belirlemek mümkündür. Eleme işleminin ardından, her bir filtrede kalan malzemeyi 0,1 grama kadar hassas bir şekilde tartmak için bir terazi kullanılır.

6.1.1.2 Deney sonuçlarının hesaplanması

Her bir elek üzerinde kalan malzemenin ağırlığı, deneyde kullanılan toplam malzeme ağırlığına oranının bir yüzdesi olarak aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$P_s = \frac{W_s}{W_i} \times 100(\%) \quad (6.1)$$

Bu formülde;

P_s = Elek üstünde kalan malzeme oranı (%)

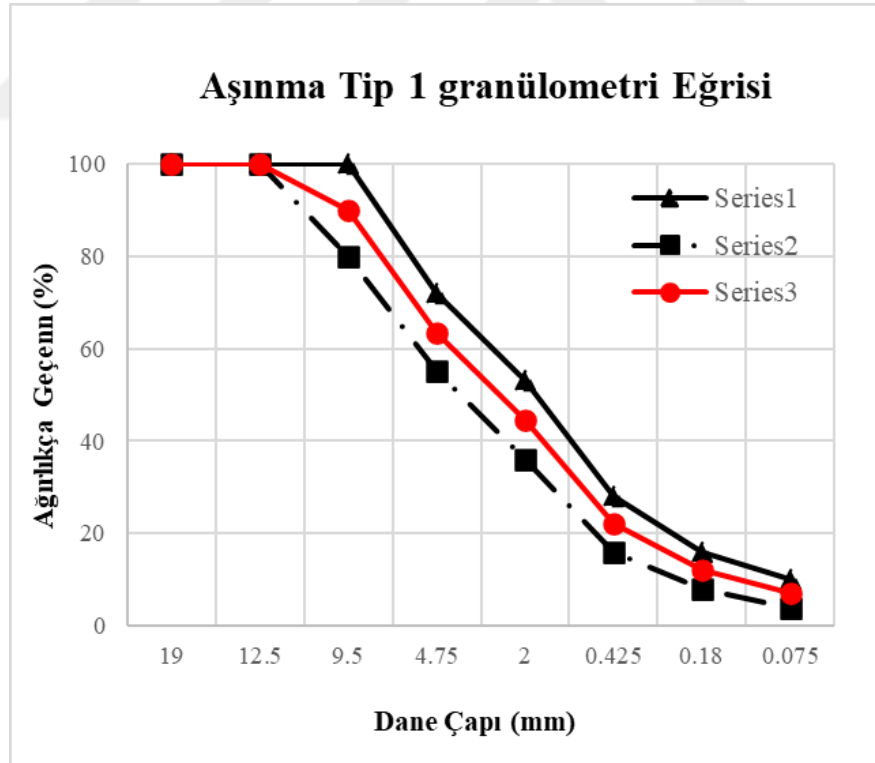
W_s = Elek üzerinde kalan malzeme miktarı (gr)

W_i = Deney numunesi miktarı (gr)

Bu araştırmada bitümlü sıcak karışım içinde agrega olarak kullanılmak için Eskişehir ili civarı taş ocaklarından üretilen kireçtaşı kullanılmıştır. Genel olarak, numuneler KTŞ tip-1 aşınma tabakası kriterlerine göre üretilmiştir. Çizelge 6.1'de KTŞ tip-1'de geçen aşınma tabakası şartname limitleri ve agrega gradasyonu gösterilmiştir. Agrega numunelerine ait tane boyutu dağılımı grafiği Şekil 6.2'de verilmiştir (KTŞ, 2013).

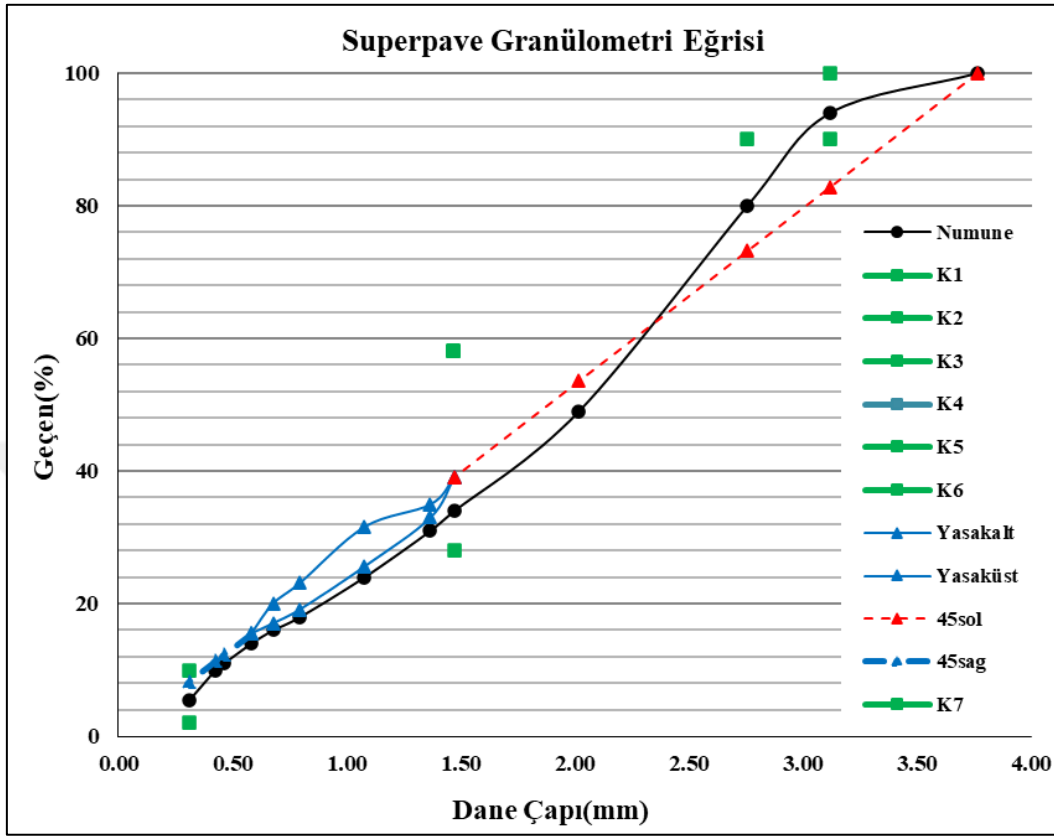
Çizelge 6.1. Aşınma tabakası tip-1 için agrega gradasyonu ve şartname limitleri

Elek No	Elek Boyu	Şartname Sınır		Geçen (%)	Kalan (%)	Ağırlık (gr)
		Üst	Alt			
3/4"	19	100	100	100	0	
1/2"	12,5	100	100	100	0	
3/8"	9,5	100	80	90	10	110
#4	4,75	72	55	63,5	26,5	291,5
#10	2	53	36	44,5	19	209
#40	0,425	28	16	22	22,5	247,5
#80	0,18	16	8	12	10	110
#200	0,075	10	4	7	5	55
Filler					7	77
Toplam						1100



Şekil 6.2. Agrega numunelerinin tane boyutu dağılımı

Superpave karışım tasarımı ampirik performansla ilgili kombinasyonel ve kompozit özelliklere dayanmaktadır. Daha düşük hacimli kaplamalar için yeterli performansı sağlamak



Şekil 6.3. Kullanılan agrega gradasyonu ve superpave tasarım limitleri

6.1.2. Los Angeles (aşınma kaybı) deneyi

Los Angeles Aşınma Deneyi olarak adlandırılan Los Angeles deneyinde, numune parçacıkları ile çelik bilyelerin yükü arasındaki karşılıklı yuvarlanma ve darbe yoluyla aşındırmak ve kırmak suretiyle agrega parçacık boyutunu azalttığı varsayılmaktadır. Deney hem küçük boyutlu hem de büyük boyutlu agregalar için tasarlanmıştır (Erichsen, vd. 2011).

Los Angeles deneyi için Avrupa Standardı, parçalanmaya karşı direncin belirlenmesi için bir yöntem olarak tanımlanmaktadır (European Standard, 2006). Rogers'a (1998) göre Los Angeles testi aşınmayı değil darbe direncini ölçmektedir. Los Angeles testi için Avrupa standardı test fraksiyonu 10/14 mm'dir.

6.1.2.1 Kullanılan deney aletleri

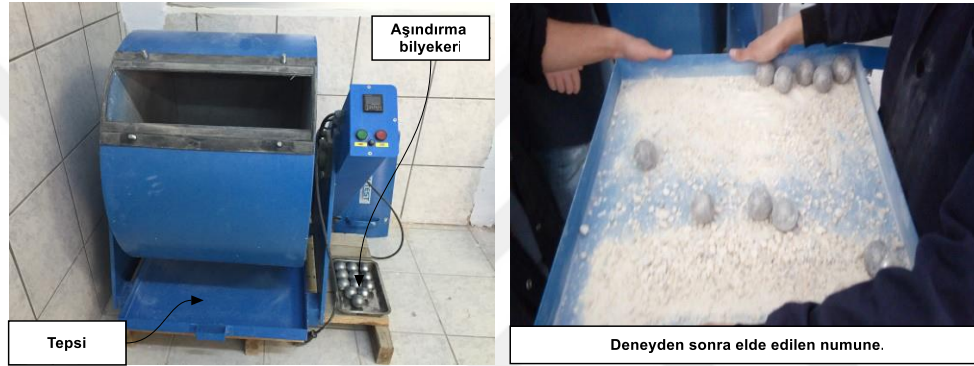
- **Aşındırma bilyeleri:** Bunlar dökme demir veya çelikten yapılmıştır. Çapı yaklaşık 48 mm'dir ve her bilyenin ağırlığı 390 ile 445 gram arasında değişmektedir. 12 bilye gerekmektedir.
- **Los Angeles (aşınma) deney makinesi:** Bu cihaz, içi boş çelik bir silindirden (tambur) oluşan, 12 mm et kalınlığında, eni 500 mm, her iki tarafı kapalı ve 700 mm iç çapına sahiptir. Tambur 30 – 33 rpm'de döner. Tamburun devir sayısını gösteren otomatik bir dijital sayaç bulunmaktadır.
- **Elek:** 80 mm, 63 mm, 50 mm, 40 mm, 25 mm, 20 mm, 12,5 mm, 10 mm, 6,3 mm, 4,75 mm, 2,36 mm ve 1,70 mm göz açıklığına sahip elekler kullanılmaktadır.
- **Terazi:** 0,01 gr hassasiyete sahip bir terazi gerekmektedir.

6.1.2.2 Deneyin yapılışı

- Numuneler yıkanarak temizlenmeli ve 105°C ile 110°C arasındaki bir sıcaklıkta kurutulmalıdır.
- Seçilen agregaların boyutları istenilen inşaat kalitesine mümkün olduğunca yakın olmalıdır. Derecelendirme standartlara uygun olmalıdır.
- A, B, C ve D sınıfları için tam olarak 5 kg numune ölçülür. E, F ve G sınıfları için numune ağırlığı 10 kg olmalıdır.
- Aşındırıcı bilyelerin seçimi agregaların derecesine göre yapılmalıdır.
- Agregaları ve seçilmiş aşındırıcı bilyeleri Los Angeles aşınma makinesinin silindirine koyulur. Kapağın yerine güvenli bir şekilde sabitlendiğinden emin olunmalıdır.
- Makine dakikada 30 ila 33 devirlik sabit bir hızda döndürülür. A, B, C ve D sınıfları için 500 devir, E, F ve G sınıfları için 1000 devir yapılmalıdır.
- Belirtilen devir sayısını tamamladıktan sonra makine durdurulur.

- Numuneler, oluşan taş tozuyla birlikte makinenin tamburundan bir tepsiye dikkatlice aktarılır.
- Malzemenin tamamı 1,70 mm'lik elekten geçirilir.
- 1,7 mm'den büyük malzeme 0,01 gr hassasiyetli bir terazi ile tartılır.

Şekil 6.4'te deney aletleri gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Los Angeles (aşınma kaybı) deney makinesi ve malzeme

6.1.2.3 Deney sonuçlarının hesaplanması

Sonuçlar aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır. Elde edilen değerler Çizelge 6.3'te gösterilmiştir.

$$LA_1 = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100(\%) \quad (6.2)$$

$$LA_2 = \frac{W_1 - W_3}{W_1} \times 100 (\%) \quad (6.3)$$

Çizelge 6.3. Los Angeles Deneyi Sonuçları

Agrega Los Angeles Deneyi	Birim	Miktar
W1	gr	5000
W2	gr	4226,5
LA500	%	15,47

6.1.3. Yassılık indeksi deneyi

Yassı tanelerin ağırlığının toplam ağırlığa oranına yassılık indeksi deneyi denir (Buket, 2023). Eni boyunun %60'ından az olan agreg a numunelerinin sınıflandırılmasıdır. Çizelge 6.4'te deneyde kullanılacak malzemenin hangi boyutlarda ve ne miktarda olacağı gösterilmektedir.

Çizelge 6.4. Agreg a boyutlarına göre alınması gereken minimum malzeme miktarları

Elek Açıklığı	Minimum Malzeme Miktarı (kg)
63-50	24
50-37,5	19
37,5-25	7
25-19	3
19-12,5	1,5
12,5-9,5	1
9,5-6,3	0,5

6.1.3.1 Kullanılan deney aletleri

Elekler standart ölçülerde yüksek mukavemetli çelik sacdan yapılmıştır. Korozyona karşı elektrostatik boya ile kaplanmıştır. Numune grupları 63 mm, 50 mm, 37,5 mm, 28 mm, 20 mm, 14 mm, 10 mm ve 6,3 mm göz açıklığına sahip elekler kullanılarak hazırlanmalıdır. Şekil 6.5'te yassılık indeksi şablonu gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Yassılık indeksi şablonu

6.1.3.2 Deneğin yapılışı

Elek analizi yapılarak deneye başlanır. 9,5 mm ve 12,5 mm'lik elekler arası malzemeden 500 gr alınarak yassılık indeksi şablonundan elle geçirilir. En son şablondan geçen numune ağırlığı tartılır.

6.1.3.3 Deney sonuçlarının hesaplanması

Sonuçlar aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır.

$$FI = \frac{W_s}{W_i} \times 100 \quad (6.4)$$

Burada;

FI: Yassı dane yüzdesi (%)

W_s: Şablondan geçen agrega miktarı (gr)

W_i: Elek arasında kalan agrega miktarı (gr)

Yassılık indeksi deneyinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

$$W_i = 500 \text{ gr} \quad W_s = 70 \text{ gr} \quad FI = \frac{70}{500} \times 100 = \%14$$

Aşınma tabakası için yassılık indeksinin Karayolları teknik şartnamesindeki sınır değeri %20'dir (KTŞ, 2013). Bu araştırma kapsamında kullanılan toplam numunelerin yassılık indeksi %14'tür. Numuneler şartname kriterleri içinde kalmaktadır.

6.1.4. Agrega birim hacim ağırlık deneyi

Burada deneyin amacı sıkışık ve gevşek haldeki agregaların birim hacim ağırlığını hesaplamaktır.

6.1.4.1 Kullanılan deney aletleri

- **Terazi:** 0,1 gr hassasiyete sahip bir terazi gerekmektedir.
- **Hacim ölçü kabı:** Şekli bozulmayacak kadar et kalınlığına sahip hacmi belirli silindirik metal kaplardır. Şekil 6.6'da gösterilmiştir.
- **Şişleme çubuğu:** Yarım küre uçlu, 60 cm uzunluğunda ve 1,6 cm çapında çelikten yapılmış bir çubuktur.



Şekil 6.6. Birim hacim ölçü kabı

Sıkışık birim hacim ağırlık: Öncelikle ölçü kabı tartılır ve daha sonra birim ağırlığı hesaplanacak malzemelerle üç aşamada doldurulur. Her aşamada şişle 25 darbe yapılarak sıkıştırılır. Üst yüzey görüldüğünde yüzey düzeltilir ve agregalar ile ölçü kabı birlikte tartılır.

Gevşek birim hacim ağırlık: Gevşek birim ağırlık deneyinde de sıkıştırılmış birim ağırlık deneyinde olduğu gibi aynı yöntemler kullanılır, tek fark bu deneyde agregaların ölçüm kabına serbestçe dökülerek sıkıştırma yapılmadan ağırlık birim hacminin ölçülmesidir.

6.1.4.2 Deney sonuçlarının hesaplanması

Sıkışık birim hacim ağırlığı aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$BHA_s = \frac{(W_s - W_i)}{V} \left(\frac{gr}{cm^3} \right) \quad (6.5)$$

Formülde;

BHA_s = Sıkışık birim hacim ağırlık (gr/cm^3)

W_i = Ölçü kabının boş ağırlığı (gr)

W_s = Ölçü kabının sıkışık agregası ile dolu ağırlığı (gr)

V = Ölçü kabının hacmi (cm^3)

Gevşek birim hacim ağırlığı aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$BHA_s = \frac{(W_s - W_i)}{V} (gr/cm^3) \quad (6.6)$$

Formülde;

BHA_g = Agregası gevşek birim hacim ağırlığı (gr/cm^3)

W_i = Ölçü kabının boş ağırlığı (gr)

W_s = Ölçü kabının gevşek agregası ile dolu ağırlığı (gr)

V = Ölçü kabının hacmi (cm^3)

Sıkışık ve gevşek birim hacim ağırlığının deney sonuçları Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.5. Agregası sıkışık birim hacim ağırlık deneyi sonucu

Sıkışık Birim Hacim Ağırlık Deneyi	Birim	Miktar
W_i	gr	5253
W_s	gr	9956
V	cm^3	3000
BHA_s	gr/cm^3	1,567

Çizelge 6.6. Agregası gevşek birim hacim ağırlık deneyi sonucu

Gevşek Birim Hacim Ağırlık Deneyi	Birim	Miktar
W_i	gr	5253
W_s	gr	9158
V	cm^3	3000
BHA_g	gr/cm^3	1,302

6.1.5. Özgöl ağırlık ve su emme deneyi

Bir numunenin ağırlığının hacmine oranına aynı numunenin özgöl ağırlığı denir. Bu deneyde özgöl ağırlığın hesaplanmasındaki amaç, bitümlü karışım arasındaki boşluk yüzdesini hesaplamak ve agreganın hacim-ağırlık ilişkisini belirlemektir. Aşağıda ince ve kaba agregalar için özgöl ağırlık deneyleri ayrı ayrı yapılmaktadır (Keskin, 2019).

6.1.6. Kaba agrega özgöl ağırlık ve su emme deneyi

Bu deney, 4,75 mm elek üzerinde kalan tanelerden oluşan kaba agregaların hacimsel özgöl ağırlığını, yüzey kuru suya doymun özgöl ağırlığını, zahiri özgöl ağırlığını ve su emme miktarını belirlemek için kullanılır (Keskin, 2019).

6.1.6.1 Kullanılan deney aletleri

Gerekli aletler aşağıda listelenmiş olup Şekil 6.7’de gösterilmektedir.

- **Terazi:** Yaklaşık 3 kg kapasiteli ve 0,5 gr hassasiyetle tartım yapabilen hassas bir terazi. Bu terazi, numune kaplarının suda asılı haldeyken tartılmasına izin verecek şekilde tasarlanmalıdır.
- **Kafes örgülü sepet:** Gözenek boyutu en fazla 6,3 mm olan bir tel sepet veya teraziden sarkıtmaya uygun, ince tel askıları olan uygun boyutta delikli bir kap.
- **Kova:** Bir tel sepetin sığabileceği kadar su dolu bir kova.
- **Kurutma bezleri:** Agregaların üzerindeki suyu emmek için kullanılan bezler.
- **Özgöl ağırlık sehpa:** Yükseklik sağlayan ve numuneyi suda tartma imkânı sağlayan ayarlanabilir bir sehpa.



Şekil 6.7. Kaba agregat, kafes örgülü sepet ve özgül ağırlık sehpası

6.1.6.2 Numune hazırlama ve deneyin yapılışı

İri agregalarda özgül ağırlık ve su emme deneylerinin yapılmasına ilişkin adımlar aşağıda verilmiştir.

- Yaklaşık 2 kg agregat numunesi iyice yıkanır, suyu süzülür ve tel sepete yerleştirilir. Sepet içindeki agregalarla beraber damıtılmış suya daldırılır. Su sıcaklığı 22-32°C arasında olmalıdır. Sepetin üstünü en az 5 cm geçecek şekilde su ilavesi yapılır.

- Daldırma işleminden hemen sonra, sepet tankın tabanından 25 mm yukarı kaldırılarak sarsılır ve numunedeki sıkışmış hava çıkarılır. Sepet ve içindeki agregalar 24 saat boyunca tamamen suya batırılmış halde tutulur.
- 24 saat sonra, sepet ve agregalar 22°-32°C sıcaklıktaki suda asılı haldeyken tartılır ve W1 olarak kaydedilir.
- Sepet ve agregalar sudan çıkarılır ve birkaç dakika süzölmeleri beklenir. Ardından agregalar kuru emici bezlere aktarılır. Boş sepet su tankına tekrar koyulur, 25 kez sarsılır ve suya batırılmış haldeyken tartılır ve W2 olarak kaydedilir.
- Emici bezler üzerindeki agregalar, daha fazla nem kaybetmeyecek şekilde yüzeyleri kurutulmalıdır. Ardından, yüzeyi kurutulmuş agrega ikinci bir kuru beze aktarılır ve tek bir katman halinde yayılır. Tam yüzey kuruluğuna ulaşana kadar en az 10 dakika kurumaya bırakılır. Kuruduktan sonra tartılır ve W3 olarak kaydedilir.
- Agregalar derin olmayan bir tepsiye yerleştirilir. 110 °C sıcaklığa ayarlanmış bir fırında 24 saat boyunca bekletilir. Fırından çıkarılan numuneler hava almayan bir kapta soğumaya bırakılır. Soğuduktan sonra tartılır ve W4 olarak kaydedilir.

6.1.6.3 Deney sonuçlarının hesaplanması

Kaba agreganın hacim özgül ağırlık, yüzey kuru suya doymun özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık, efektif özgül ağırlık ve su emme oranı yüzdesi sırası ile aşağıdaki formüllerle hesaplanır. Deney sonuçları Çizelge 6.7’de gösterilmektedir.

$$SG_b = \frac{A}{B - C} \quad (6.7)$$

$$SG_{ssd} = \frac{B}{B - C} \quad (6.8)$$

$$SG_a = \frac{A}{A - C} \quad (6.9)$$

$$G_{se} = \frac{SG_b + SG_a}{2} \quad (6.10)$$

$$SE = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (6.11)$$

Burada;

A= Agreganın kuru ağırlığı (gr)

B= Agreganın suya doymuş yüzey kuru ağırlığı (gr)

C= Agreganın sudaki ağırlığı (gr)

E = Kuru numune ağırlığı (gr)

SG_b= Agreganın hacim Özgöl ağırlık (kg/m³)

SG_{ssd}= Agreganın yüzey kuru suya doymuş özgül ağırlık (kg/m³)

SG_a= Agreganın zahiri özgül ağırlık (kg/m³)

G_{se} = Agreganın efektif özgül ağırlık (kg/m³)

SE = Agreganın su emme %'si

Çizelge 6.7. Kaba agreganın özgül ağırlık ve su emme deneyi sonucu

		Numune 1	Numune 2	Ortalama
Agreganın Kuru Ağırlığı (gr)	A	1987	1986,09	1986,54
Agreganın Suya Doymuş Yüzey Kuru Ağırlığı (gr)	B	1997	1996,5	1996,81
Agreganın Sudaki Ağırlığı (gr)	C	1254	1254,9	1254,58
Hacim Özgöl Ağırlık (gr/cm³)	SG _b	2,675	2,678	2,676
Yüzey Kuru Suya Doymuş Özgöl Ağırlık (gr/cm³)	SG _{ssd}	2,688	2,692	2,690
Zahiri Özgöl Ağırlık (gr/cm³)	G _{sa}	2,712	2,716	2,714
Efektif Özgöl Ağırlık (gr/cm³)	G _{se}	2,723	2,697	2,710
Su Emme (%)'si		0,510	0,524	0,517
STANDART		ASTM C 127		

6.1.7. İnce agreganın özgül ağırlık ve su emme deneyi

Bir agreganın özgül ağırlığı, belirli bir hacimdeki numunenin ağırlığının, aynı sıcaklıktaki eşit hacimdeki suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanır. İnce agreganın özgül ağırlığı genellikle beton karışım tasarımlarıyla ilgili hesaplamalar, nem içeriğinin belirlenmesi ve betonun hacimsel veriminin hesaplanması için gereklidir. Özgül ağırlık aynı zamanda agreganın kalitesi ve özellikleri hakkında da bilgi verir.

6.1.7.1 Kullanılan deney aletleri

- **Piknometre:** 1000 ml veya 500 ml hacimli piknometreler.
- **Terazi:** 0,1 gr hassasiyete sahip bir terazi.
- **Numune tepsisi:** Geniş ve sığ bir tepsi.
- **Metal koni kalıp:** Alt çapı 90 mm, üst çapı 40 mm, yüksekliği 75 mm ve cidar kalınlığı 0,8 mm olan bardak biçiminde metalden yapılmış özel bir kalıp.
- **Metal sıkıştırıcı:** Yaklaşık 340 gr ağırlığında ve 25 mm çapında metalden yapılmış bir çubuk.
- **Sıcak hava kaynağı:** Saç kurutma makinesi veya sıcak hava tabancası.

Şekil 6.8’de kullanılan deney aletleri gösterilmektedir.



Şekil 6.8. İnce agreganın özgül ağırlığının bulunması

6.1.7.2 Numune hazırlama ve denevin yapılışı

Bu deneyi gerçekleştirmek için 0,075 ile 4,75 mm elekler arası malzemeden en az 1000 gram agrega numunesi alınarak malzeme iki tepsiye bölünür ve her tepside 500 gram malzeme 24 saat suda bekletilir. 24 saat sonra numune, ince malzemenin su ile kaybolmaması için dikkatlice süzülür. Süzme işleminden sonra kalan numuneler sıcak hava tabancası veya saç kurutma makinesi yardımıyla kurutulur. Yüzey kuru suya doymun ağırlığını bulmak için koni yöntemi kullanılır. Bu yöntem metal bir koni ve bir şiş çubuğu ile üç katman halinde yapılır. Her katman 25 vuruşla sıkıştırılır. Numunenin doldurulduğu koni, tepsiye konulur. Koni tepside kaldırılır ve numunenin yüzeyi kuru suya doymun ise ince agregalar serbestçe düşer, düşmezlerse kurutma işlemine devam edilir. Bir sonraki adım numunenin sudaki ağırlığını bulmaktır. Öncelikle piknometre boş iken ve içi su dolu iken tartılır. Daha sonra piknometredeki su boşaltılır ve yüzeyi kuru suya doyurulmuş 500 gram ince agrega piknometrenin içine konularak piknometre ile tartılır. Malzemeler arasındaki hava boşluklarını gidermek için piknometre iki yönde döndürülür. Daha sonra piknometre çizgisine kadar su ilave edilerek tartılır. Son olarak numune bir tepsiye konulup 110 °C sıcaklıktaki fırında kurutulur. Fırından çıkarılan ve oda sıcaklığına soğutulan kuru numunenin ağırlığı tartılır (Karacasu, 2016; Wafaie, 2022).

6.1.7.3 Deney sonuçlarının hesaplanması

İnce agreganın hacim özgül ağırlık, yüzey kuru suya doymun özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık, efektif özgül ağırlık ve su emme oranı yüzdesi hesaplanışı aşağıdaki formüllerle sırayla verilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 6.8’de gösterilmektedir.

$$SG_b = \frac{E}{B + C - A - D} \quad (6.12)$$

$$SG_{ssd} = \frac{C - A}{B + C - A - D} \quad (6.13)$$

$$SG_a = \frac{E}{B - E - D} \quad (6.14)$$

$$G_{se} = \frac{SG_b + SG_a}{2} \quad (6.15)$$

$$SE = \frac{C - A - E}{E} \times 100 \quad (6.16)$$

A = Piknometre ağırlığı (gr)

B = Piknometre + Su ağırlığı (gr)

C = Piknometre + Agregaya yüzey kuru suya doygun numune ağırlığı (gr)

D = Piknometre + Su + Agregaya yüzey kuru-suya doygun numune ağırlığı (gr)

E = Agregaya kuru numune ağırlığı (gr)

SG_b = Agregaya Hacim Özgöl ağırlık (gr/cm³)

SG_{ssd} = Agregaya yüzey kuru suya doygun özgül ağırlık (gr/cm³)

SG_a = Agregaya zahiri özgül ağırlık (gr/cm³)

G_{se} = Agregaya efektif özgül ağırlık (gr/cm³)

SE = Agregaya su emme %'si

Çizelge 6.8. İnce agregaya özgül ağırlık ve su emme deneyi sonucu

		Numune 1	Numune 2	Ortalama
Piknometre Ağırlığı (gr)	A	704,99	696,98	
Piknometre + Su (gr)	B	1701,9	1676,16	
Piknometre + YKSD Numune Ağırlığı (gr)	C	1223,96	1214,89	
Piknometre + Su + YKSD Numune Ağırlığı (gr)	D	2017,89	2008,86	
Kuru Numune Ağırlığı (gr)	E	500	500	
Hacim Özgöl Ağırlığı (gr/cm³)	SG _b	2,463	2,700	2,581
Zahiri Özgöl Ağırlık (gr/cm³)	G _{sa}	2,717	2,989	2,853
YKSD Özgöl Ağırlık (gr/cm³)	SG _{ssd}	2,557	2,796	2,677
Efektif Özgöl Ağırlık (kg/cm³)	G _{se}	2,590	2,844	2,717
Su Emme (%)’si	SE	3,794	3,582	3,688
STANDART		ASTM C 128 04		

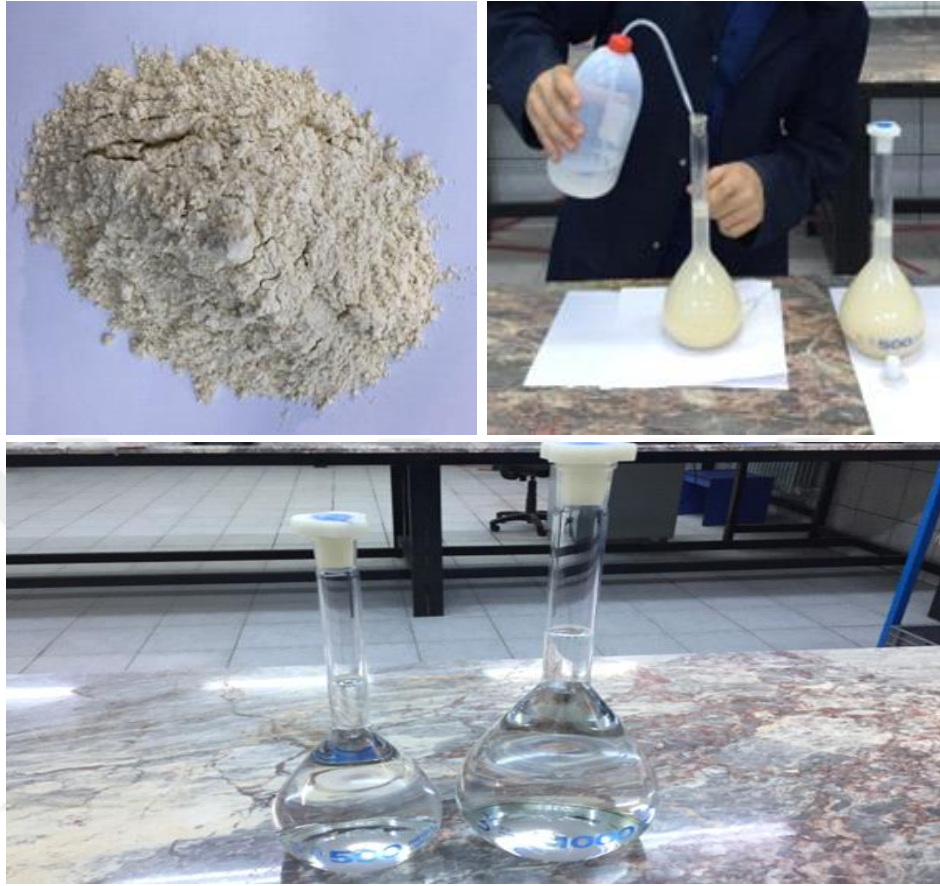
6.1.8. Filler agregata özgül ağırlık deneyi

Çeşitli çalışmalara göre mineral fillerin (P200 malzemesi) özellikleri, özellikle 0,075 mm (No. 200) eleği altında kalan malzeme bitümlü sıcak karışımlarının performansı üzerinde kalıcı deformasyon (tekerlek izi), yorulma çatlaması ve neme duyarlılık açısından önemli bir etkiye sahiptir (EYADA, 2009). Bu deney, dolgu agregalarının özgül ağırlığını (0,075 mm'lik elekten geçen taneler) ölçmeyi amaçlamaktadır (Karacasu, 2016).

6.1.8.1 Kullanılan deney aletleri

- **Piknometre:** 1000 ml kapasiteli piknometre.
- **Terazi:** 0,001 gram hassasiyete sahip bir terazi.
- **Vakum pompası:** Ortam basıncının 3,0 KPa'ya düşürülmesini sağlayacak bir vakum pompası.

Kullanılan deney aletleri Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9. Filler agreganın özgül ağırlığının bulunması

6.1.8.2 Deneyin yapılışı

Bu deneyde 0,075 mm'lik elekten geçen 100 gram agregaya kullanılır. Daha sonra sabit ağırlığını elde etmek için numune, 110 °C sıcaklıktaki bir fırına yerleştirilir. Kuruduktan sonra numune piknometre içerisine konulur ve tartılır. Son olarak numuneye piknometre çizgisine kadar su eklenir ve tekrar tartılır.

6.1.8.3 Deney sonuçlarının hesaplanması

Filler agregalarının zahiri özgül ağırlığı aşağıdaki formüllerle bulunur. Deney sonuçları Çizelge 6.9'da gösterilmektedir.

$$SG_a = \frac{E}{(B - A) + (D - C)} \quad (6.17)$$

Burada:

A = Piknometrenin ağırlığı (gr)

B = Piknometre + Su ağırlığı (gr)

C = Piknometre + Numune ağırlığı (gr)

D = Piknometre + Numune + Su ağırlığı (gr)

E = Kuru numunenin ağırlığı (gr)

SG_a = Numunenin zahiri özgül ağırlığı (gr/cm³)

Çizelge 6.9. Filler agregata özgül ağırlık deneyi sonucu

		Numune 1	Numune 2	Ortalama
Piknometre ağırlığı (gr)	A	132,87	143,74	138,80
Piknometre + Su (gr)	B	630,77	642,99	637,27
Piknometre + Numune ağırlığı (gr)	C	231,44	243,88	238,81
Piknometre + Su + Numune ağırlığı (gr)	D	694,88	706,98	701,34
Kuru numune ağırlığı (gr)	E	100	100	100
Zahiri Özgül Ağırlık (gr/cm³)	G _{sa}	2,39	2,45	2,419
STANDART		ASTM C128		

Çizelge 6.10'da agregata test sonuçları verilen agregata malzemesi Eskişehir bölgesinden elde edilen kireçtaşından yapılmıştır.

Çizelge 6.10. Agregaların fiziksel özellikleri

Deney		Değer	Standart
Kaba Agregası	Zahiri ÖA (g/cm^3)	2,709	ASTM C127
	Hacim ÖA (g/cm^3)	2,681	
	YKSD ÖA (g/cm^3)	2,691	
İnce Agregası	Zahiri ÖA (g/cm^3)	2,858	ASTM C128
	Hacim ÖA (g/cm^3)	2,596	
	YKSD ÖA (g/cm^3)	2,688	
Filler	Hacim ÖA (g/cm^3)	2,783	ASTM C128
Su Emme (%)		0,38	ASTM C127
Sıkı Birim Hacim Ağırlık (g/cm^3)		1,572	ASTM C 29
Gevşek Birim Hacim Ağırlık (g/cm^3)		1,301	ASTM C 29
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)		16,14	ASTM C 131
Yassılık İndeksi (%)		13	ASTM D 4791
Donma - Çözülme Dayanımı (%)		4	ASTM C 88

6.2. Karışım Deneyleri

Bu deney, BSK laboratuvar tasarımında temel ve üst yapıdaki kaplamaların yük altında olası deformasyonlarını ve performanslarını değerlendirmek amacıyla kullanılır (Buket, 2023; Wafaie, 2022).

6.2.1. Marshall tasarımı

Asfalt karışım tasarımı, dayanıklı ve uzun ömürlü kaplamaların yapımında önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntem ilk olarak Bruce Marshall tarafından önerilmiştir. Asfalt sektöründe de halen yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Marshall karışım tasarım yönteminin amacı, karışımın gerekli mukavemetini ve esnekliğini sağlayan asfalttaki optimum bitüm ve agrega yüzdesini belirlemektir. Bu yöntem sadece yeni kaplamaların tasarımında

değil aynı zamanda mevcut kaplamaların değerlendirilmesinde ve rutin test programlarında asfalt karışımının belirlenen gereksinimleri karşıladığından emin olmak için kullanılır (Khodadi, 2020; MTP,2023).

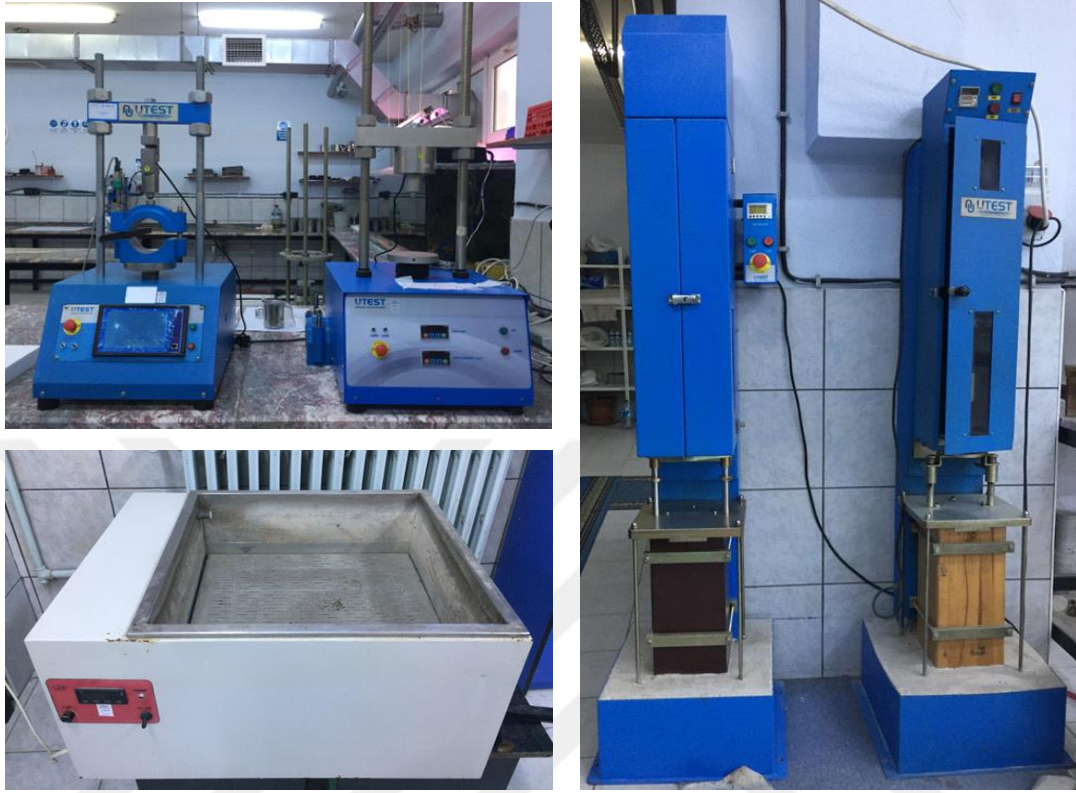
6.2.1.1 Kullanılan deney aletleri

- **Mikser:** Asfalttaki agreg ve bitümün homojenleştirilmesinde kullanılan cihazdır.
- **Mikser ısıtma kabı:** Agreg ve bitümün karıştırılması sırasında mikserin tutulması ve ısı kaybının önlenmesi amacıyla, mikser kabının altına yerleştirilen portatif bir cihazdır.
- **Kürek ve şişleme çubuğu:** Bu iki alet asfaltı sıkıştırıp kalıpların arasına yerleştirmek için kullanılır.
- **Numune kalıpları:** Silindirik metal kalıplar 100 mm çapında ve 63,5 mm yüksekliğindedir. Üç bölümden oluşur; üst kapak, orta kalıp ve alt kısımdır.
- **Marshall test cihazı:** Bu cihaz Marshall briketlerinin mukavemetini ve akış hızını ölçmek için kullanılır. Yükleme hızı 51 mm/dakikadır.
- **Marshall tokmağı:** Asfaltın kalıplarda sıkıştırılması ve Marshall deneyine numune hazırlanmasında kullanılır.
- **Sıcak su banyosu:** Kalıptan çıkan numunelerin 60 °C sıcaklığındaki suda bekletilmesini sağlayan cihazdır.
- **Kriko:** Bu cihaz numunelerin kalıplardan çıkarılması için kullanılır.
- **Sıcaklık ölçer:** Asfalt betonu karışımının sıcaklığını belirlemek için kullanılan bir alettir.
- **Kumpas:** Numunenin yüksekliğini ölçmek için kullanılan dijital ekrana sahip bir alettir.
- **Dijital terazi:** Bu terazi yeterli kapasiteye ve $\pm 0,1$ gr hassasiyete sahiptir.

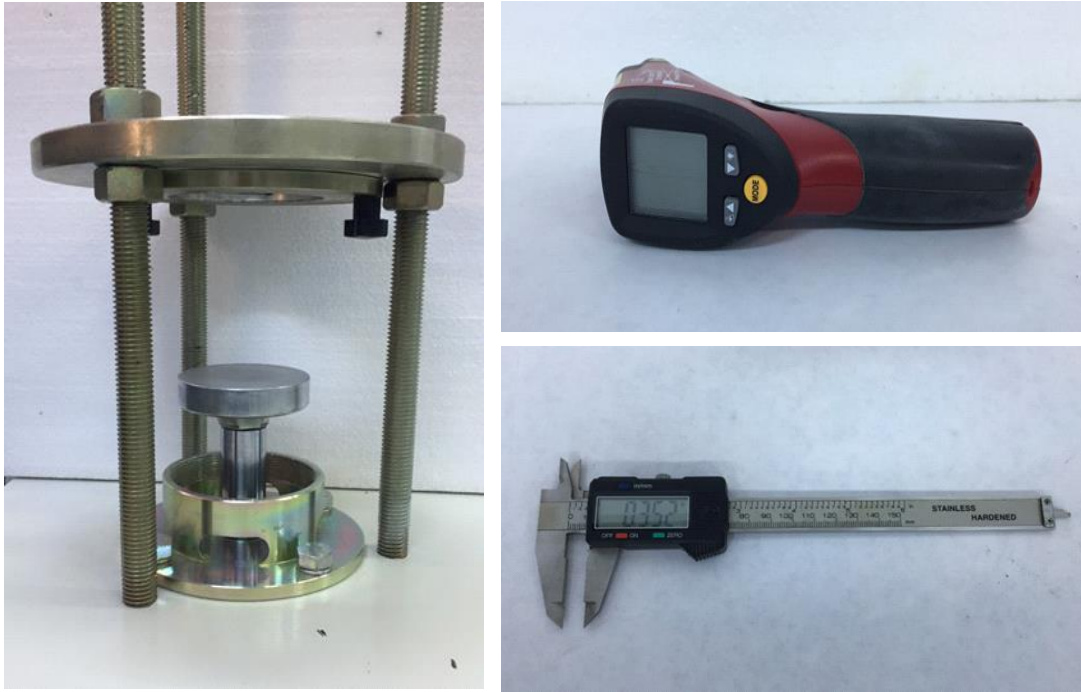
Kullanılan deney aletleri Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12’de gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Mikser, mikser ısıtma kabı, kürek ve şişleme çubuğu, numune kalıpları



Şekil 6.11. Marshall test cihazı, sıcak su banyosu ve marshall tokmağı



Şekil 6.12. Kriko, sıcaklık ölçer ve kumpas

6.2.1.2 Asfalt betonu numunelerinin hazırlanması

İri, ince ve filler agregası olmak üzere üç çeşit granülometriden hazırlanmış numuneler testten bir gün önce 160 °C'deki etüve yerleştirilir. Numune üretmek için kullanılacak bitüm, deney aletleri ve kaplar da deneyden 3 saat önce 160 °C'deki başka bir etüve yerleştirilir. Hazırlanan malzemeler Şekil 6.13'te gösterilmiştir.

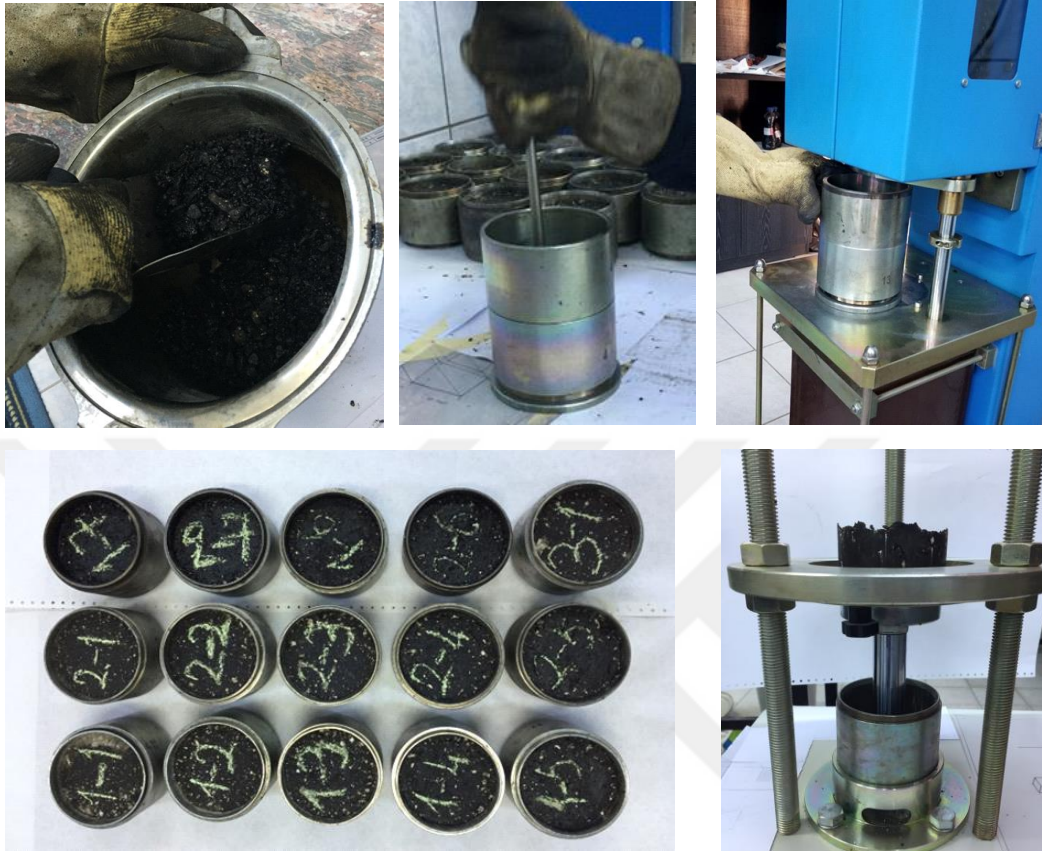


Şekil 6.13. Agregası numunelerinin hazırlanması

Agregalar etüvden çıkarılarak karıştırma kabına dökülür. Hassas terazi üstünde bulunan kabın içindeki agregaların orta kısmı açılarak gerekli miktardaki bitüm içine akıtılır. Her bir test serisinde kullanılan bitüm yüzdesi, %0,5'lik bir artışla agregası ağırlığının %3,5'i ile %6,5'i arasında değişmektedir (%3,5-%4-%4,5-%5-%5,5-%6,5). Numuneler mikserde 90 saniye karıştırılır ve soğumaması için alttan mikser ısıtma kabı ile desteklenir. Numune kalıpları içine kürek ile doldurulan agregası-bitüm karışımına arasında boşluk kalmaması için şişleme işlemi uygulanır. Marshall tokmağının altına yerleştirilen numune kalıbı her iki taraftan 75'er vuruşla sıkıştırılır. Numuneler kriko yardımı ile kalıptan çıkarılarak soğumaya bırakılır. Ölçüleri alınan numuneler bir gün sonra Marshall stabilite ve akma deneylerine tabi tutulur. Numune hazırlanmasına ait resimler Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Agrega ve bitüm karışımının hazırlanması



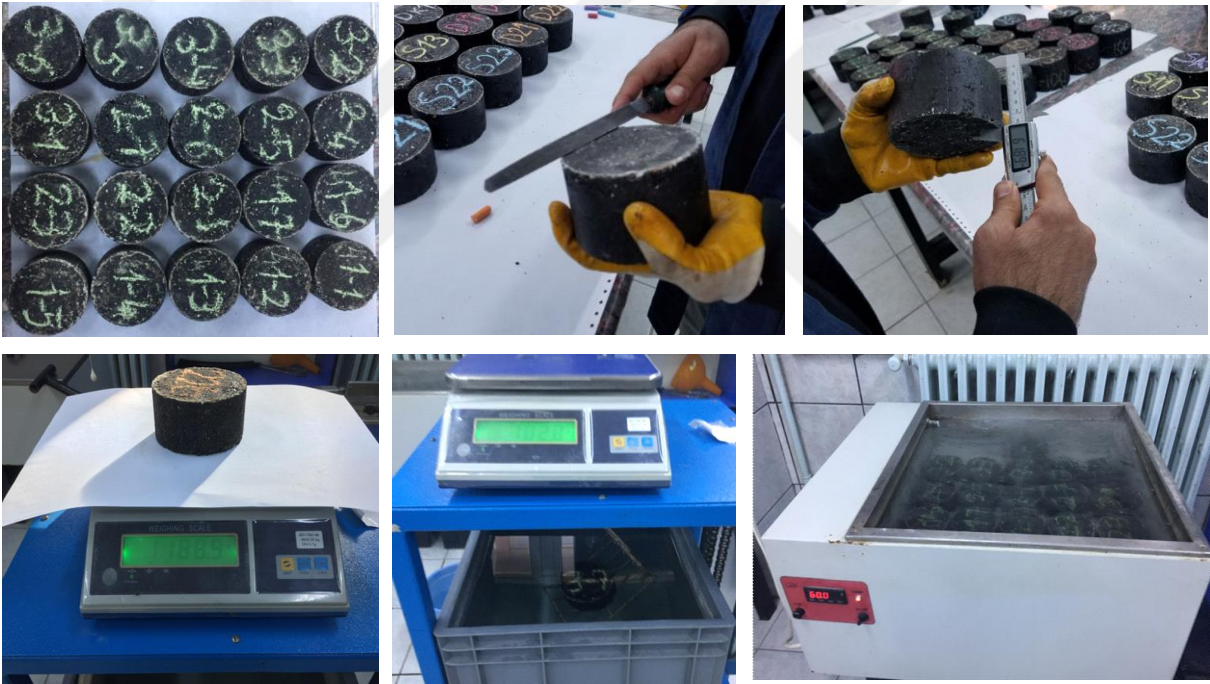
Şekil 6.15. BSK numunesinin kalıba yerleştirilmesi ve kompaktör ile sıkıştırılması

6.2.2. Marshall stabilite ve akma deneyi

Marshall stabilite deneyinin amacı bitümlü karışımın stabilitesini ve akma değerini belirlemektir. Bu deney ile bitümlü karışımın kırılma noktası, bitümlü karışım oranının tasarımına temel oluşturacak şekilde değerlendirilebilir. Bu yöntem aynı zamanda asfalt kaplama inşaatının kalitesini test etmek için de kullanılmaktadır.

Asfalt beton numuneleri oda sıcaklığında bekletilir. Soğuyan numunelerin önce eğe yardımıyla düzgün olmayan yüzeyleri düzeltilir. Daha sonra her numunenin yüksekliği üç noktadan (120 derecelik açılarla) ölçülür. Son olarak numunelerin havada ve sudaki ağırlıkları ölçülür. Ardından, her bir numunenin üç ayrı yerinden (yaklaşık 120 derecelik açı mesafeleri verilerek) yükseklik ölçüsü alınır. Sonrasında, numunelerin su ve hava içindeki ağırlık ölçümleri yapılır (Kara, 2012).

Numuneler, istenilen sıcaklığa ulaşabilmesi için 30 ila 40 dakika sıcak su banyosunda tutulmalıdır. Asfalt betonu için maksimum banyo sıcaklığı 60 °C'dir. Marshall tasarım cihazı, numunenin aynı metal eğrinin içine yerleştirildiği sabit bir çap ve çelik eğri mekanizmasından oluşur. Marshall deney cihazı, numunelere yük uygulayarak sıkıştırma gerçekleştirir. Daha sonra sıkıştırma makinesinde yükleme dakikada 50,8 mm (2inç) hızla gerçekleştirilir. Numuneler deforme olmayana veya kırılmayana kadar yük uygulamaya devam edilir. Deney yapıldıktan sonra Marshall test cihazından direnç ve akma değerleri okunarak not edilir (Erkara, 2014). Marshall deneyine ait resimler Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'te gösterilmiştir.



Şekil 6.16. Kalıptan çıkarılmış numunelerin havadaki ve sudaki ağırlıklarının tespit edilmesi



Şekil 6.17. Marshall test cihazı ve kırılmış numuneler

6.2.2.1 Deney sonuçlarının hesaplanması

Deneyden sonra optimum bitüm oranının (OBO) belirlenmesi için tüm veriler Marshall deney formlarına kaydedilir. Daha sonra, test formlarında bulunan çeşitli hesaplamalar kullanılarak, her bir numunenin mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenir. Numunelerin yükseklikleri farklı olduğundan, yükseklikleri eşitlemek için bir düzeltme faktörü kullanılır. Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)'ye göre her numunenin katsayısı 1 ve ortalama yüksekliği 63,51'dir. Briketin yüksekliği (Hort), Hort<63,5 mm ise düzeltme faktörü>1, Hort>63,5 mm ise düzeltme faktörü<1'dir. Özgül ağırlığı (Gag) ve teorik özgül ağırlığı (Dt) hesaplamak için aşağıdaki formüller kullanılır.

$$G_{ag} = \frac{1}{\frac{\%KA}{G_{KA}} + \frac{\%IA}{G_{IA}} + \frac{\%F}{G_F}} \quad (6.18)$$

$$D_t = \frac{100 + \%B}{\frac{\%KA}{G_{KA}} + \frac{\%IA}{G_{IA}} + \frac{\%F}{G_F} + \frac{\%B}{G_B}} \quad (6.19)$$

Burada;

G_{ag} : Agreganın Özgül Ağırlığı (kg/m^3)

D_t : Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (kg/m^3)

%KA : Kaba Agregaya Yüzdesi

%İA : İnce Agregaya Yüzdesi

%F : Filler Yüzdesi

%B : Bitüm Yüzdesi

G_{KA} : Kaba Agregaya Özgül Ağırlığı (gr/cm^3)

$G_{İA}$: İnce Agregaya Özgül Ağırlığı (gr/cm^3)

G_F : Filler Özgül Ağırlığı (gr/cm^3)

G_B : Bitüm Özgül Ağırlığı (gr/cm^3)

Bulunan tüm değerler için ayrı ayrı bitüm yüzdesi grafiği çizilir. Grafikler 2. derece polinom fonksiyonudur. Çizilen grafiklerden Marshall dayanımı (MD), boşluk oranı (BO), pratik özgül ağırlık (PÖA) ve bitümle dolu boşluk oranı (BDBO) değerleri bulunur. Çizelge 6.11'de Marshall Tasarım Kriterleri verilmiştir.

Çizelge 6.11. Marshall tasarım kriterleri

Deney Adı	Bitüm Oranı (%)	
Kaplama türü	Binder	Aşınma
Pratik özgül ağırlık (gr/cm^3)	Maks.	Maks.
Marshall Dayanım (kg)	Min. 750	Min. 900
Boşluk oranı (%)	4-6	3-5
Bitümle dolu boşluk oranı (%)	60-75	65-75
Agregalar arası boşluk oranı (VMA)(%)	Min. 13	Min. 14
Akma (mm)	2-4	2-4

Bir adet kontrol, %25, %50, %75 ve %100 olmak üzere toplamda 5 adet TSTC dökümü yapılmıştır. Bu çalışmada 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Aşağıda, tez için yapılan Marshall dökümlerinin sonuçları listelenmektedir.

Optimum bitüm oranının hesaplanması için 50/70 saf bitüm kullanılarak gerçekleştirilen kontrol numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 6.12’de gösterilmektedir. 50/70 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol (katkısız) Marshall deney sonuçları Çizelge A.1’de, grafikleri Şekil A.1, Şekil A.2, Şekil A.3, Şekil A.4, Şekil A.5, Şekil A.6 ve Şekil A.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.12. Kontrol numunelerinin deney sonuçları

Kontrol 50/70	Bitüm Oranı (%)	Pratik Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	Boşluk Oranı (%)	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Marshall Stabilite (kg)	Akma	MQ	VMA (%)
1	3,5	2,350	8,75	46,54	1438,92	2,076	693,12	16,50
2	4	2,364	7,59	53,44	1523,08	2,163	731,37	16,44
3	4,5	2,397	5,62	63,74	1585,11	2,438	750,54	15,66
4	5	2,429	3,69	74,99	1662,33	2,623	707,05	14,93
5	5,5	2,442	2,53	82,57	1526,76	3,031	557,69	14,90
6	6	2,444	1,80	87,72	1377,50	3,338	416,41	15,24
7	6,5	2,432	1,64	89,36	1115,22	4,049	275,09	16,05

Optimum bitüm oranının hesaplanması için 50/70 saf bitüm kullanılarak gerçekleştirilen %25 TSTC katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 6.13’te gösterilmektedir. 50/70 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %25 TSTC katkılı Marshall deney sonuçları Çizelge B.1’de, grafikleri Şekil B.1, Şekil B.2, Şekil B.3, Şekil B.4, Şekil B.5, Şekil B.6 ve Şekil B.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.13. %25 TSTC katkılı numunelerin deney sonuçları

%25 Atık 50/70	Bitüm Oranı (%)	Pratik Özgül Ağırlık (gr/cm3)	Boşluk Oranı (%)	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Marshall Stabilite (kg)	Akma	MQ	VMA (%)
1	3,5	2,250	11,84	41,25	1131,14	2,062	548,56	17,75
2	4	2,273	10,13	48,60	1234,57	2,278	569,03	17,25
3	4,5	2,296	8,76	56,43	1347,42	2,203	596,93	16,93
4	5	2,318	7,26	64,50	1418,21	2,349	602,28	16,54
5	5,5	2,337	5,88	72,43	1486,94	2,302	601,98	16,25
6	6	2,353	4,60	80,08	1474,80	2,481	582,59	16,16
7	6,5	2,359	3,54	85,55	1476,31	2,600	557,52	16,26

Optimum bitüm oranının hesaplanması için 50/70 saf bitüm kullanılarak gerçekleştirilen %50 TSTC katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 6.14'te gösterilmektedir. 50/70 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %50 TSTC katkılı Marshall deney sonuçları Çizelge C.1'de, grafikleri Şekil C.1, Şekil C.2, Şekil C.3, Şekil C.4, Şekil C.5, Şekil C.6 ve Şekil C.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.14. %50 TSTC katkılı numunelerin deney sonuçları

%50 Atık 50/70	Bitüm Oranı (%)	Pratik Özgül Ağırlık (gr/cm3)	Boşluk Oranı (%)	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Marshall Stabilite (kg)	Akma	MQ	VMA (%)
1	3,5	2,152	14,69	36,17	884,29	2,124	416,33	19,31
2	4	2,172	13,08	43,22	995,70	2,106	453,70	18,75
3	4,5	2,203	11,63	49,96	1128,56	2,442	487,24	18,34
4	5	2,216	10,50	55,89	1224,46	2,486	509,88	18,24
5	5,5	2,232	9,26	62,32	1309,47	2,617	490,28	18,19
6	6	2,243	8,01	68,08	1423,31	2,803	507,78	18,21
7	6,5	2,255	7,15	75,37	1366,46	3,097	502,42	18,55

Optimum bitüm oranının hesaplanması için 50/70 saf bitüm kullanılarak gerçekleştirilen %75 TSTC katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 6.15'te gösterilmektedir. 50/70 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %75 TSTC katkılı Marshall deney

sonuçları Çizelge D.1’de, grafikleri Şekil D.1, Şekil D.2, Şekil D.3, Şekil D.4, Şekil D.5, Şekil D.6 ve Şekil D.7’de gösterilmiştir

Çizelge 6.15. %75 TSTC katkılı numunelerin deney sonuçları

%75 Atık 50/70	Bitüm Oranı (%)	Pratik Özgül Ağırlık (gr/cm3)	Boşluk Oranı (%)	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Marshall Stabilite (kg)	Akma	MQ	VMA (%)
1	3,5	2,066	17,12	32,04	694,33	2,169	342,89	21,07
2	4	2,084	16,11	37,19	827,56	2,314	409,28	20,76
3	4,5	2,101	14,42	43,74	940,37	2,326	422,56	20,36
4	5	2,120	13,52	48,39	1005,22	2,351	441,83	20,16
5	5,5	2,131	12,51	53,35	1083,47	2,539	471,60	20,12
6	6	2,145	11,36	58,75	1133,65	2,636	473,86	19,97
7	6,5	2,153	10,27	63,59	1157,31	2,729	449,56	20,07

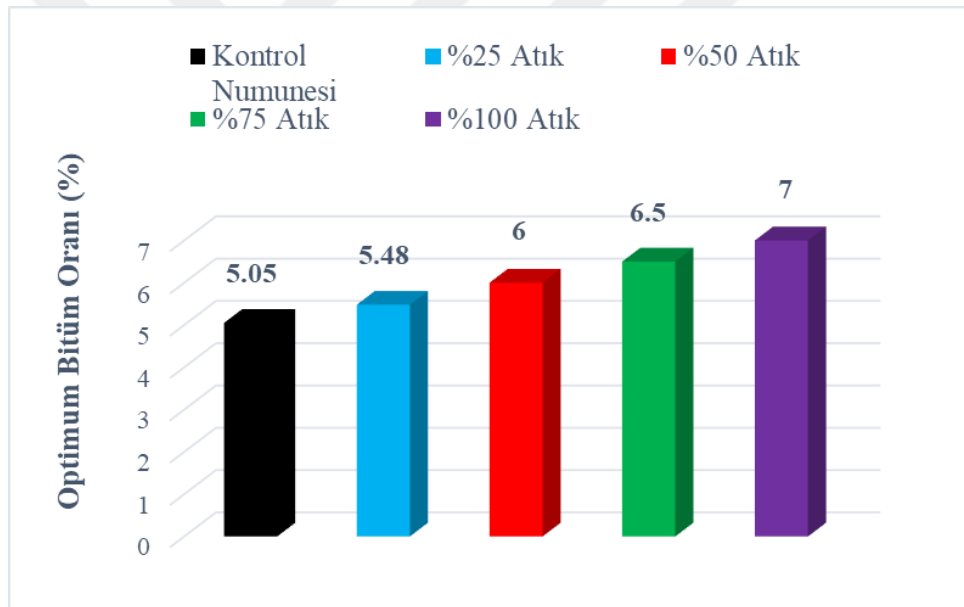
Optimum bitüm oranının hesaplanması için 50/70 saf bitüm kullanılarak gerçekleştirilen %100 TSTC katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 6.16’da gösterilmektedir. 50/70 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %100 TSTC katkılı Marshall deney sonuçları Çizelge E.1’de, grafikleri Şekil E.1, Şekil E.2, Şekil E.3, Şekil E.4, Şekil E.5, Şekil E.6 ve Şekil E.7’de gösterilmiştir

Çizelge 6.16. %100 TSTC katkılı numunelerin deney sonuçları

%100 Atık 50/70	Bitüm Oranı (%)	Pratik Özgül Ağırlık (gr/cm3)	Boşluk Oranı (%)	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)	Marshall Stabilite (kg)	Akma	MQ	VMA (%)
1	3,5	1,975	20,24	27,73	549,73	2,400	214,82	23,27
2	4	1,988	19,07	31,96	630,72	2,456	270,81	23,22
3	4,5	2,000	18,06	36,13	709,17	2,644	316,13	23,20
4	5	2,012	17,03	40,37	773,88	2,812	340,41	23,09
5	5,5	2,037	15,47	45,38	857,18	2,920	333,79	22,88
6	6	2,042	14,73	49,58	871,64	3,210	317,41	23,04
7	6,5	2,043	14,18	52,76	908,20	3,709	313,04	22,84

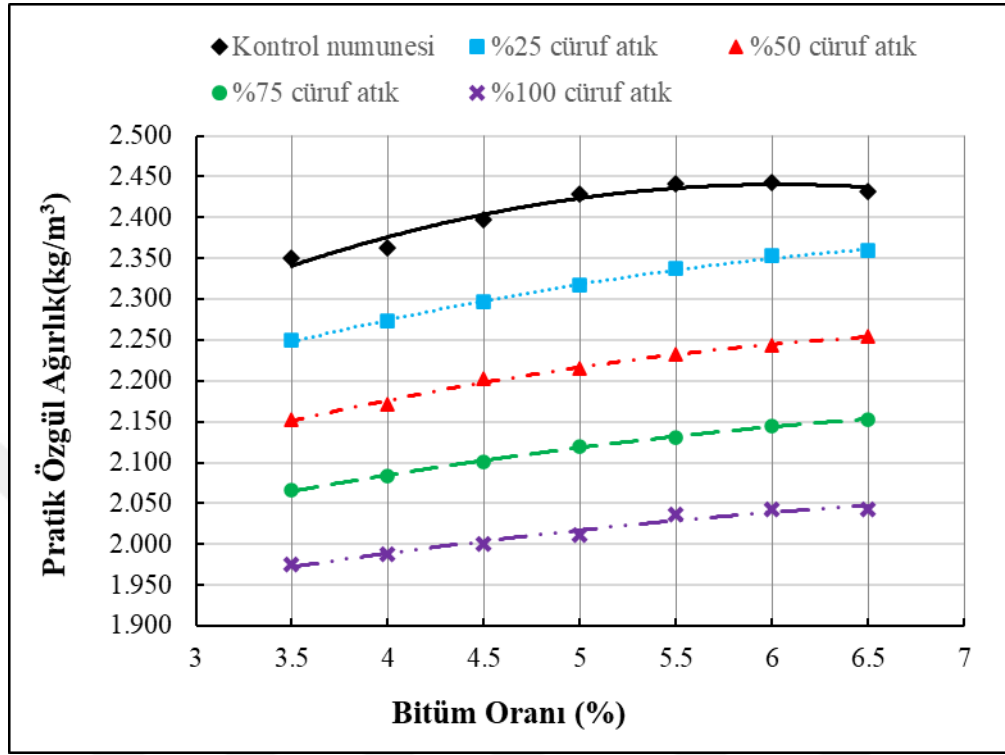
7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Termik santral taban cürufu katkılı numunelerin OBO kıyaslaması Şekil 7.1.'de gösterilmiştir. Buna göre, termik santral taban cürufu katkı miktarının arttıkça karışım için gereken bitüm miktarının arttığı görülmektedir. Bu durumda bitümün üretim ve nakliye masrafları ile termik santral taban cüruflarının üretim ve nakliye masraflarının mukayese edilmesi gerekmektedir.



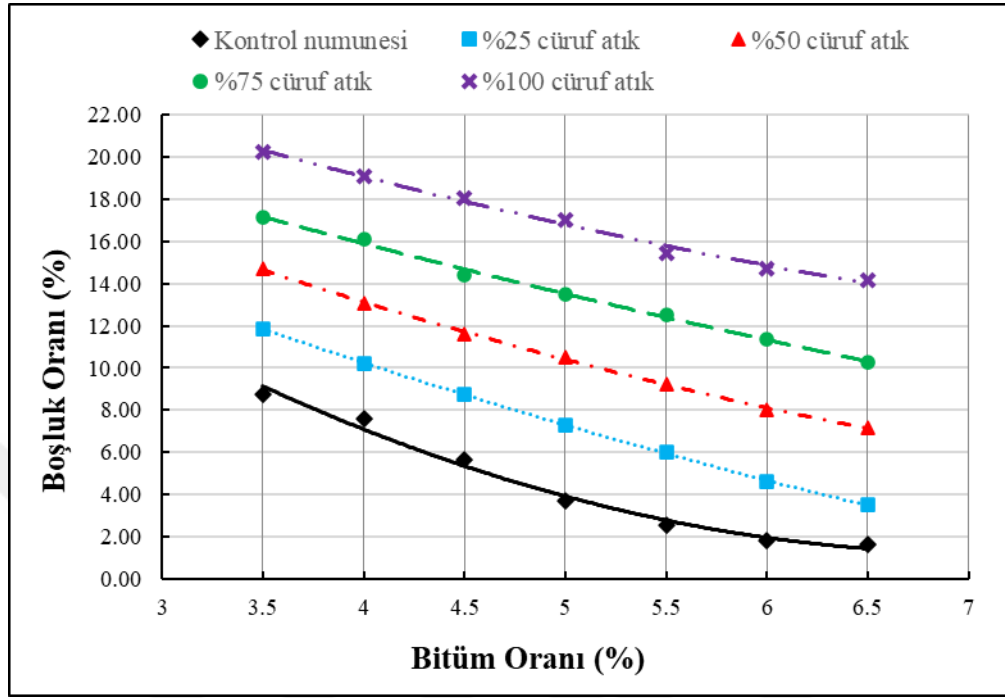
Şekil 7.1. TSTC katkı oranı - OBO grafiği

Termik santral taban cürufundaki boşluk oranı doğal agregalara göre daha fazladır. Bu nedenle termik santral taban cürufu kullanıldığında asfalt betonundaki boşluk oranını artırır. Boşluk oranı, pratik özgül ağırlıkla ters ilişkilidir. Buna göre termik santral taban cürufunun artmasıyla PÖA azalır. Şekil 7.2'de bitüm oranı- pratik özgül ağırlık grafiği gösterilmektedir.



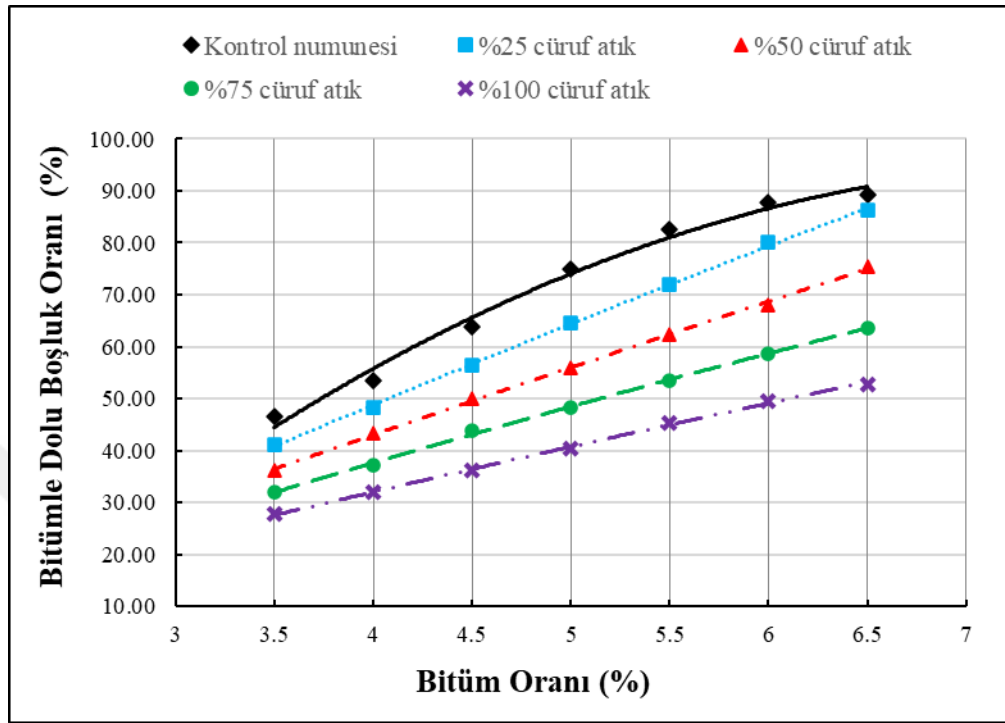
Şekil 7.2. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık (PÖA) grafiği

Termik santral taban cürufu katkısı sıradan agregaya göre daha düşük birim hacim ağırlığına ve daha gözenekli bir yapıya sahiptir. Sıradan agregalar gibi birbiri içine girmeyen ve kayganlaşabilen bir etki göstermektedir. Numunelere ilave edilen cüruf atığı oranı arttıkça numunelerin boşluk oranı da artmaktadır. Bunun sonucunda termik santral taban cürufu katılarak elde edilen asfalt betonu çok daha gözenekli bir yapıdadır. Şekil 7.3'te bitüm oranı - boşluk oranı grafiği gösterilmektedir.



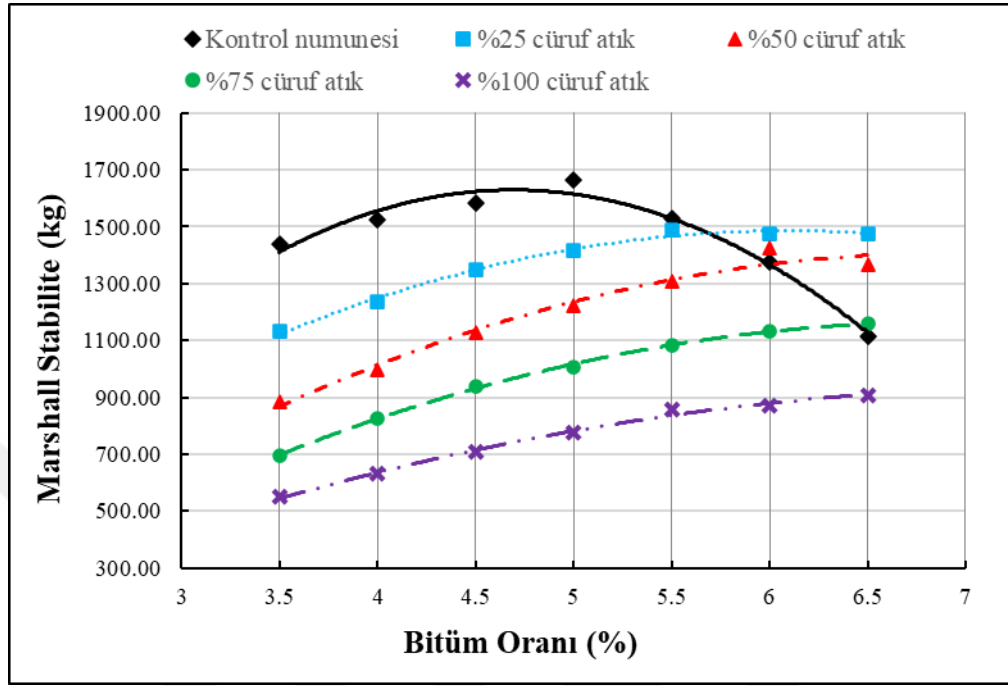
Şekil 7.3. Bitüm oranı - boşluk oranı (V) grafiği

Bitüm miktarı arttıkça BDBO da artar. Bu, asfalt betonu numuneleri için beklenen bir değerdir. Ancak TSTC katkısı miktarı arttıkça boşluk oranı sıradan agregalara göre daha fazla artmakta ve BDBO azalmaktadır. Şekil 7.4'te bitüm oranı - bitümle dolu boşluk oranı grafiği gösterilmektedir.



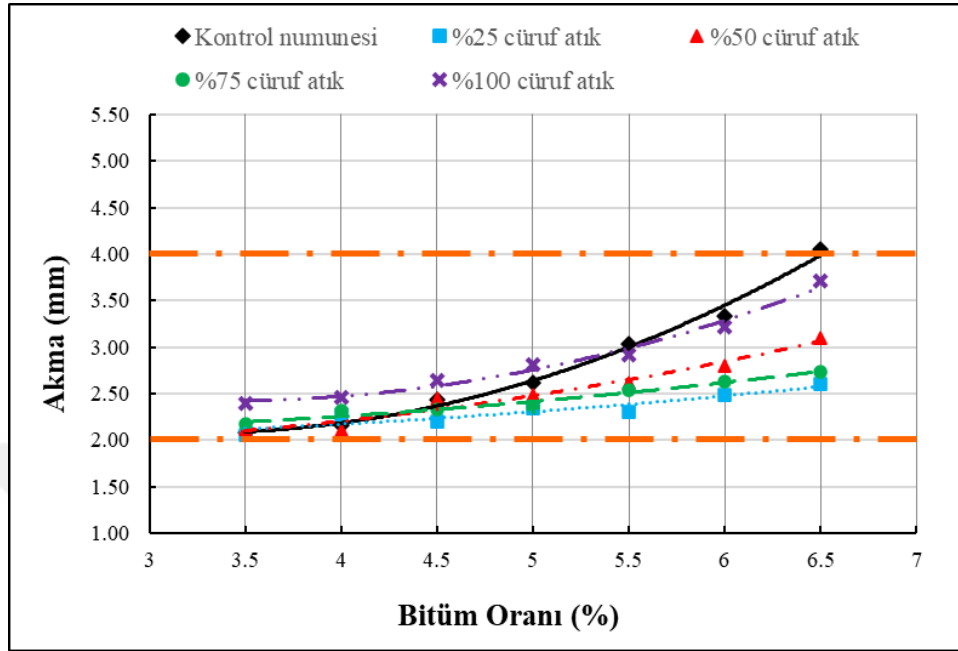
Şekil 7.4. Bitüm oranı - bitümle dolu boşluk oranı (BDBO) grafiği

Numunelerdeki katkı miktarı arttıkça Marshall dayanımı düşmektedir. Bunun en büyük nedeni boşluk oranının fazla olması agregalar arası kenetlenmeyi azaltmakta ve Marshall dayanımının düşmesine yol açmaktadır. Bununla beraber KTŞ 2013'te geçen en düşük 900 kg'lık yük sınır şartını %25 ve %50 katkılı numuneler sağlamaktadır. Şekil 7.5'te bitüm oranı - Marshall stabilite grafiği gösterilmektedir.



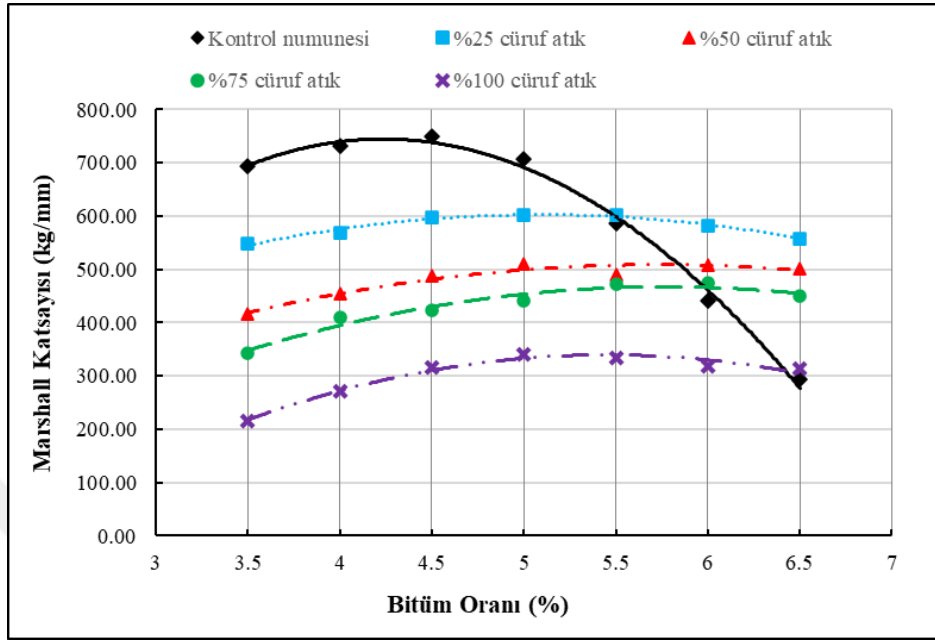
Şekil 7.5. Bitüm oranı - Marshall stabilite (MS) grafiği

Akma değeri, bitüm oranı ve katkı oranı artıkça yükselmektedir. Burada bütün değerler KTŞ’de geçen 2-4 mm akma oranı kriterlerini sağlamaktadır. Şekil 7.6’da bitüm oranı - akma grafiği gösterilmektedir.



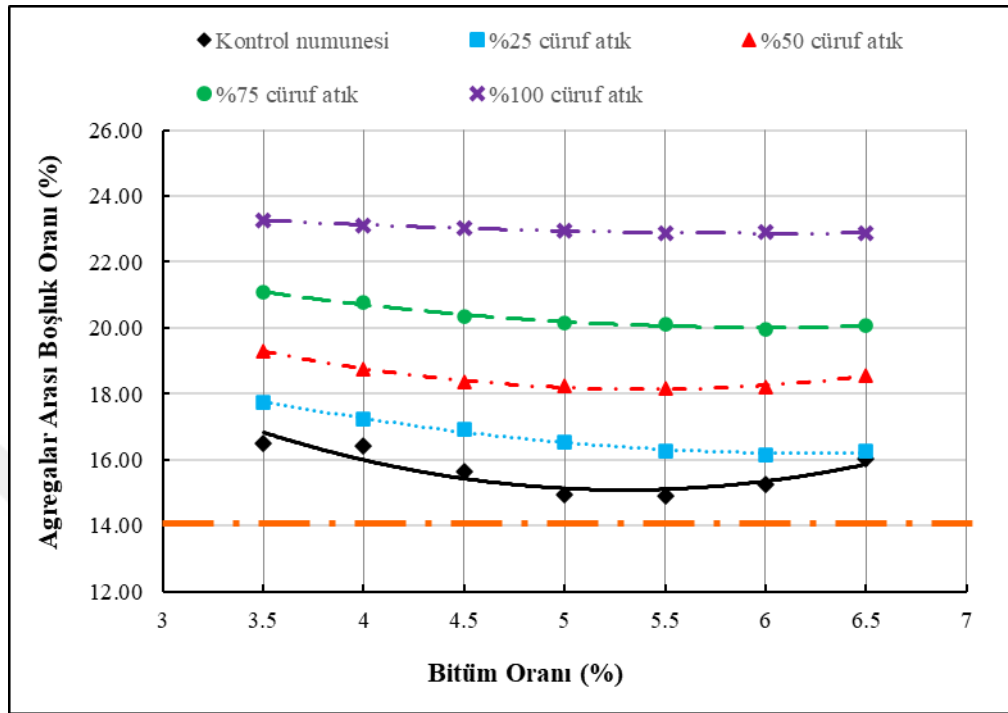
Şekil 7.6. Bitüm oranı - akma (F) grafiği

Marshall stabilite dayanımının akma oranına Marshall katsayısı denir (Wafaie, 2022). Ayrıca malzemenin sertliğini de gösterir. Yukarıdaki grafik, numunelerin sertliğinin termik santral taban cürufu katkı ilavesiyle azaldığını göstermektedir. Bunun nedeni boşluk oranıdır. Çünkü boşluk oranı arttıkça Marshall dayanımı azalmakta ve akma miktarı artmaktadır. Dolayısıyla Marshall katsayısı da azalmaktadır. Şekil 7.7’de bitüm oranı - Marshall katsayısı grafiği gösterilmektedir.



Şekil 7.7. Bitüm oranı - Marshall katsayısı (MQ) grafiği

VMA; Agregalar arasındaki boşlukların hacminin toplam hacimlerine oranıdır. VMA'nın, asfalt karışımının dayanıklılığı, esnekliği ve performansı üzerinde büyük etkisi vardır. KTŞ'ye göre verilen VMA sınır değeri olan %14 oranını sağlamıştır. Şekil 7.8'de bitüm oranı -VMA grafiği gösterilmektedir.



Şekil 7.8. Bitüm oranı - VMA grafiği

7.1. Statik ve Dinamik Sünme Deneyi

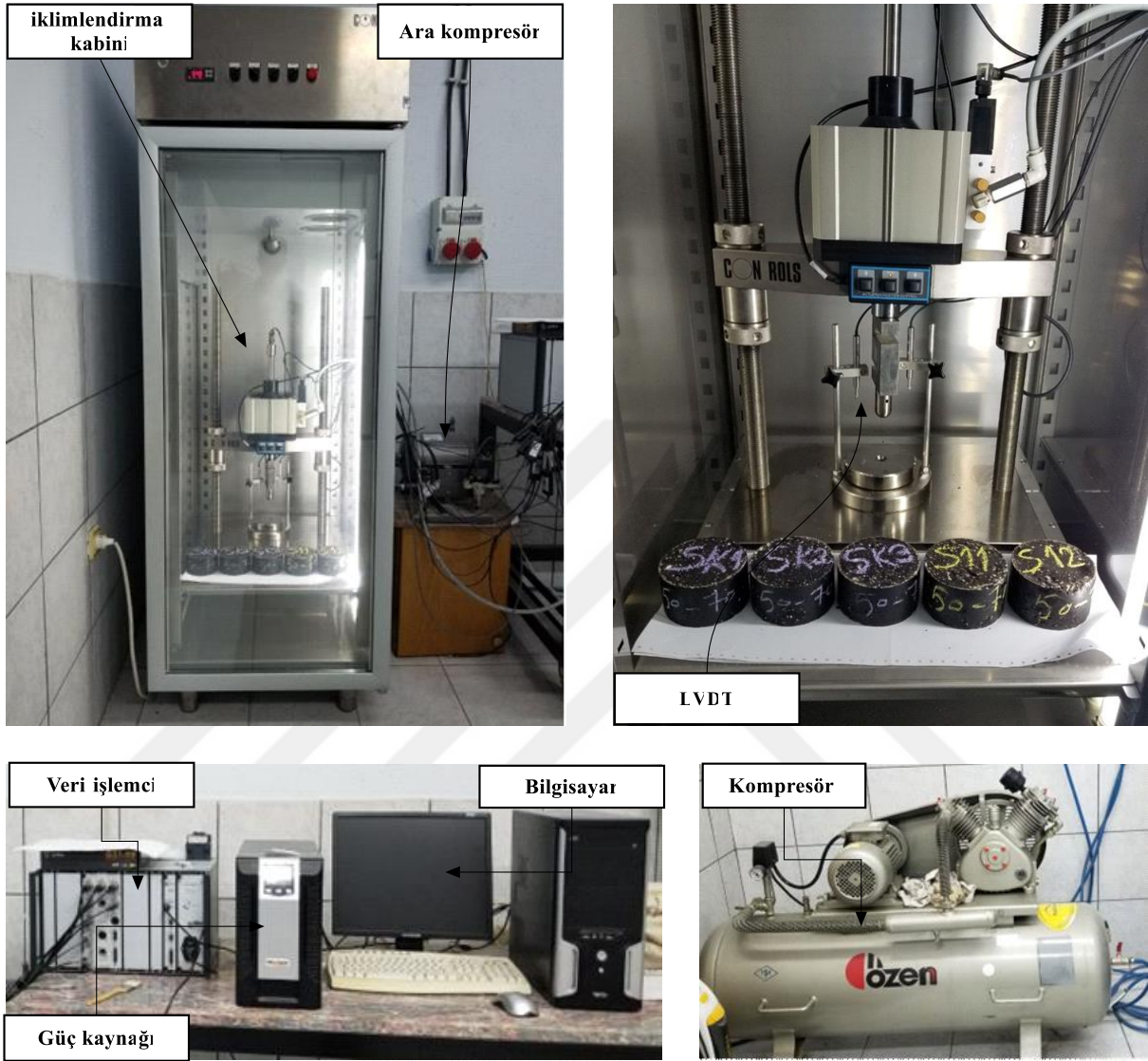
Bu deney, tekrarlanan ve sabit yüklerin etkisi altında asfalt betonunda uzun süre boyunca meydana gelen kalıcı deformasyonları ölçmek ve özelliklerini tespit etmek için kullanılmaktadır (Kara, 2012; Karacasu, 2016).

7.1.1. Kullanılan deney aletleri

- **İklimlendirme kabini:** Deney numunelerinin -10 °C ile +70 °C arasındaki farklı sıcaklıklarda muhafaza edilmesini sağlayan kabindir.
- **Kesintisiz güç kaynağı:** Elektrik kesintisi durumunda otomatik olarak devreye giren ve sisteme 30 dakika boyunca enerji sağlama kapasitesine sahip bir güç kaynağıdır.

- **Bilgisayar:** Döngüsel sünme ve statik sünme deneyleri için tasarlanmış yazılımı çalıştırabilen bir bilgisayar sistemi.
- **Veri işlemci (data logger):** Bilgisayar ile kabin arasındaki bağlantıyı sağlayan ve verilerin istenilen frekansta kaydedilip analiz edilmesinde kullanılan elektronik bir cihazdır.
- **Kompresör:** Sünme deneyini gerçekleştirmek için gereken etkin hava basıncını sağlayabilen ve ayarlayabilen bir kompresördür.
- **Ara depolama kompresörü:** Deney sırasında hava basıncını sabit tutmak için gereken bir kompresördür.
- **Liner Variable Displacement Transducers (LVDT):** Numunelerin deney sırasında oluşan düşey deformasyonunu ölçmek için hassas bir araçtır. En az iki tane kullanılmalıdır.

Kullanılan deney aletleri Şekil 7.9'da gösterilmektedir.



Şekil 7.9. Sünme deneyi set aletleri

7.1.2. Deneyin yapılışı

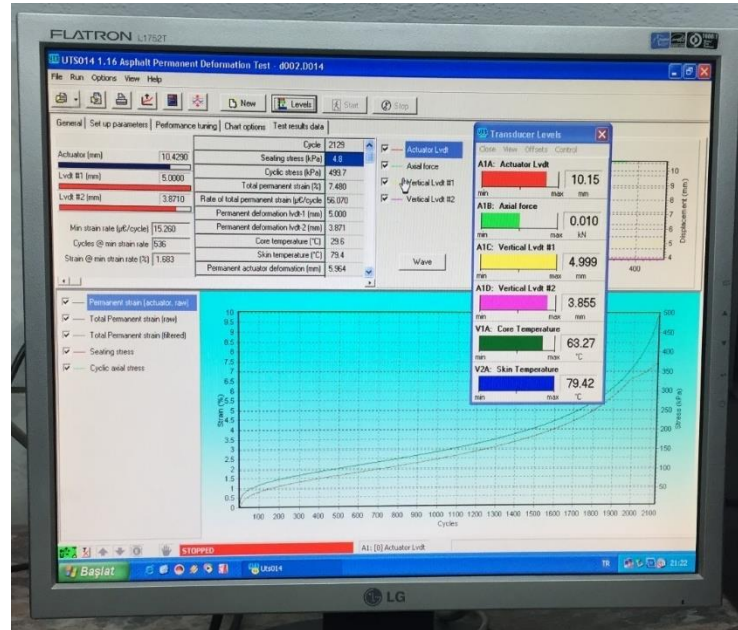
Sünme deneylerine başlamadan önce statik ve dinamik sünme deneyleri için 30 adet Marshall tasarım numunesi dökülmüştür. Numunelerin düzgün olmayan yüzeyleri temiz bir eğe ile temizlenerek boyutları ölçülür. Havada ve sudaki ağırlıkları ölçülerek özgül ağırlıkları hesaplanır. Numuneler 24 saat önceden iklimlendirme kabineye yerleştirilerek kabin sıcaklığı istenilen sıcaklığa ulaşacak şekilde ayarlanır. Numuneler kabine yerleştirildikten sonra kompresör devreye sokulur. İlaveten deney sırasındaki basıncı sabit tutmak için ara depolama

kompresörü de çalıştırılarak 8 atmosfer basınç oluşturulur. İklimlendirme kabine numuneler yerleştirildikten sonra LVDT'ler en uygun konuma ayarlanır. Bilgisayarda bulunan yazılım çalıştırılarak kabin kapısı kapatılır. Tüm girdiler bilgisayar ortamına eksiksiz girilmelidir. Deney türü (statik veya dinamik) seçilerek yükleme başlatılır (Karacasu, 2016).

Numuneler ve deneye ait görseller Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de gösterilmektedir.



Şekil 7.10. Sünme ve yükleme çerçevesine yerleştirilmiş numuneler

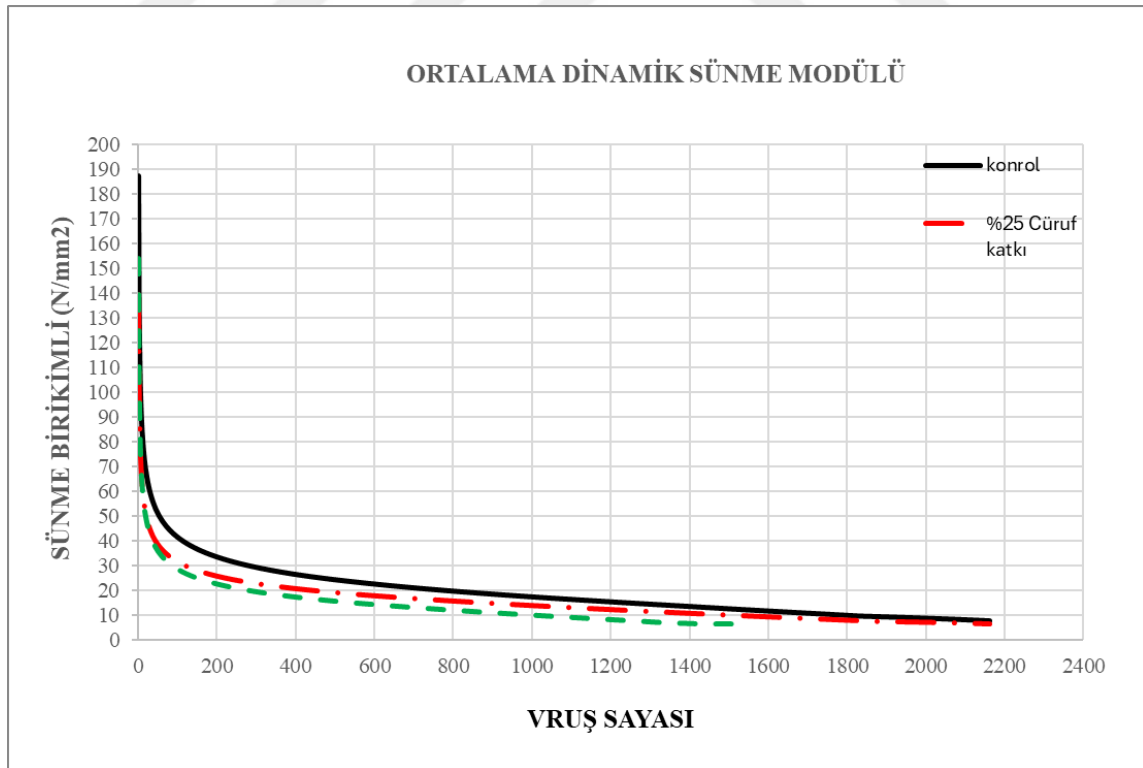


Şekil 7.11. Sünme deneyi numune genel bilgileri

7.1.3. Deney sonuçlarının hesaplanması

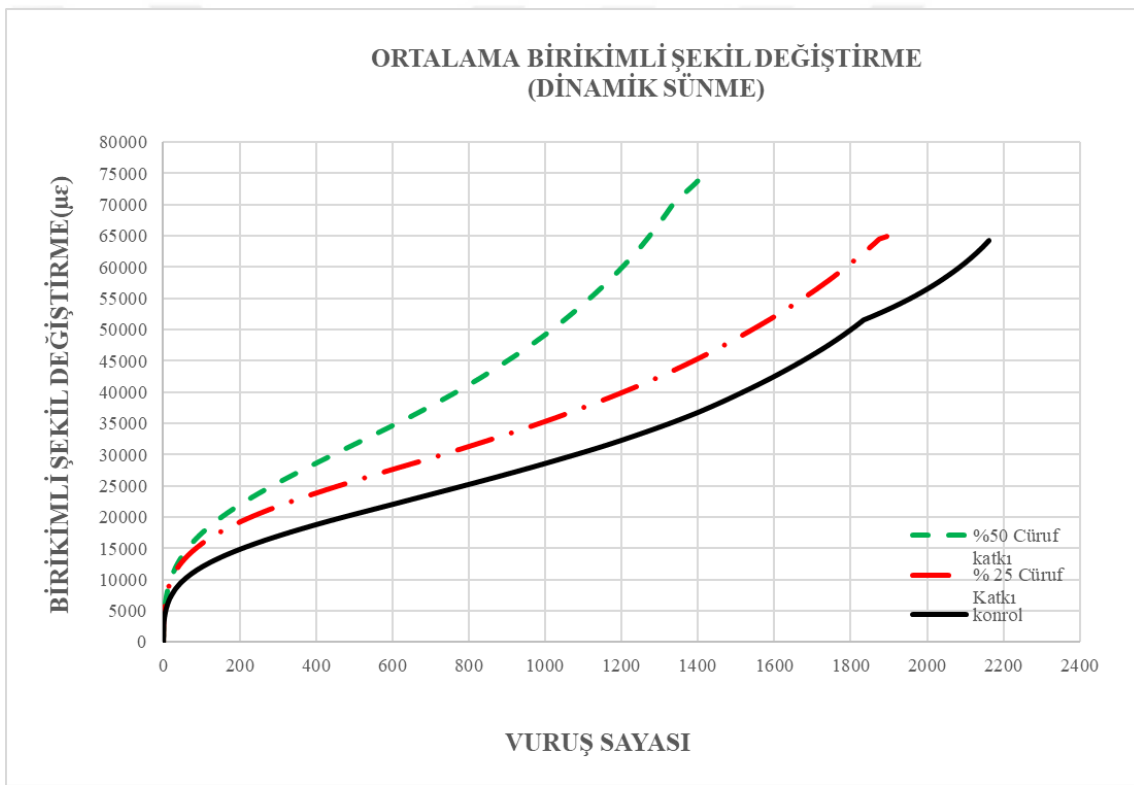
Statik ve dinamik sünme deneyleri, malzemelerin farklı yükleme koşulları altında uzun vadeli deformasyon davranışını değerlendirmek için kullanılır. Aşağıda, statik ve dinamik sünme testinin sonuçları ve hesaplamalar sunulmaktadır.

Numuneler Marshall tasarımına göre değerlendirilmiş ve asfalt betonuna eklenen TSTC'nin %75 ve %100 katkılı numuneleri beklenen performansı göstermemiştir. Fakat TSTC'nin %25 ve %50 katkılı numunelerinden alınan sonuçlar TSTC'yi kullanmanın ekonomi ve çevre kirliliği açısından avantajlarının olduğu ve kullanılmasının uygun olacağı Marshall tasarımında değerlendirildi. Bunun sonucunda dinamik ve sünme testleri kontrol, %25 ve %50 katkılı numuneler üzerine yoğunlaşarak devam ettirilmiştir. Şekil 7.12'de dinamik sünme modülü - vuruş sayısı grafiği gösterilmektedir.



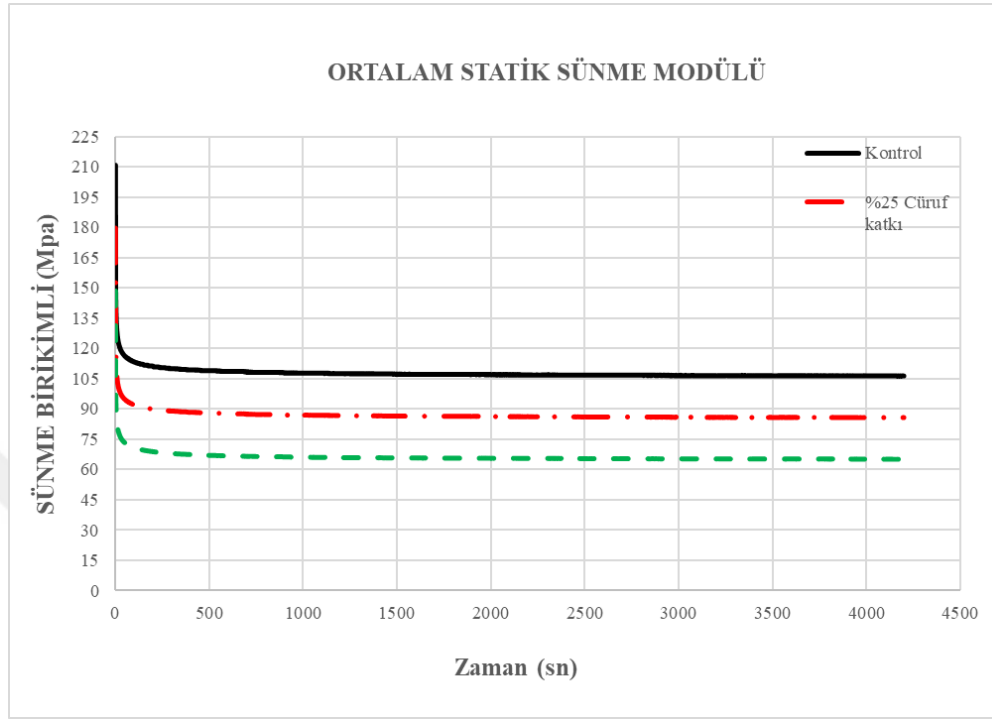
Şekil 7.12. Dinamik sünme modülü - vuruş sayısı grafiği

Bu tezde sunulan vuruş sayısı ile kümülatif deformasyon arasındaki ilişki incelendiğinde kontrol numunelerinin daha rijit davrandığı görülmektedir. Ancak vuruş sayısının artmasıyla birlikte %50 termik santral taban cürufu katkısı içeren numunelerin en yüksek deformasyon değerine ulaştığı görülmüştür. %25 termik santral taban cürufu katkısı içeren numunelerde ise en az deformasyonun meydana geldiği ve asfalt betonunun daha uzun ömürlü olacağı görülmüştür. Şekil 7.13'te birikimli şekil değiştirme miktarı - vuruş sayısı grafiği gösterilmektedir.



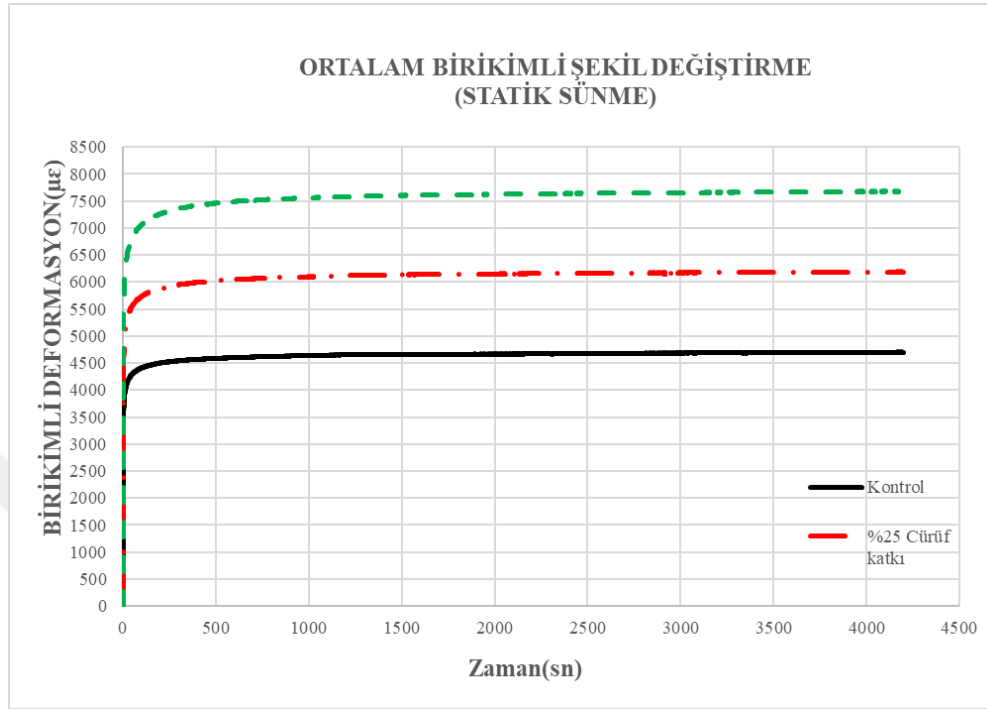
Şekil 7.13. Birikimli şekil değiştirme miktarı - vuruş sayısı grafiği

Statik sünme rijitliğinin değişimi vuruş sayısına bağlıdır. Vuruş sayısının artmasıyla birlikte sertlik değerlerinin düştüğü görülmektedir. Sonuç olarak %25 termik santral taban cürufu katkısı içeren karışımın kontrol numunesine en yakın değere sahip olduğu ve olumsuz bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Aynı zamanda %25 TSTC katkısı kullanımının asfalt betonunun ömrünü uzatacağı söylenebilir. Şekil 7.14'te statik sünme modülü - zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 7.14. Statik sünme modülü – zaman grafiği

Diğer taraftan TSTC katkısı kullanılarak hazırlanan numunelerin statik yükleme etkisi altında davranışının zamana bağlı olarak değişmesi de aynı sonuç olarak gösterilmiştir. En fazla deformasyon %50 atık malzeme içeren numunelerde meydana gelirken, %25 atık malzemeye sahip numunelerin şekil değiştirme miktarının kontrol numunesinin şekil değiştirme miktarına yakın olduğu gözlenmiştir. Şekil 7.15'te birikimli şekil değiştirme miktarı - zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 7.15. Birikimli şekil değiştirme miktarı – zaman grafiği

7.2. Ekonomik Analiz

Bu araştırmada 1 km uzunluk, 10 m genişlik ve 15 cm kalınlıktaki bir yol için ekonomik değerlendirme yapılmıştır. Çizelge 7.1’de katkısız, %25, %50, %75 ve %100 katkı oranlarındaki yolun ekonomik analizi gösterilmektedir.

Çizelge 7.1. Katkısız, %25, %50, %75 ve %100 TSTC katkılı agrega ile oluşturulmuş 1 km’lik yolun maliyet analizi

Ekonomik Analiz (Mayıs 2024)	Katkısız (OBO; %5.05)			%25 TSTC (OBO; %5.48)			%50 TSTC (OBO; %6)			%75 TSTC (OBO; %6.5)			%100 TSTC (OBO; %7)		
	Ağırlık (ton)	Birim fiyat (TL/ton)	Maliyet (TL)	Ağırlık (ton)	Birim fiyat (TL/ton)	Maliyet (TL)	Ağırlık (ton)	Birim fiyat (TL/ton)	Maliyet (TL)	Ağırlık (ton)	Birim fiyat (TL/ton)	Maliyet (TL)	Ağırlık (ton)	Birim fiyat (TL/ton)	Maliyet (TL)
Agrega	3560,63	280,00	996976,40	3349,55	280,00	937874,00	3135,10	280,00	877828,00	2927,75	280,00	819770,00	2720,25	280,00	761670,00
Bitüm	189,37	17600,00	3332912,00	205,50	17600,00	3616800,00	225,00	17600,00	3960000,00	243,75	17600,00	4290000,00	262,50	17600,00	4620000,00
TSTC	0	40,00		194,95	40,00	7798,00	389,90	40,00	15596,00	578,53	40,00	23141,20	767,25	40,00	30690,00
Toplam	3750		4329888,40	3750		4562472,00	3750		4853424,00	3750		5132911,20	3750		5412360,00
Maliyet Artışı (%)	0,00			5,37			12,09			18,55			25,00		

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada termik santral taban cüruflarının asfalt betonunun performans özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Bu araştırma çalışmalarına göre elde edilen sonuçlar toplu olarak aşağıda sıralanmıştır.

Optimum bitüm oranının, termik santral taban cürufu katkısı arttıkça normal agregalı asfalt beton numunelerine kıyasla arttığı görülmektedir. Bu durumda bitümün üretim ve nakliye masrafları ile termik santral taban cüruflarının üretim ve nakliye masraflarının mukayese edilmesi gerekmektedir.

Termik santral taban cürufundaki boşluk oranı doğal agregalara göre daha fazladır. Bu nedenle termik santral taban cürufu kullanıldığında asfalt betonundaki boşluk oranını artırmaktadır. Bu nedenle optimum bitüm oranındaki %25 TSTC katkılı numunelerin boşluk oranı %5,95'tir. Boşluk oranı, pratik özgül ağırlıkla ters orantılıdır. Buna göre termik santral taban cüruf katkı oranının artmasıyla pratik özgül ağırlık azalır. Pratik özgül ağırlık, %25 TSTC katkılı numunelerde $2,335 \text{ kg/m}^3$ olarak bulunmuştur. Termik santral taban cürufu katkısı sıradan agregaya göre daha düşük birim hacim ağırlığına ve daha boşluklu bir yapıya sahiptir. Sıradan agregalar gibi birbiri içine girmeyen, kayganlaşabilen bir etki göstermektedir. Numunelere ilave edilen cüruf atığı oranı arttıkça numunelerin boşluk oranı da artmaktadır. Bunun sonucunda üretilen asfalt betonu daha boşluklu bir yapıya sahip olmaktadır.

Bitüm miktarı arttıkça bitümle dolu boşluk oranı da artar. Bu, asfalt betonu numuneleri için beklenen bir değerdir. Ancak TSTC katkı miktarı arttıkça boşluk oranı sıradan agregalara göre daha fazla artmakta ve bitümle dolu boşluk oranı azalmaktadır. Optimum bitüm oranı göz önünde bulundurulduğunda %25 TSTC katkılı numunelerin bitümle dolu boşluk oranı %71,77 değerini geçememiştir.

Numunelerdeki TSTC katkı miktarının artması Marshall dayanımını düşürmektedir. Bunun en büyük nedeni, boşluk oranının fazla olması agregalar arası kenetlenmeyi azaltmakta

ve Marshall dayanımının düşmesine yol açmaktadır. OBO'daki %25 TSTC katkılı numunelerin Marshall dayanımı 1465,55 kg çıkmıştır. Ayrıca KTŞ 2013'te geçen en düşük 900 kg'lık yük sınır şartını %25 TSTC katkılı numuneler gibi %50 TSTC katkılı numuneler de sağlamaktadır.

Akma değeri, bitüm oranı ve katkı oranı artıka yükselmektedir. Optimum bitüm oranındaki %25 TSTC katkılı numunelerin akma değeri 2,38 mm çıkmıştır. Bununla beraber bütün değerler KTŞ'de geçen 2-4 mm akma oranı kriterlerini sağlamaktadır.

Marshall katsayısı; Marshall dayanımının akmaya oranıdır (MS/F) (Wafaie, 2022). Aynı zamanda malzemenin rijitliğini de gösterir. Numunelerin sertliğinin termik santral taban cürufu katkı ilavesiyle azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni boşluk oranıdır. Çünkü boşluk oranı artıka Marshall dayanımı azalmakta ve akma miktarı artmaktadır. Dolayısıyla Marshall katsayısı da azalmaktadır. OBO'daki %25 TSTC katkılı numunelerin Marshall katsayısı 599,25 kg/mm olarak bulunmuştur.

VMA; Agregalar arasındaki boşlukların hacminin toplam hacimlerine oranıdır. VMA'nın, asfalt karışımının dayanıklılığı, esnekliği ve performansı üzerinde büyük etkisi vardır. OBO'daki %25 TSTC katkılı numunelerin VMA değeri %16,33 bulunmuştur. Bununla beraber bütün numuneler KTŞ'ye göre VMA sınır değeri olan %14 oranını sağlamıştır.

Bu tezde sunulan vuruş sayısı ile birimli deformasyon arasındaki ilişki incelendiğinde kontrol numunelerinin daha rijit davrandığı görülmektedir. Ancak vuruş sayısının artmasıyla birlikte %50 termik santral taban cürufu katkısı içeren numunelerin en yüksek deformasyon değerine ulaştığı görülmüştür. %25 termik santral taban cürufu katkısı içeren numunelerde ise en az deformasyonun meydana geldiği ve asfalt betonunun daha uzun ömürlü olacağı anlaşılmaktadır.

Dinamik sünme rijitliğinin değişimi vuruş sayısına bağlıdır. Vuruş sayısının artmasıyla birlikte sertlik değerlerinin düştüğü görülmektedir. Sonuç olarak %25 termik santral taban cürufu katkısı içeren karışımın kontrol numunesine en yakın değere sahip olduğu ve olumsuz

bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Aynı zamanda %25 TSTC katkısı kullanımının asfalt betonunun ömrünü uzatacağı söylenebilir.

Diğer taraftan TSTC katkısı kullanılarak hazırlanan numunelerin statik yükleme etkisi altında davranışının zamana bağlı olarak değişmesi de aynı sonuç olarak gösterilmiştir. En fazla deformasyon %50 atık malzeme içeren numunelerde meydana gelirken, %25 atık malzeme içeren numunelerin deformasyon değerinin kontrol numunesine yakın olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak asfalt beton karışımında %25 oranında termik santral taban cürufu kullanılması çevresel atık birikimini ve depolama maliyetlerini azaltmaktadır. Bunun yanı sıra termik santral taban cürufunun katkı olarak kullanılmasının ekonomik analizine bakıldığında, TSTC katkısı arttıkça maliyetin arttığı görülmektedir. %25 TSTC katkılı 1 km'lik yolun maliyeti, katkısız yolun maliyetine oranla %5,37 artmaktadır. 2015 Paris Anlaşması'na göre her ülkenin sera gazı emisyonlarını 2050 yılına kadar sıfıra indirmesi gerekmektedir. Çevresel atıkların yol yapımında kullanılması bu anlaşmaya fayda sağlayacaktır. Diğer taraftan, asfalt betonu karışımında termik santral taban cürufu kullanımı çevre ve sürdürülebilir yaşam bakımından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahmed, A.M. (2023). *Atık lastik modifiye bitümün asfalt betonunun performansına etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Akyazılı, S. (2009). *Soma termik santrali cürufılarından yanmamış karbonun kazanılması* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://polen.itu.edu.tr/items/640d7473-4dcf-4549-9c20-2952f3328790>
- Androjić, I., Alduk, Z. D., Dimter, S., & Rukavina, T. (2020). *Analysis of impact of aggregate moisture content on energy demand during the production of hot mix asphalt (HMA)*. Journal of cleaner production, 244, 118868.
- Arabani, M., & Mirabdolazimi, S. M. (2011). *Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder*. Materials Science and Engineering: A, 528(10-11), 3866-3870.
- Arabani, M., Tahami, S. A., & Taghipoor, M. (2017). *Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials*. Road Materials and Pavement Design, 18(3), 713-729.
- Ateşok, G. (2009). *Kömür, Kullanımı ve Temiz Kömür Teknolojileri*. Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, İstanbul.
- Bayraktar, O. Y. (2019). *The possibility of fly ash and blast furnace slag disposal by using these environmental wastes as substitutes in portland cement*. Environmental monitoring and assessment, 191(9), 560.
- Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014). *Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review*. Construction and building materials, 68, 501-516.
- Buzkan, C., & Erman, O. (2020). *Yapısal atıkların geri dönüşüm sorunu ve Türkiye'deki durumun mevzuat bakımından değerlendirilmesi*. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 6(1), 76-89.
- Chen, M., Lin, J., & Wu, S. (2011). *Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture*. Construction and building materials, 25(10), 3909-3914.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Colonna, P., Berloco, N., Ranieri, V., & Shuler, S. T. (2012). *Application of bottom ash for pavement binder course*. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 53, 961-971.
- Cominsky, R. J., Huber, G. A., Kennedy, T. W., & Anderson, M. (1994). *The superpave mix design manual for new construction and overlays* (No. SHRP-A-407). Washington, DC: Strategic Highway Research Program.
- Çalık, N. B. (2023). *Yer seramik atıklarının asfalt betonunun performans özelliklerine etkisi*, [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Çeloğlu, M. E., Yalçın, E., Kök, B. V., & Alataş, T., Norambuena-Contreras, J., Garcia, A., & Yılmaz, M. (2018). *Effects of different bitumen modifiers on the rutting and cracking resistance of hot mix asphalts*, International Journal of Pavement Engineering, 1-10.
- Erichsen, E., Ulvik, A., & Sævik, K. (2011). *Mechanical degradation of aggregate by the Los Angeles-, the micro-Deval-and the Nordic test methods*. Rock mechanics and rock engineering, 44, 333-337.
- Erkuş, Y., Kök, B. V., & Yılmaz, M. (2020). *Evaluation of performance and productivity of bitumen modified by three different additives*, Construction And Building Materials, 261, 120553.
- Eyada, S. O. (2009). *Influence of filler type on asphalt mastic and performance properties of asphalt paving materials* (Doctoral dissertation, M. Sc., Thesis, University of Anbar).
- Fatima, E., Sahu, S., Jhamb, A., & Kumar, R. (2014). *Use of ceramic waste as filler in semi-dense bituminous concrete*. American Journal of Civil Engineering and Architecture, 2(3), 102-106.
- Ferdous, W., Manalo, A., Siddique, R., Mendis, P., Zhuge, Y., Wong, H. S., & Schubel, P. (2021). *Recycling of landfillwastes (tyres, plastic sandglass) in construction—A review on global waste generation, performance, application and future opportunities*. Resources, Conservation and Recycling, 173, 105745.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2018). *Traffic and highway engineering*. Cengage Learning, Boston, United States.
- Stroup-Gardiner, M., & Epps, J. (1992). Laboratory tests for assessing moisture damage of asphalt concrete mixtures. *Transportation Research Record*, (1353).
- Golalipour, A., Jamshidi, E., Niazi, Y., Afsharikia, Z., & Khadem, M. (2012). *Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt pavements*. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 440-449.
- Hacioğlu, S. *Esnek üstyapılı yollarda çatlak tamir yöntemi uygulanarak asfalt ömrünün uzatılması* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- İlcalı M, Tayfur S., Özen H., Sönmez İ., & Eren K. (2001). *Asfalt ve Uygulamaları*. İSFALT Bilimsel Yayın No:1 İstanbul.
- Kaçaroğlu, G., & Saltan, M. (2020). *Use of cocamide diethanolamide chemical in bitumen modification*. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(6), 1042–1047.
- Kara, Ç., & Karacasu, M., (2015). *Use of ceramic wastes in road pavement design*. *Proceedings of the World Congress on New Technologies*, p. 226.
- Karacasu, M. (2016). *Yol Üstyapı Deneyleri*. Sözkese Matbaacılık Ltd. Şti., Ankara.
- Karacasu, M., Wafaie, Z., & Akalın, K. B. (2023). *Enhancing Sustainability in Asphalt Concrete: Utilizing Ceramic Cake Waste and Performance Analysis*. *Firat University Journal of Experimental and Computational Engineering*, 2(3), 104-116.
- Karahancer, S., Capali, B., Eriskin, E., Morova, N., Serin, S., Saltan, M., & Kucukcapraz, D. O. (2016, August). *Marshall Stability estimating using artificial neural network with polyparaphenylene terephthalamide fibre rate*. In 2016 International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA) (pp. 1-5). IEEE.
- Karakaş, A. S., (2014). *Bitümlü sıcak karışımların trafik etkisi altında mekanik özelliklerinin incelenmesi* [Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Keskin, M. (2019). *Bor kaynaklı çevresel atıkların bitümlü sıcak karışımların performansına etkisi ve modellenmesi* [Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- KGM, (2013). Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, 2013.
- Khodadadi, M., Moradi, L., Dabir, B., Nejad, F. M., & Khodaii, A. (2020). *Reuse of drill cuttings in hot mix asphalt mixture: A study on the environmental and structure performance*. Construction and Building Materials, 256, 119453.
- Kök, B. V., Yilmaz, M., & Kuloğlu, N. (2011). Asfaltit ve SBS modifiyeli bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi, Journal of Polytechnic, 14 (3), 193-197.
- Kumar, A., & Singh, G. J. (2023). *Recycled concrete aggregate classification based on quality parameters and performance*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 47(6), 3211-3232.
- Laukkanen, O. V. (2015). *Low-temperature rheology of bitumen and its relationship with chemical and thermal properties*. [Master's thesis, Aalto University] <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/9af4dbdb-4e0f-4caa-a1a7-f0ed3263e097/content>.
- Lesueur, D. (2009). *The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification*. Advances in colloid and interface science, 145(1-2), 42-82.
- Mazumder, M., Sriraman, V., Kim, H. H., & Lee, S. (2016). *Quantifying the environmental burdens of the hot mix asphalt (HMA) pavements and the production of warm mix asphalt (WMA)*. International Journal of Pavement Research and Technology, 9 (3), 190-201.
- McNally, T. (2011). *Introduction to polymer modified bitumen (PmB)*. In Polymer modified bitumen (pp. 1-21). Woodhead Publishing.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Modarres, A., & Rahmanzadeh, M. (2014). *Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt*. Construction and Building Materials, 66, 476–483.
- MTP., (2023). *Understanding the Marshall Test for Asphalt Mix Design*. Material Testing Blog. <https://certifiedmtp.com/blog?p=understanding-the-marshall-test-for-asphalt-mix-design>.
- Muniandy, R., & Aburkaba, E. (2011). *The effect of type and particle size of industrial wastes filler on Indirect Tensile Stiffness and Fatigue performance of Stone Mastic Asphalt Mixtures*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(11), 297-308
- Nikolaides, A. (2014). *Highway engineering: Pavements, materials and control of quality*. CRC Press.
- Paliukaite, M., Vaitkus, A., & Zofka, A. (2014). *Evaluation of bitumen fractional composition depending on the crude oil type and production technology*. In *Environmental engineering*. Proceedings of the international conference on environmental engineering. ICEE (Vol. 9, p. 1). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics Property.
- Papagiannakis, A. T., Masad, E. A. (2008). *Pavement design and materials*. Wiley.
- Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., & Oliviero Rossi, C. (2019). *Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances*. Applied Sciences, 9(4), 742.
- Sanchez-Cotte, E. H., Fuentes, L., Martinez-Arguelles, G., Quintana, H. A. R., Walubita, L. F., & Cantero-Durango, J. M. (2020). *Influence of recycled concrete aggregates from different sources in hot mix asphalt design*. Construction and Building Materials, 259, 120427.
- Sang, L., Idowu, T., & Okumu, V., (2021). *Evaluation of the performance of waste marbledust as a mineral filler in hot mix asphalt concrete*. Journal of Civil Engineering, Science and Technology, 12(1), 1-14.
- Sengoz, B., & Topal, A. (2005). *Use of asphalt roofing shingle waste in HMA*. Construction and Building Materials, 19 (5), 337-346.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Shafabakhsh, G.H., Sadeghnejad, M., & Sajed, Y. (2014). *Case study of rutting performance of HMA modified with waste rubber powder*. Case Studies in Construction Materials, 1, 69-76.
- Sienkiewicz, M., Borzędowska-Labuda, K., Wojtkiewicz, A., & Janik, H. (2017). *Development of methods improving storage stability of bitumen modified with ground tire rubber: A review*. Fuel Processing Technology, 159, 272-279.
- Silva, R.V., de Brito, J., & Dhir, R.K, (2014). *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*. Construction and Building Materials, 65, 201–217.
- Subhy, A. (2017). *Advanced analytical techniques in fatigue and rutting related characterisations of modified bitumen: Literature review*. Construction and Building Materials, 156, 28-45.
- Thanaya, I., Forth, P., & Zoorob, S. (2006). *Utilisation of coalashes in hot and on cold bitumen ousmixtures*. In International Coal Ash Technology Conference. The Birmingham Hippodrom Theatre Birmingham, West Midlands, UK.
- TÜPRAŞ, (2017), Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi, <https://www.tupras.com.tr/rafineriler>, Erişim tarihi: 20.04.2022.
- Vasudevan, G. (2013). *Performance on coal bottom ash in hot mix asphalt*. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2(08), 24-33.
- Wafaie, Z. (2022). *Seramik kek atığının asfalt betonunda değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü] YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Yan, K. Z., Xu, H. B., & Zhang, H. L. (2013). *Effect of mineral filler on properties of warm asphalt mastic containing Sasobit*. Construction and Building Materials, 48, 622-627.
- Yilmaz, M., Kök, B. V., & Kuloğlu, N. (2011). *Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt*. Construction and Building Materials, 25(11), 4279-4286.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Yilmaz, M., & Yalcin, E. (2015). *The effects of using different bitumen modifiers and hydrated lime together on the properties of hot mix asphalts*, Road Materials and Pavement Design, 17 (2), 499-511.
- Yoo, B. S., Park, D. W., & Vo, H. V. (2016). *Evaluation of asphalt mixture containing coal ash*. Transportation Research Procedia, 14, 797-803.
- Yüceer, A., & Çelik, O. N., (1991). *Polimerlerin asfalt betonunda kullanılması ve atık plastiklerin değerlendirilmesi*, İ.M.O Dergisi, Ocak, 227-234.
- Zhang, H., Tan, X., & Liu, Q. (2020). *Fine solids removal from non-aqueous extraction bitumen: A literature review*, Fuel, 288, 119727.

EK AÇIKLAMALAR

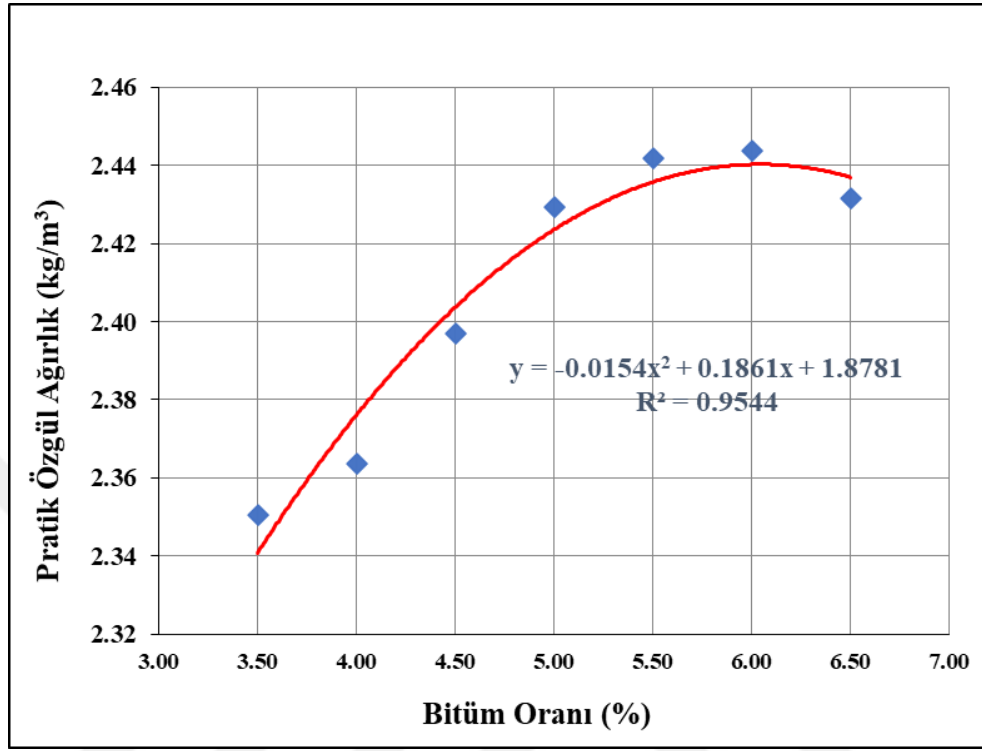
Ek Açıklama-A	91
Ek Açıklama-B	96
Ek Açıklama-C	101
Ek Açıklama-D	106
Ek Açıklama-E	111



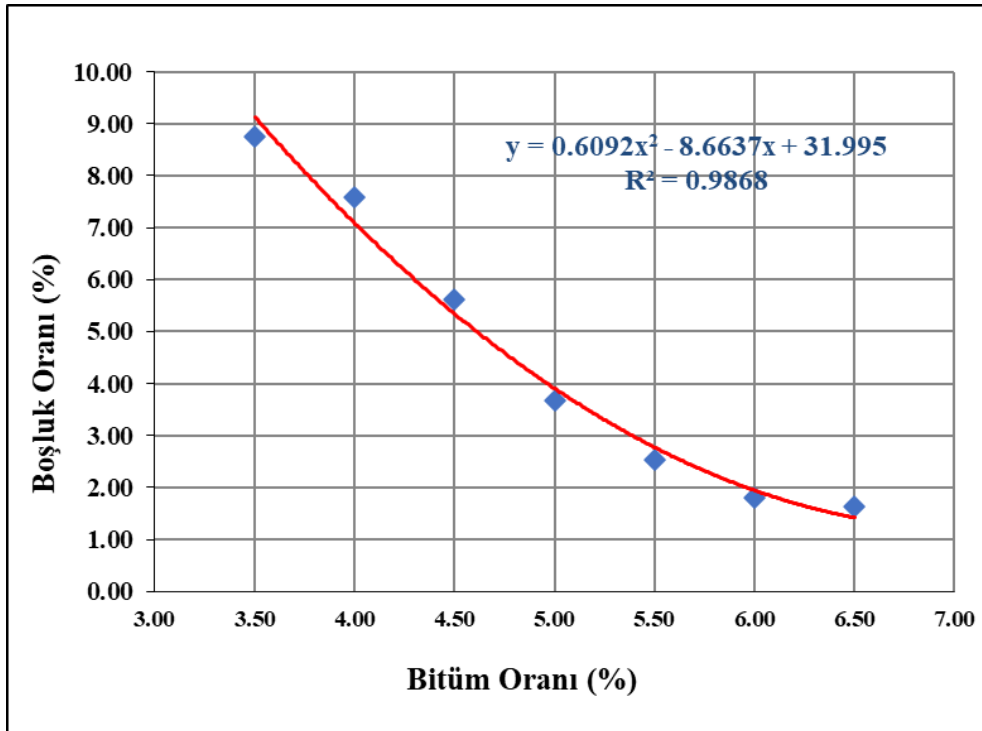
Ek Açıklama-A

Çizelge A. 1. Kontrol (katkısız) Marshall deney sonuçları

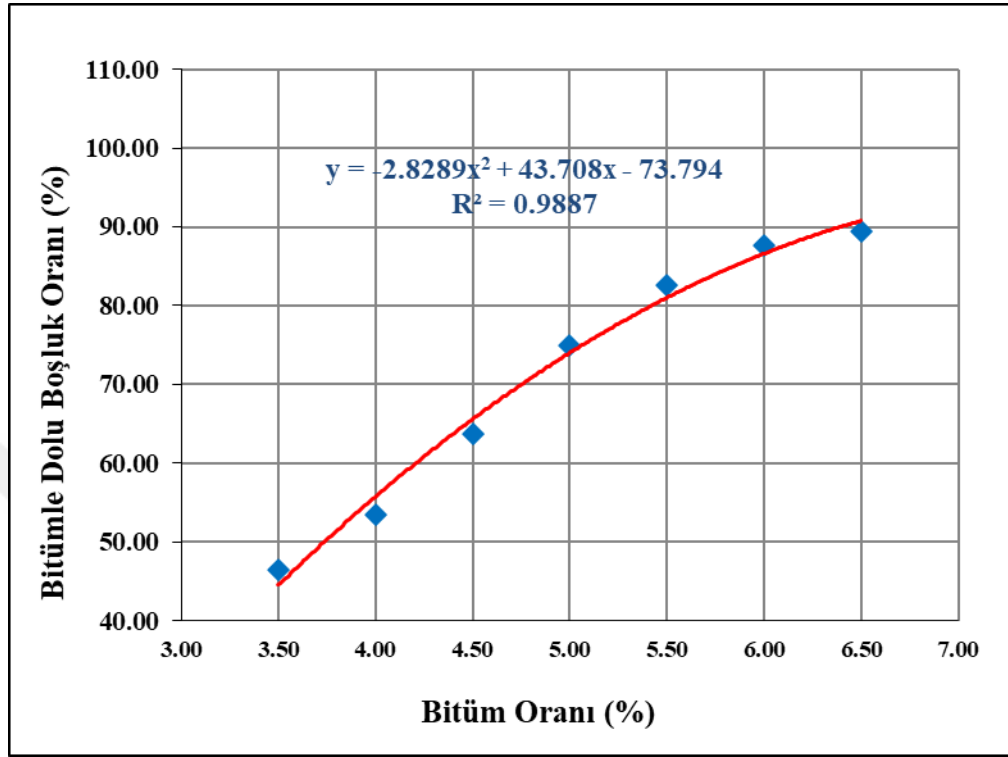
NOT Kontrol Numarası (Katkı)									
Kaba Agregat Oran (%)	İnce Agregat Oran (%)	Filler Agregat Oran (%)	Kaba Agregat Oran (%)	İnce Agregat Oran (%)	Filler Agregat Oran (%)	Kaba Agregat Oran (%)	İnce Agregat Oran (%)	Filler Agregat Oran (%)	Kaba Agregat Oran (%)
AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a (100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	j



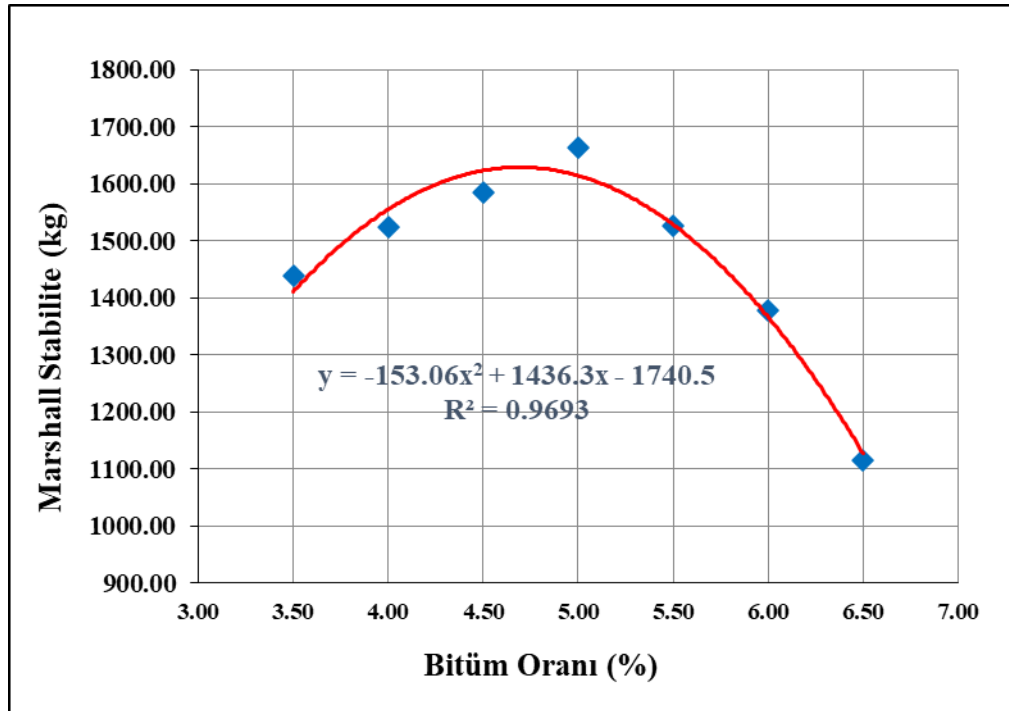
Şekil A.1. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık grafiği (kontrol numunesi)



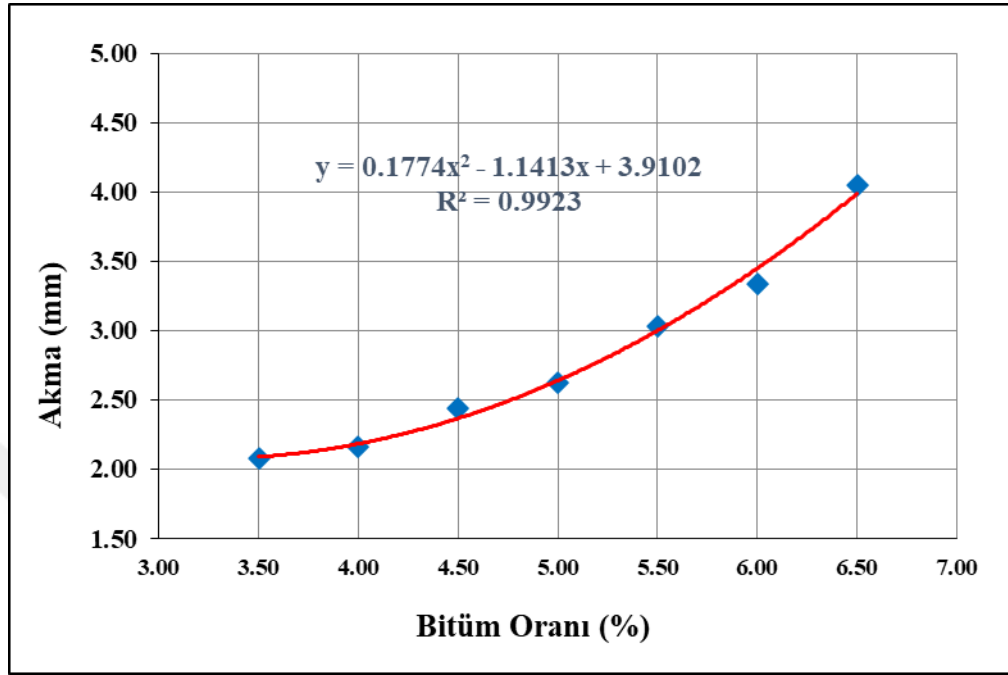
Şekil A.2. Bitüm oranı - boşluk oranı grafiği (kontrol numunesi)



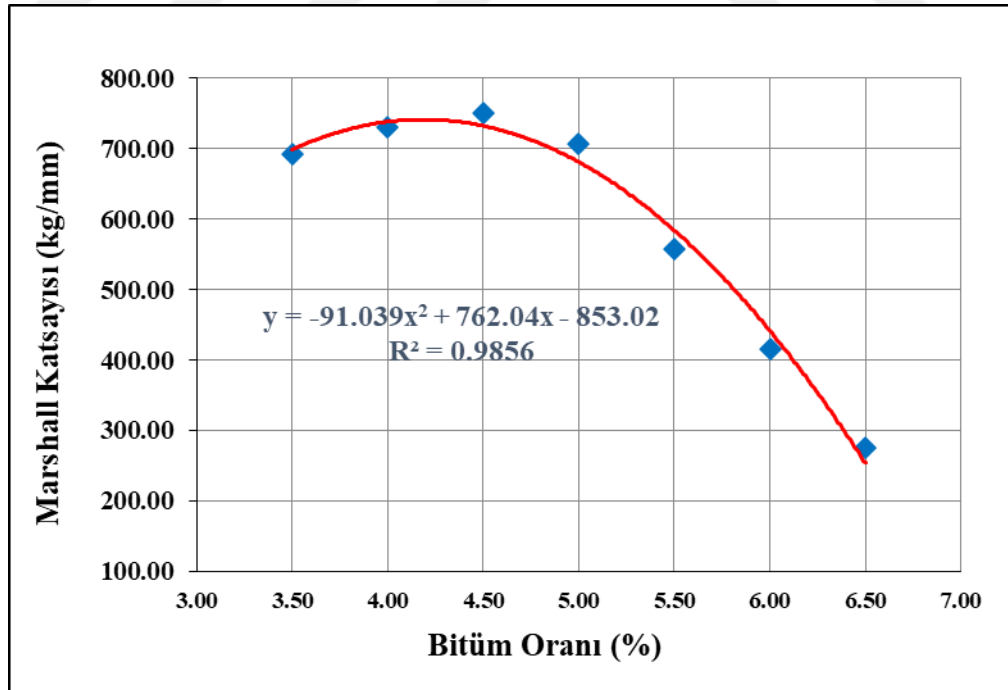
Şekil A.3.Bitüm oranı - BDBO grafiği (kontrol numunesi)



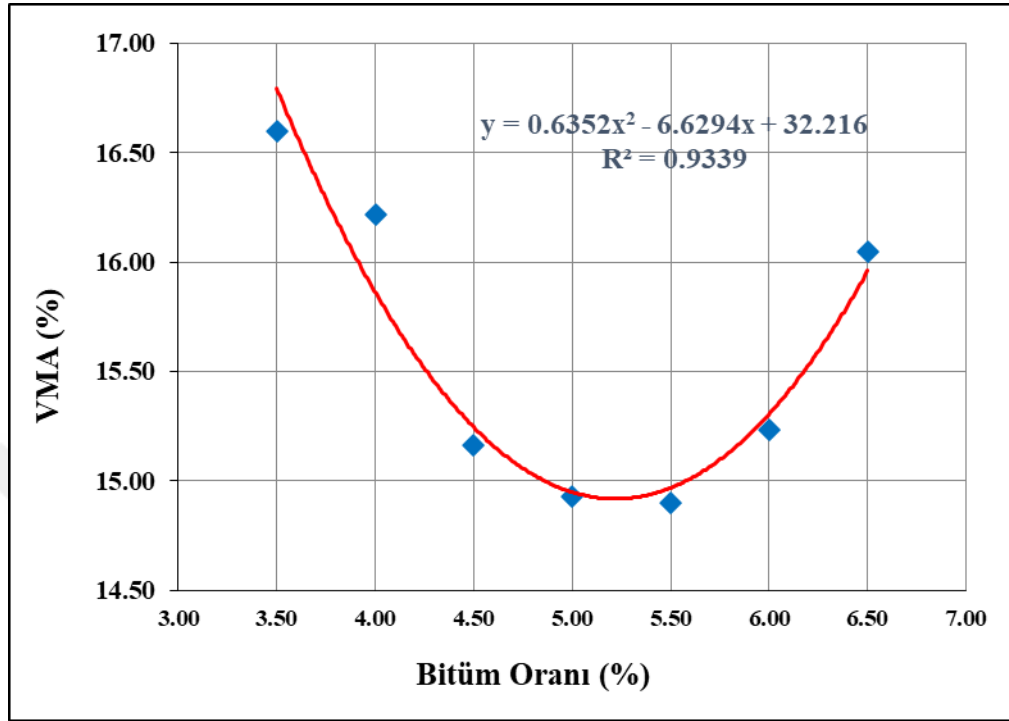
Şekil A.4. Bitüm oranı - Marshall stabilite grafiği (kontrol numunesi)



Şekil A.5. Bitüm oranı - akma grafiği (kontrol numunesi)



Şekil A.6. Bitüm oranı - Marshall katsayısı grafiği (kontrol numunesi)

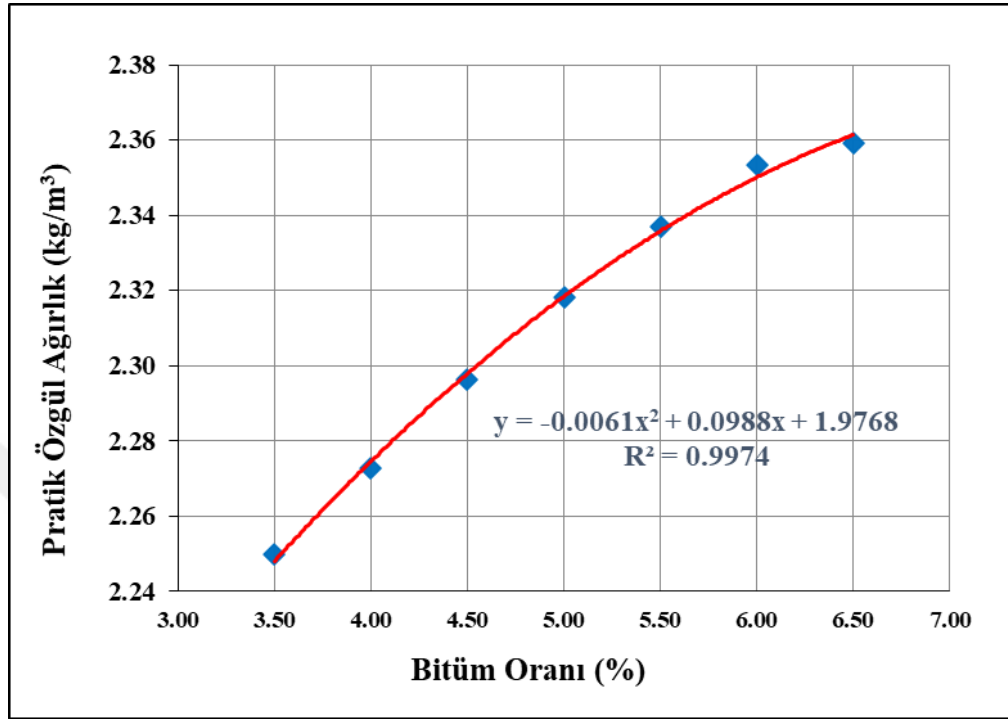


Şekil A.7. Bitüm oranı - VMA grafiği (kontrol numunesi)

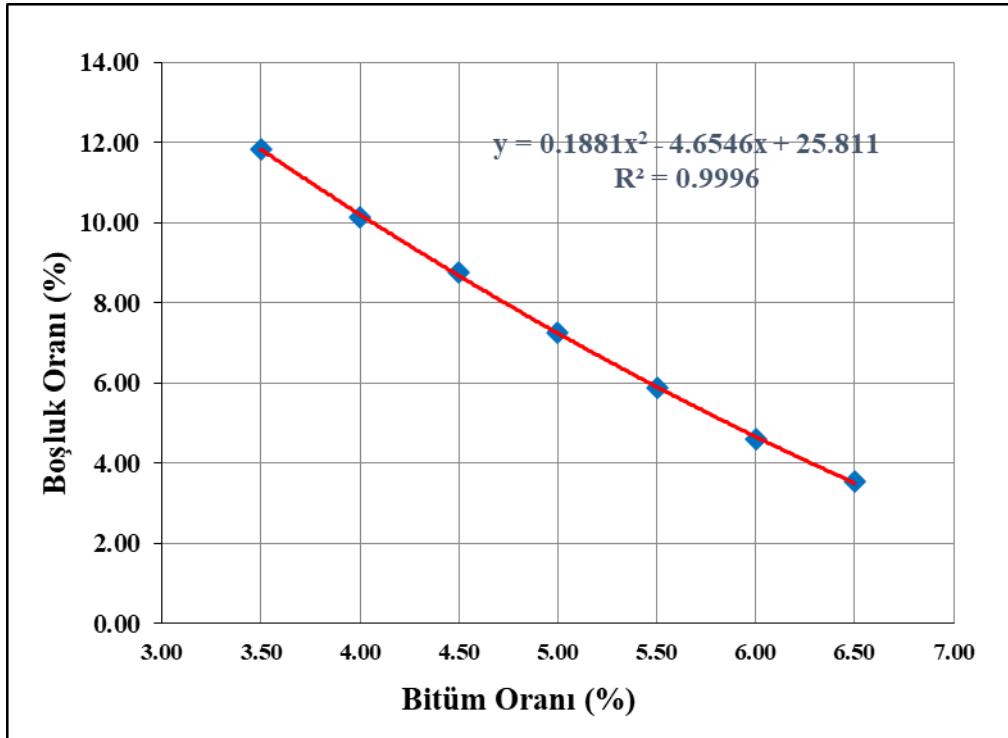
Ek Açıklama-B

Çizelge B.1. %25 TSTC katkılı Marshall deney sonuçları

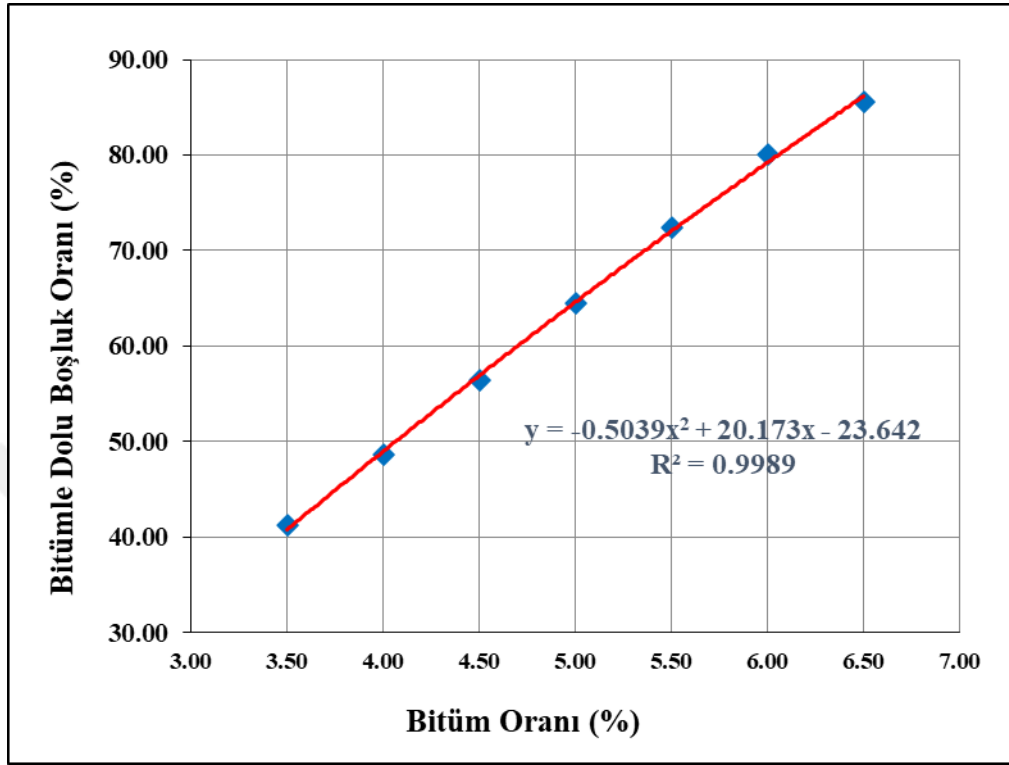
NUMARASI		NOT: %25 Termitli Sıralı Taban Cıvafı Katkı																								
		Kaba Agregat Oranları				İnce Agregat Oranları				Filtre Agregat Oranları				BOSLUK ORANI (%)				STABİLİTE (kg)		AKMA						
		AC		AC		AC		AC		AC		AC		Arzaya		Bilinen Doh.		Toplam Karışım		Değerler		Düşünülme		AKMA		
		%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AKMA						
		HACİM (m³)																Düşünülme		AK						



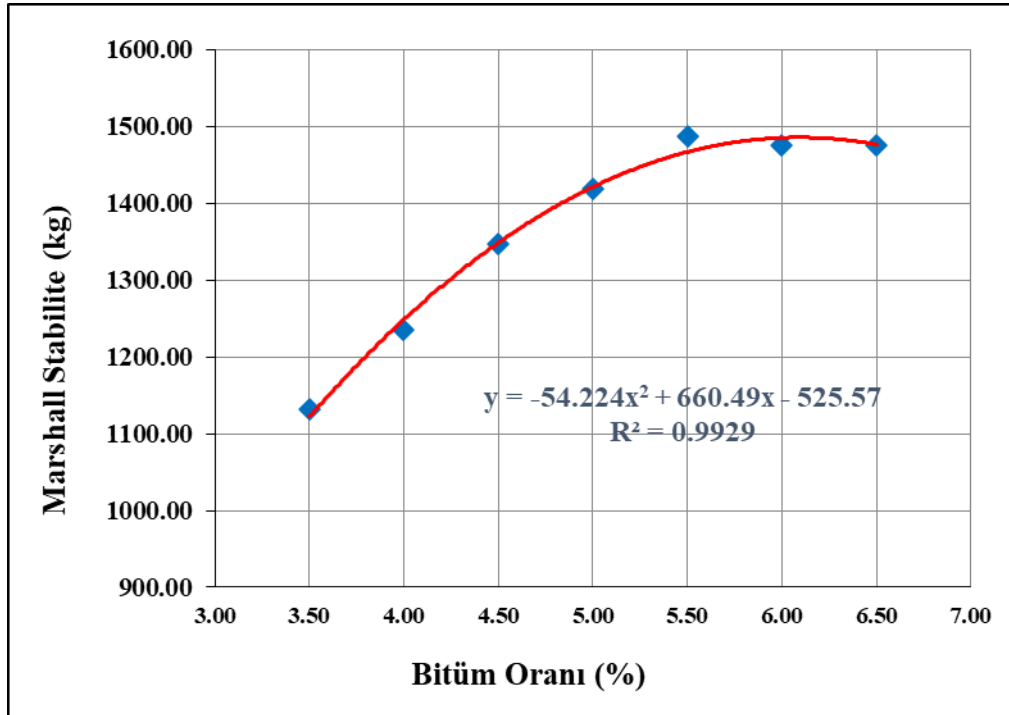
Şekil B.1. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık grafiği (%25 TSTC katkılı)



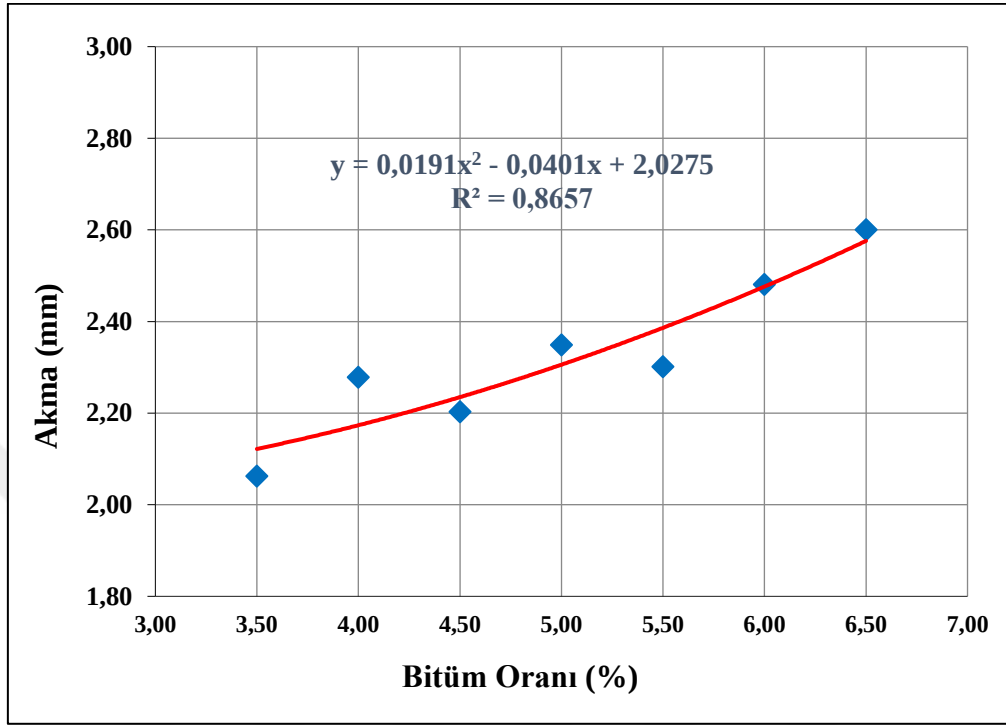
Şekil B.2. Bitüm oranı - boşluk oranı grafiği (%25 TSTC katkılı)



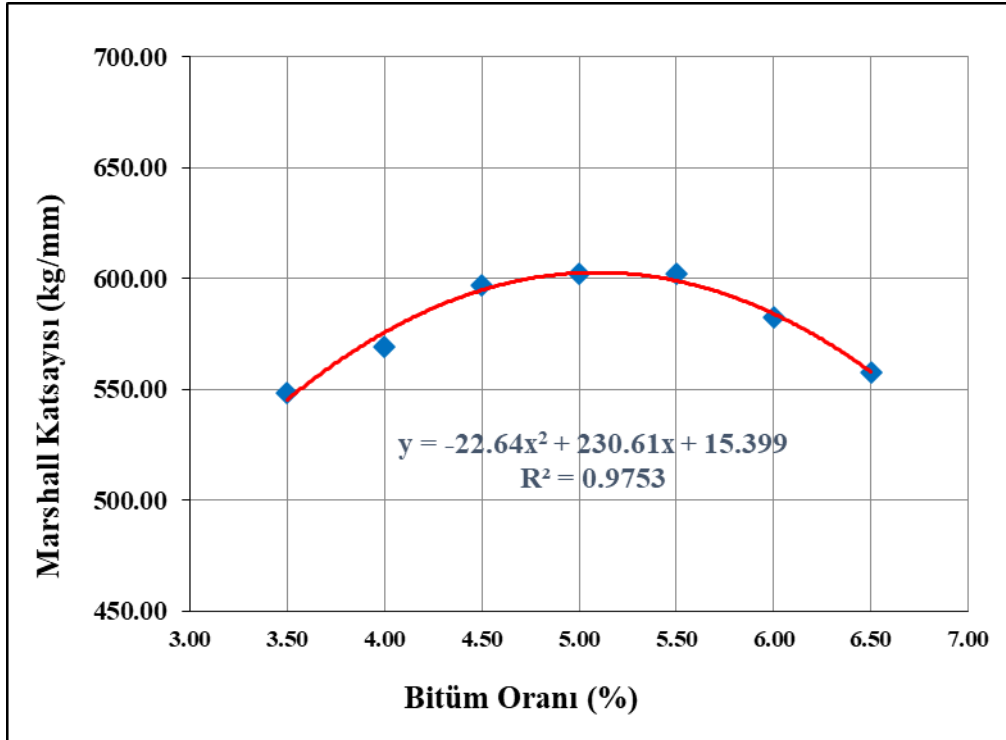
Şekil B.3. Bitüm oranı - BDBO grafiği (%25 TSTC katkılı)



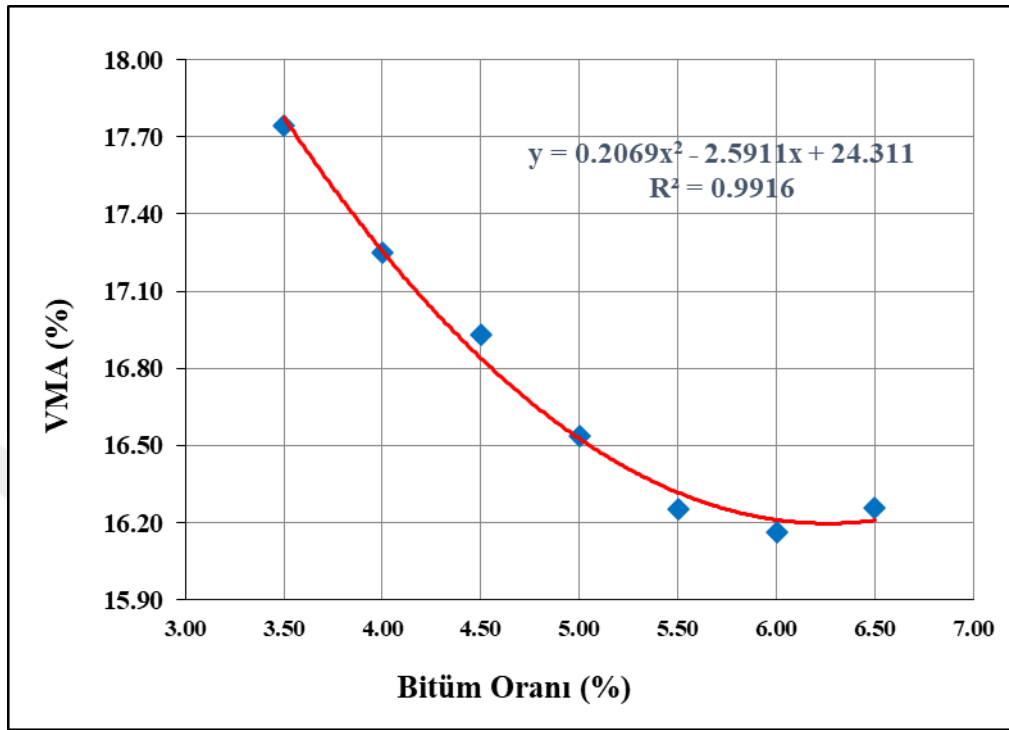
Şekil B.4. Bitüm oranı - Marshall stabilite grafiği (%25 TSTC katkılı)



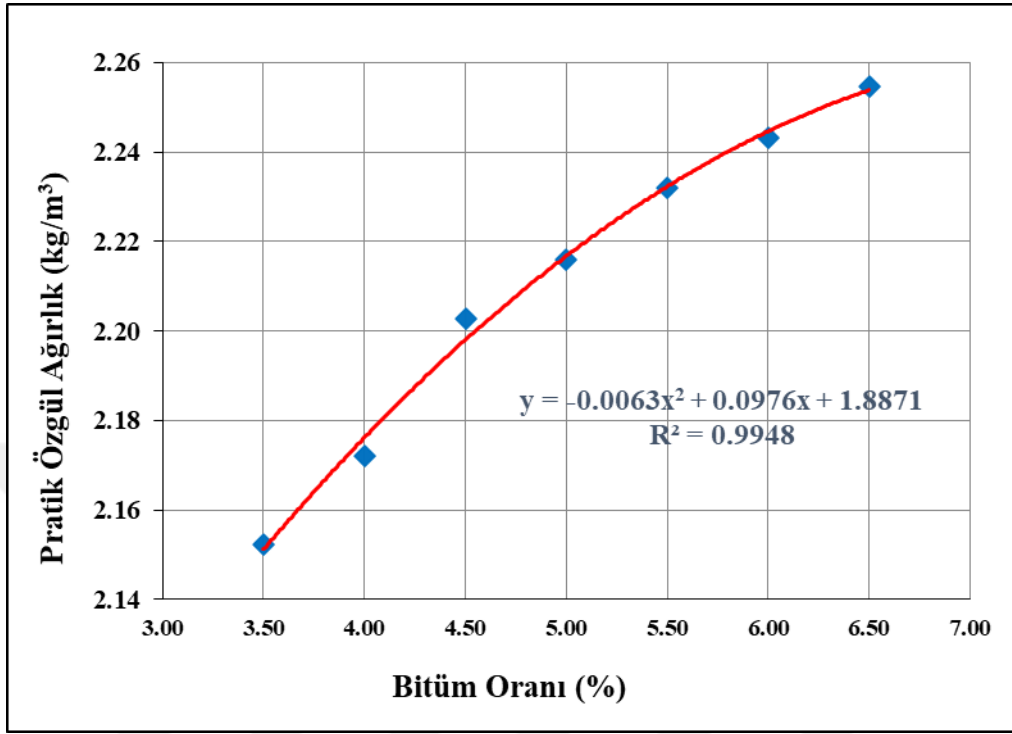
Şekil B.5. Bitüm oranı - akma grafiği (%25 TSTC katkılı)



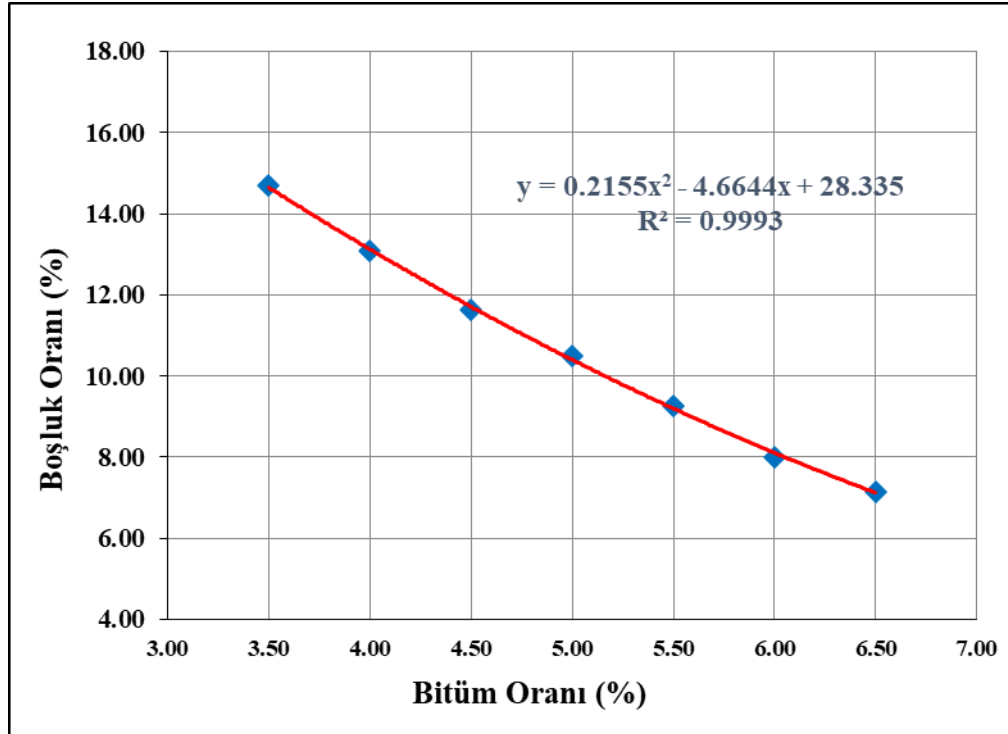
Şekil B.6. Bitüm oranı - Marshall katsayısı grafiği (%25 TSTC katkılı)



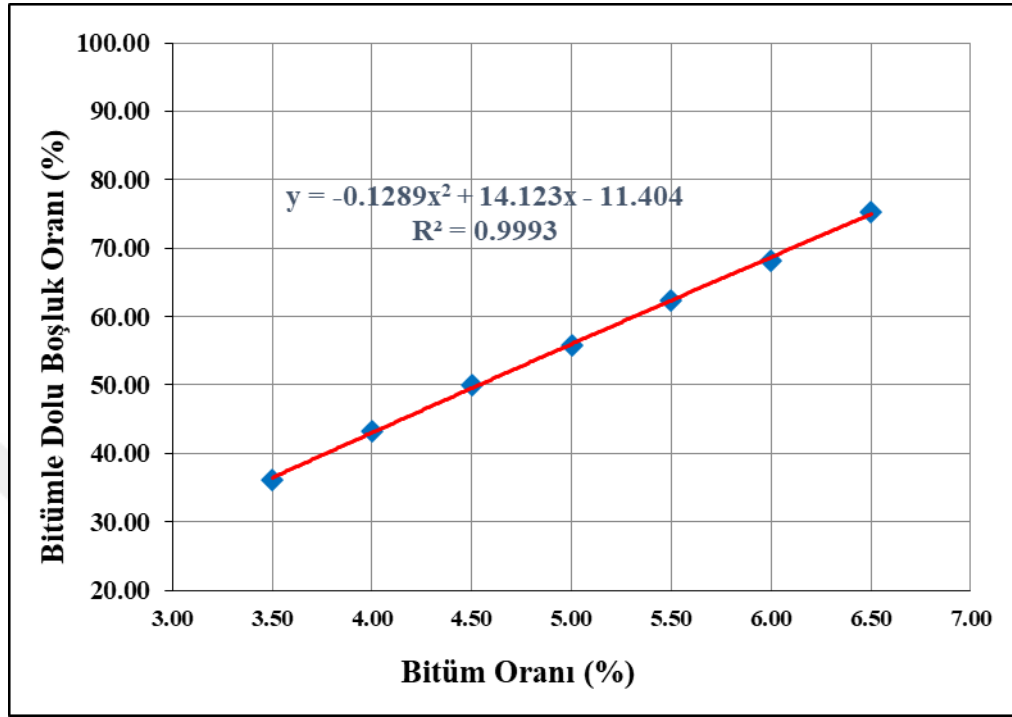
Şekil B.7. Bitüm oranı - VMA grafiği (%25 TSTC katkılı)



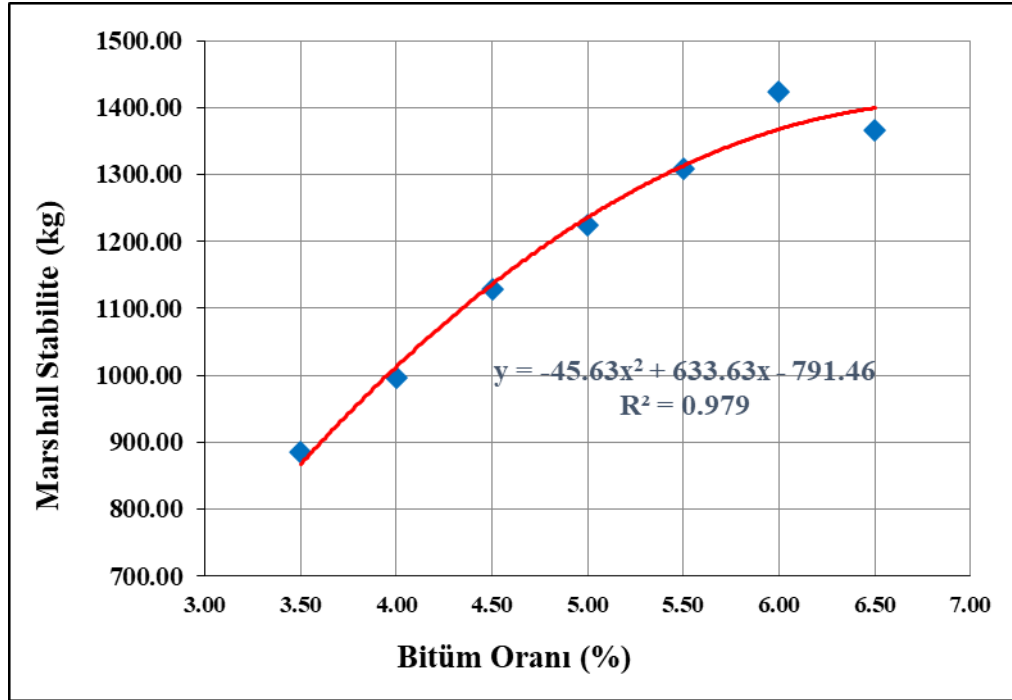
Şekil C.1. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık grafiği (%50 TSTC katkılı)



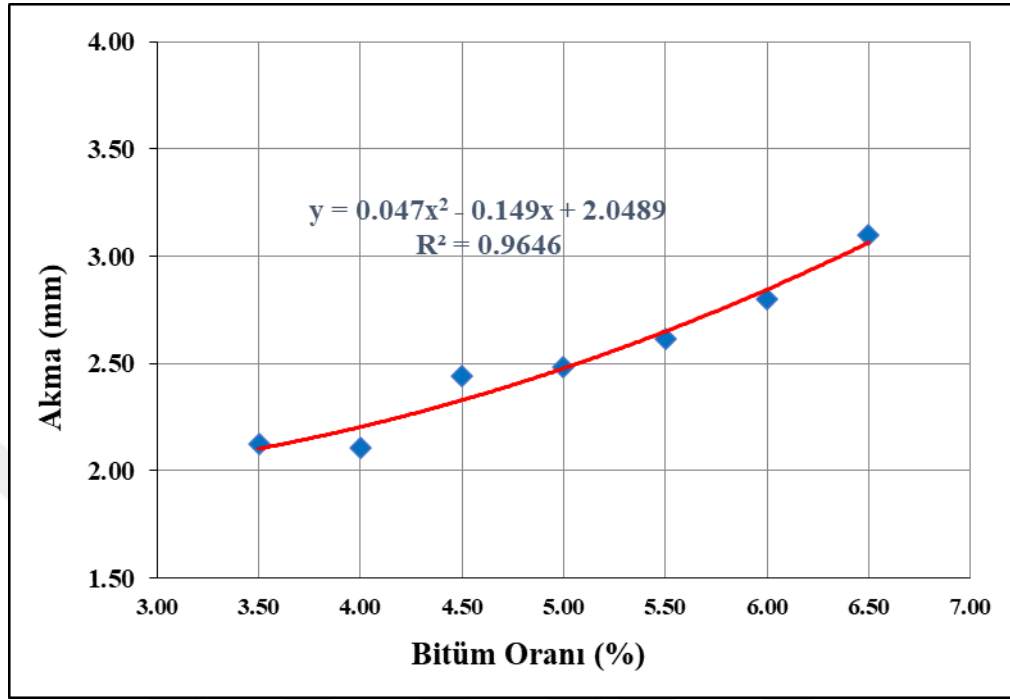
Şekil C.2. Bitüm oranı - boşluk oranı grafiği (%50 TSTC katkılı)



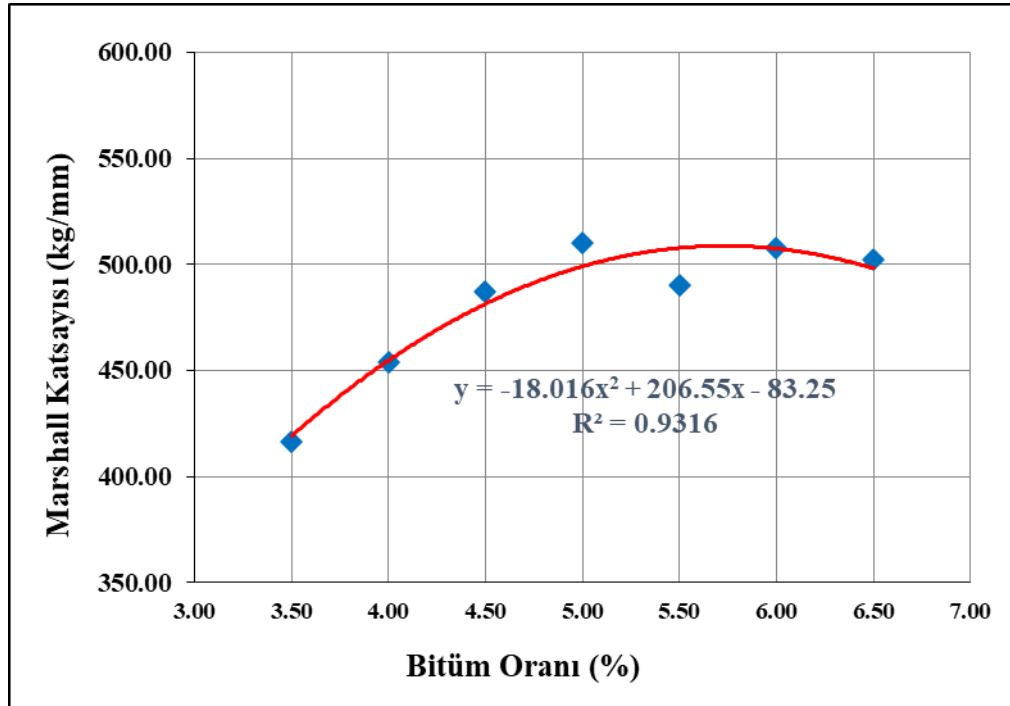
Şekil C.3. Bitüm oranı - BDBO grafiği (%50 TSTC katkılı)



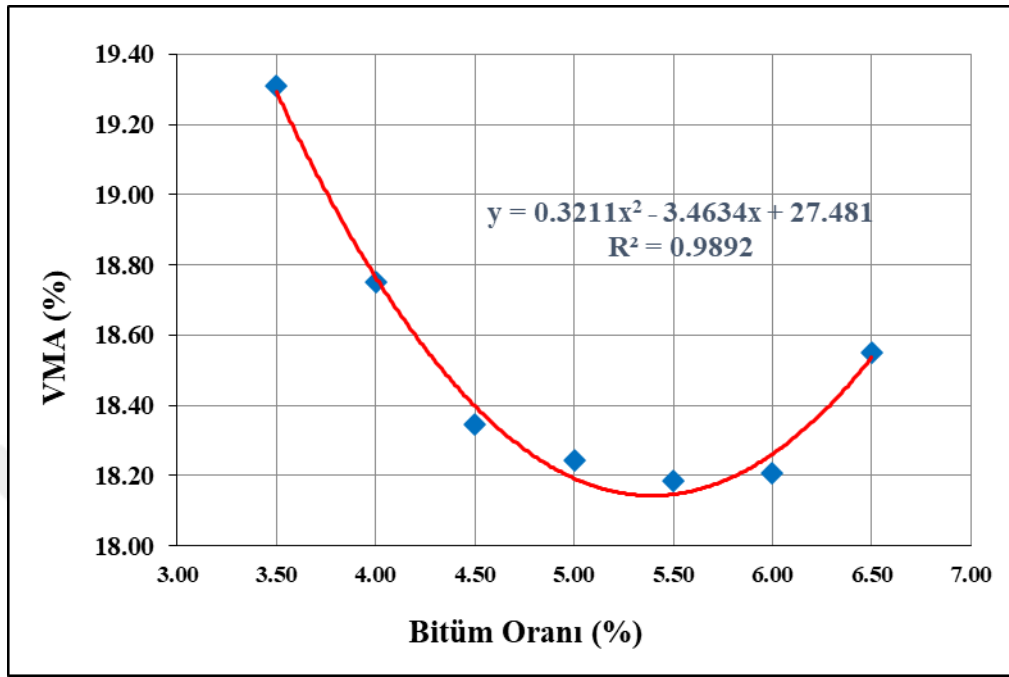
Şekil C.4. Bitüm oranı - Marshall stabilite grafiği (%50 TSTC katkılı)



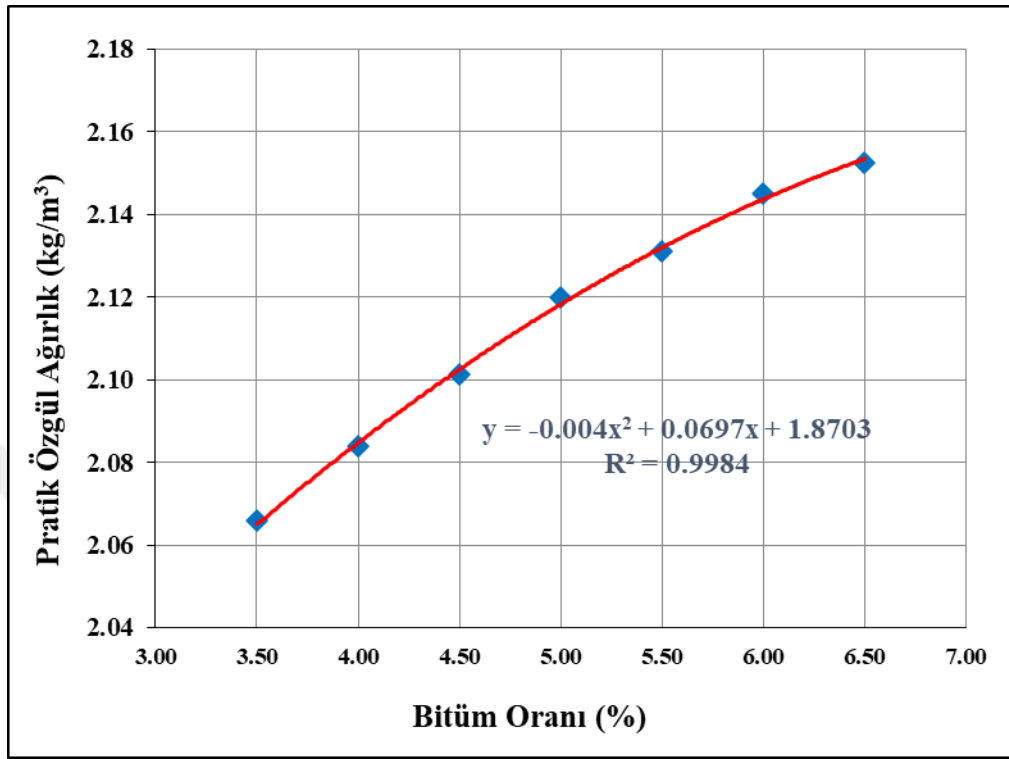
Şekil C.5. Bitüm oranı - akma grafiği (%50 TSTC katkılı)



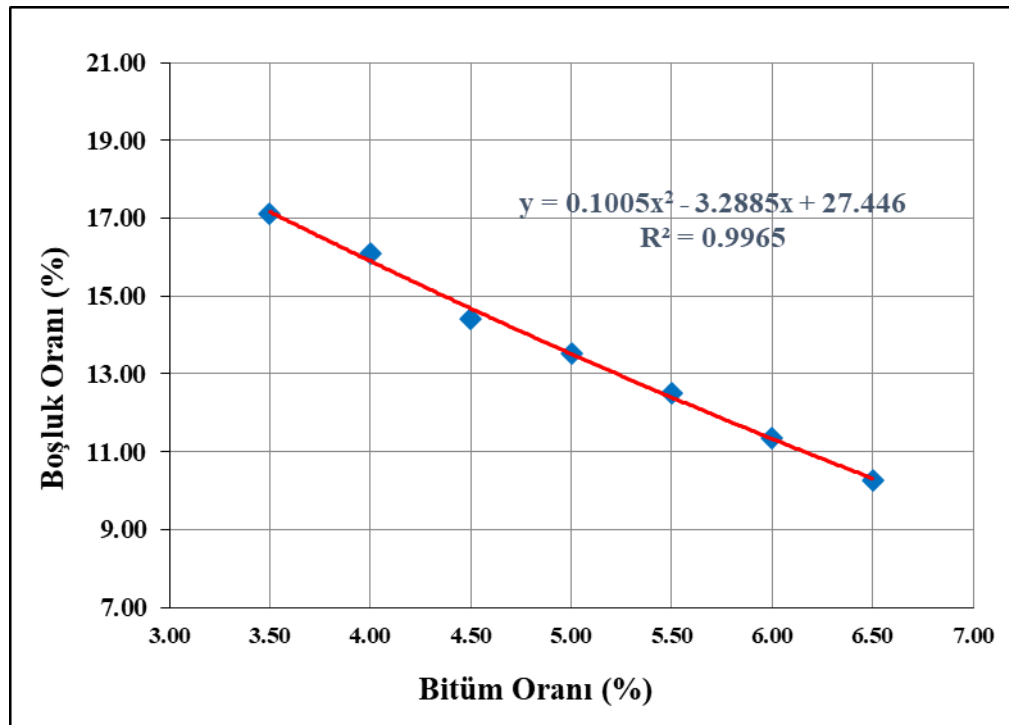
Şekil C.6. Bitüm oranı - Marshall katsayısı grafiği (%50 TSTC katkılı)



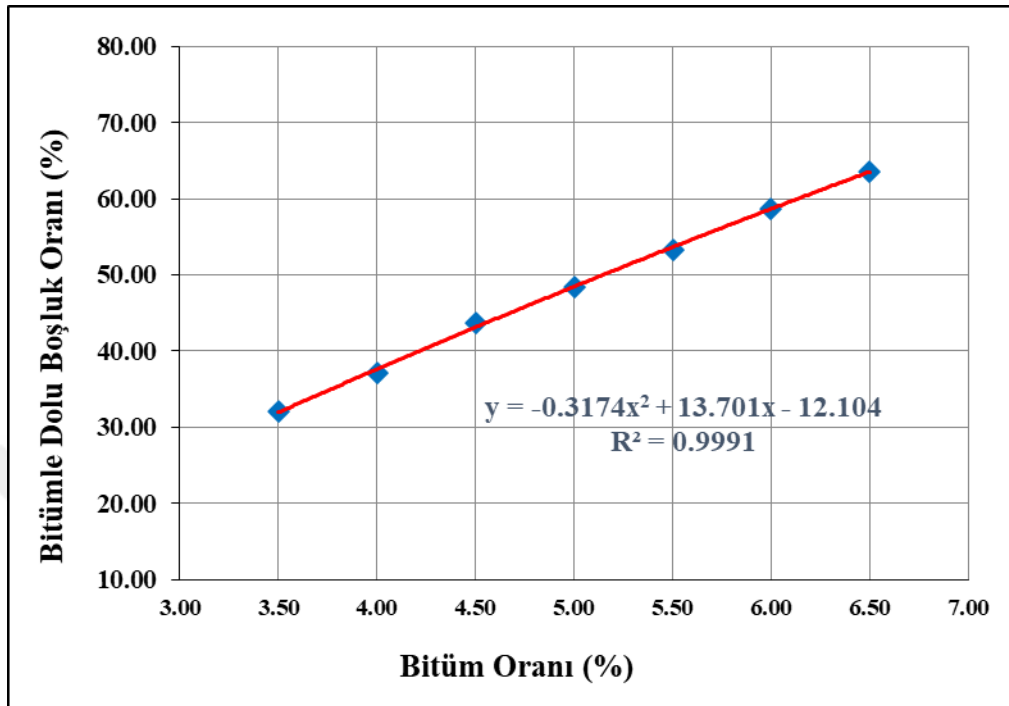
Şekil C.7. Bitüm oranı - VMA grafiği (%50 TSTC katkılı)



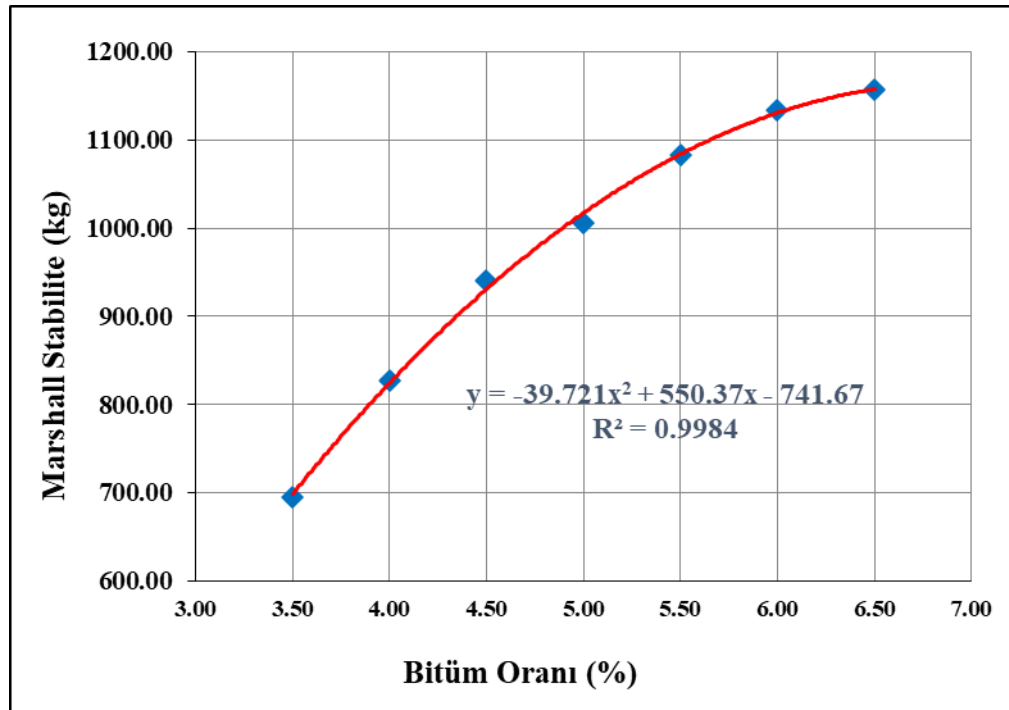
Şekil D.1. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık grafiği (%75 TSTC katkılı)



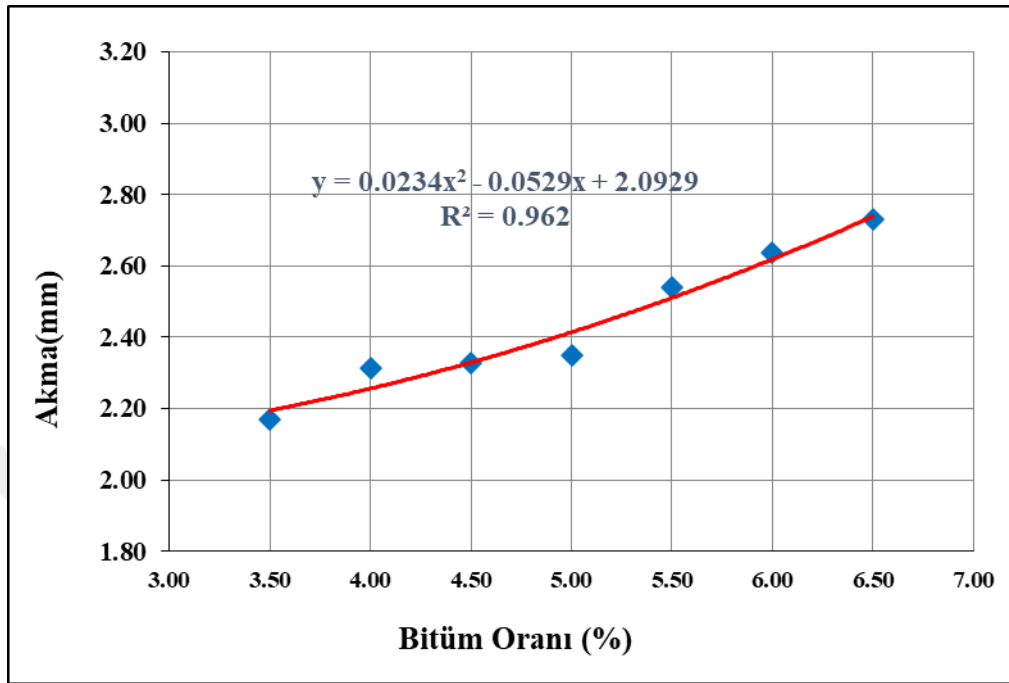
Şekil D.2. Bitüm oranı - boşluk oranı grafiği (%75 TSTC katkılı)



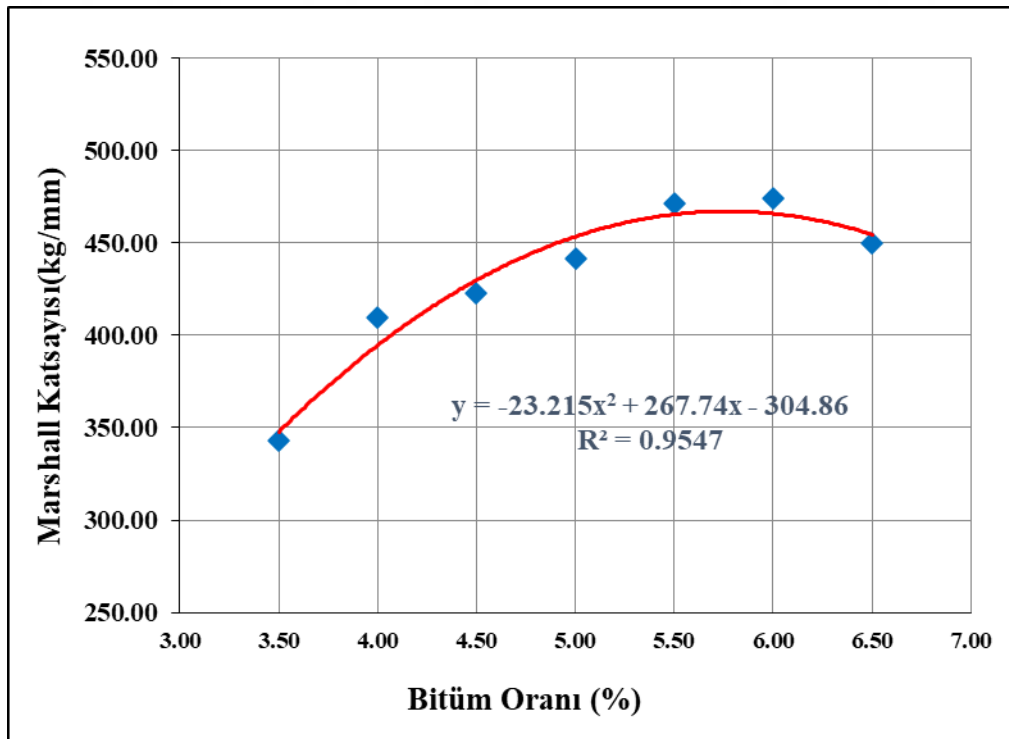
Şekil D.3. Bitüm oranı - BDBO grafiği (%75 TSTC katkılı)



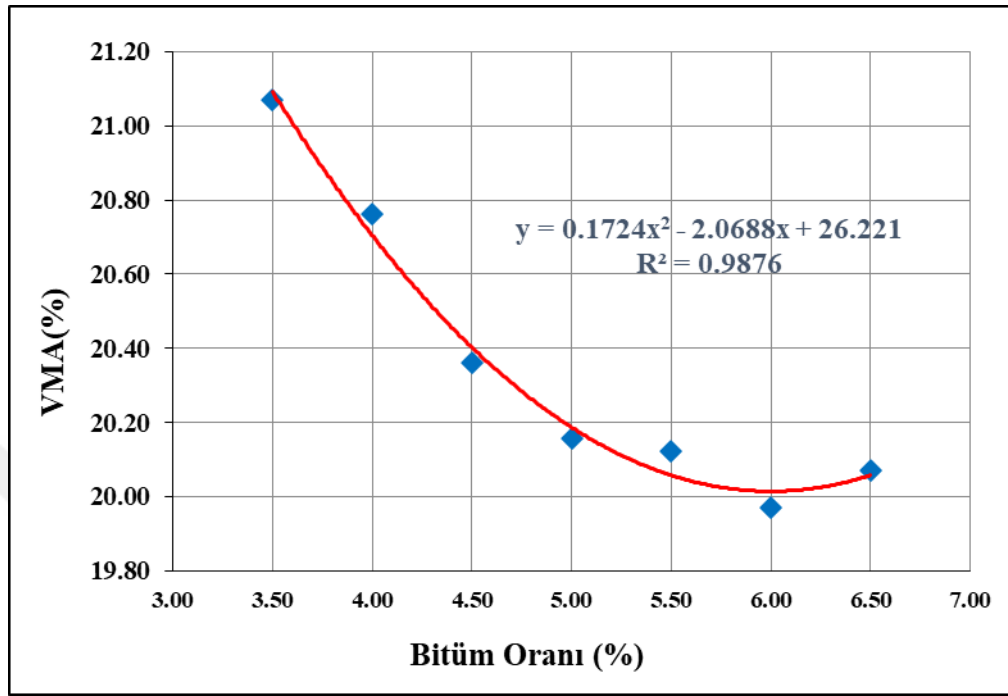
Şekil D.4. Bitüm oranı - Marshall stabilite grafiği (%75 TSTC katkılı)



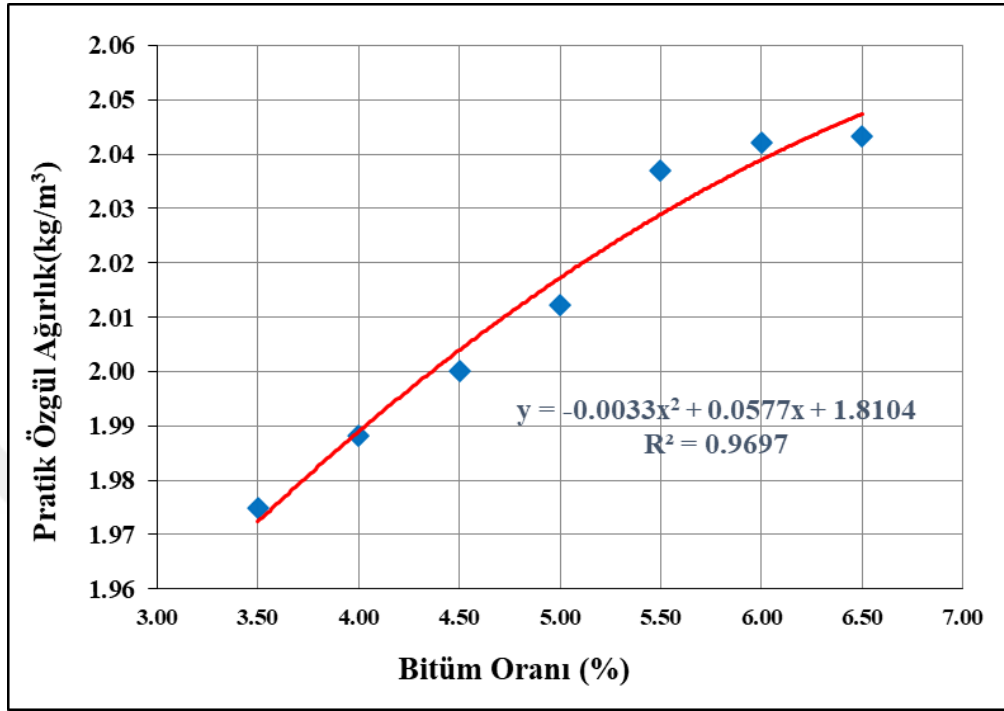
Şekil D.5. Bitüm oranı - akma grafiği (%75 TSTC katkılı)



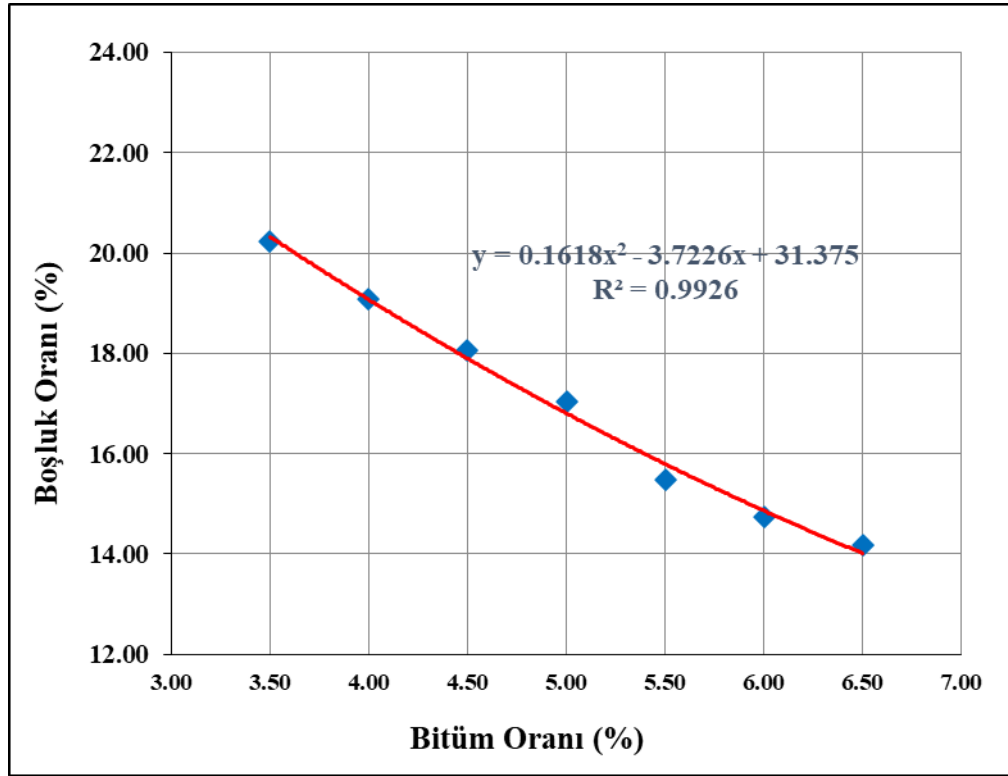
Şekil D.6. Bitüm oranı - Marshall katsayısı grafiği (%75 TSTC katkılı)



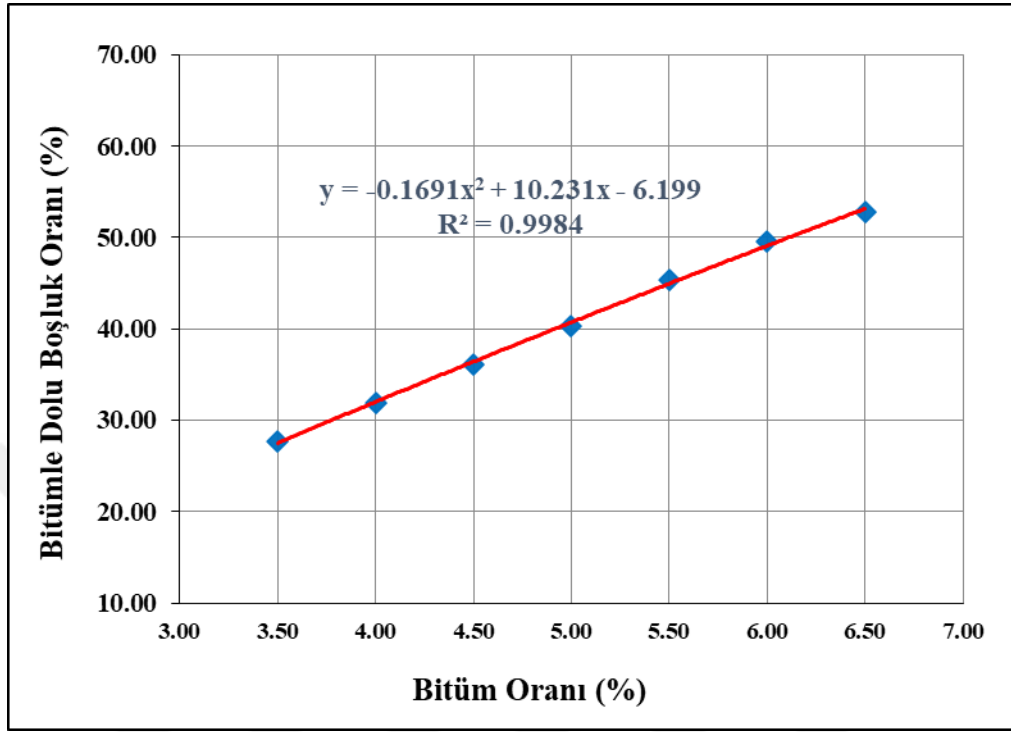
Şekil D.7. Bitüm oranı - VMA grafiği (%75 TSTC katkılı)



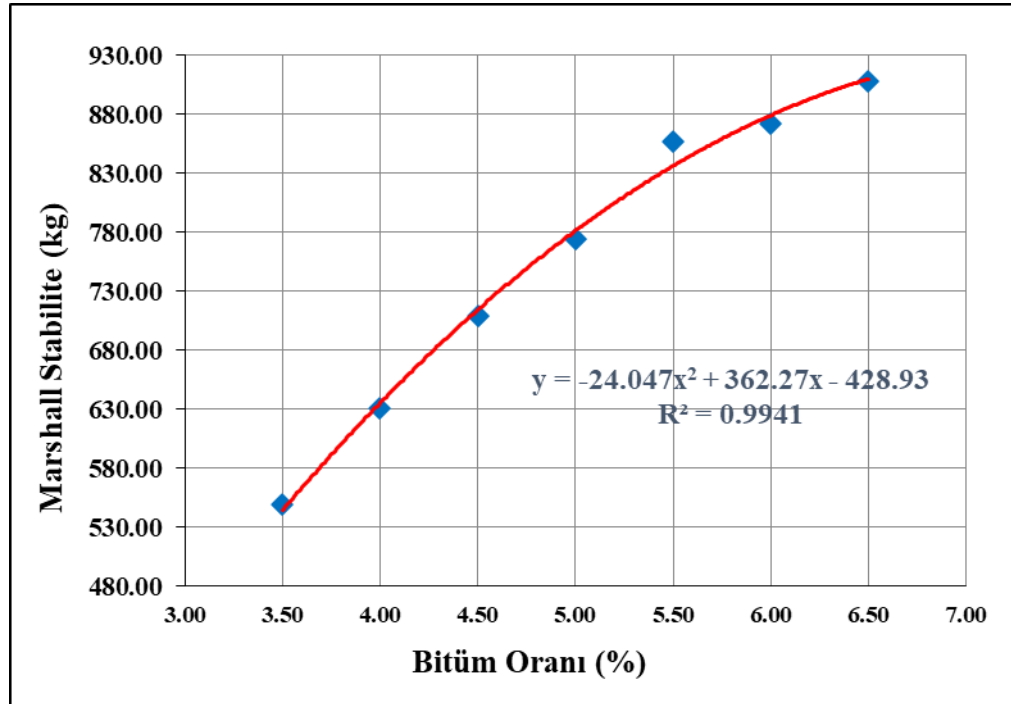
Şekil E.1. Bitüm oranı - pratik özgül ağırlık grafiği (%100 TSTC katkılı)



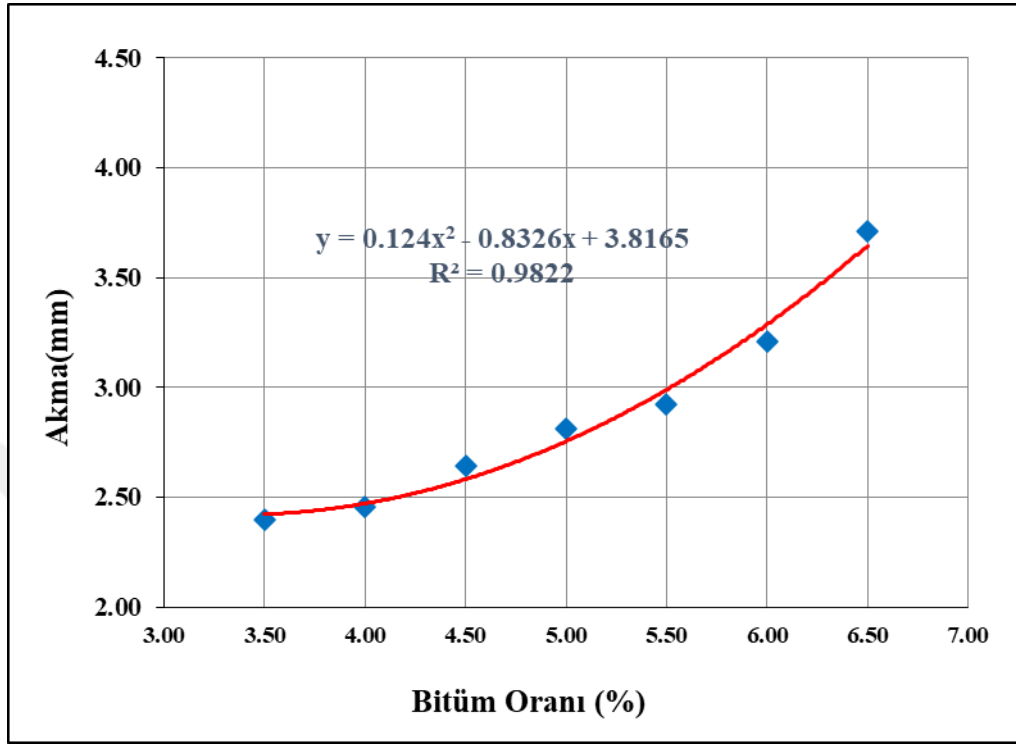
Şekil E.2. Bitüm oranı - boşluk oranı grafiği (%100 TSTC katkılı)



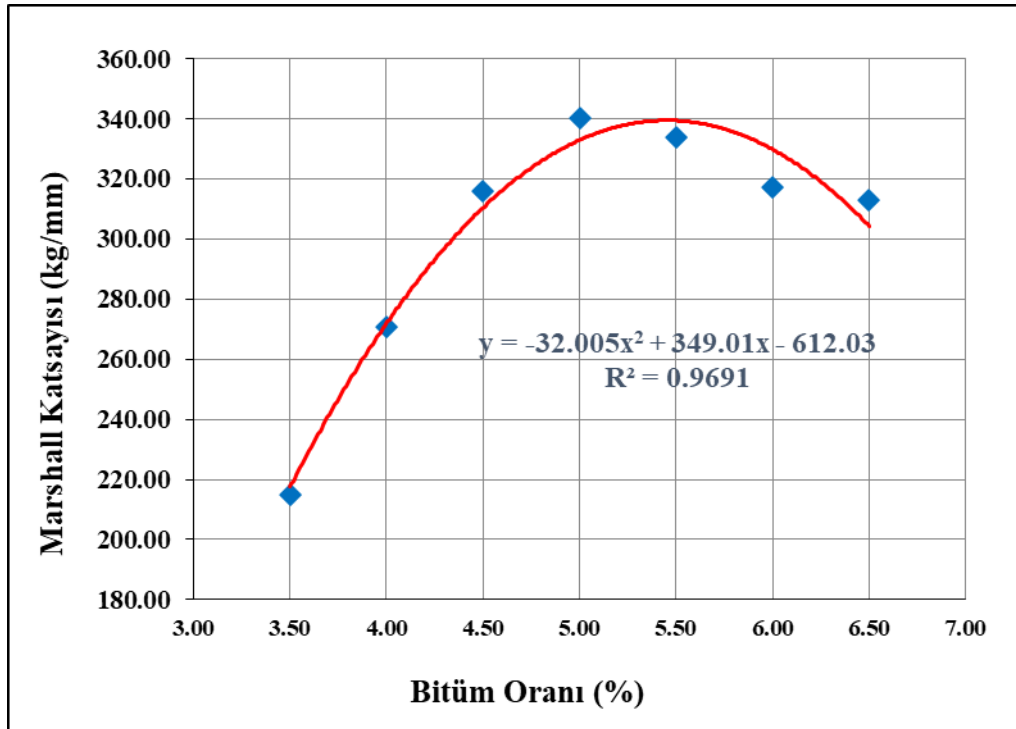
Şekil E.3. Bitüm oranı - BDBO grafiği (%100 TSTC katkılı)



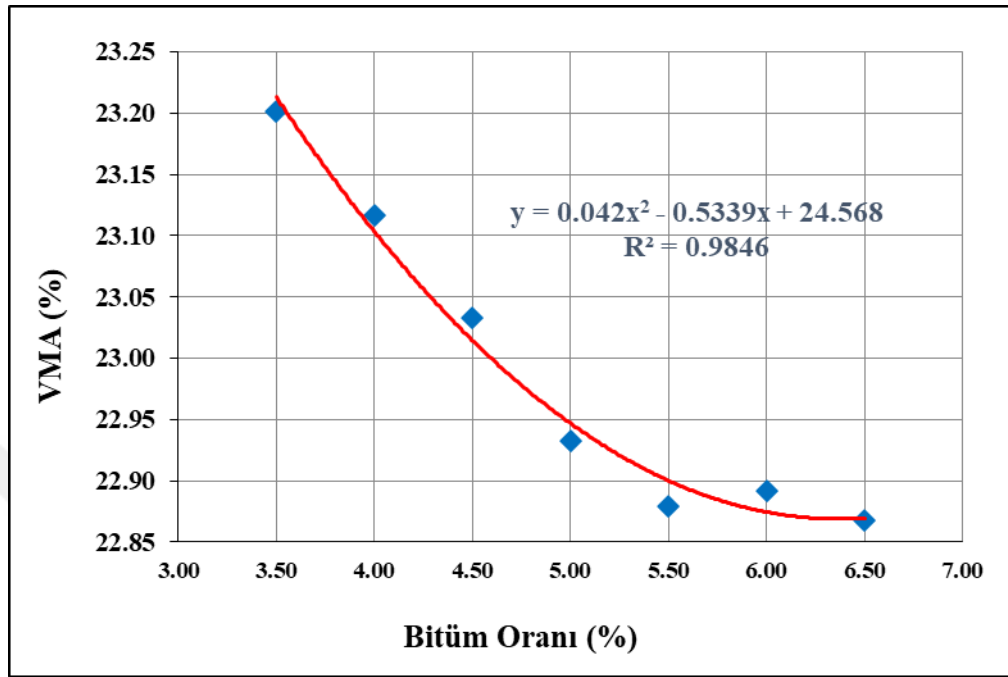
Şekil E.4. Bitüm oranı - Marshall Stabilite grafiği (%100 TSTC katkılı)



Şekil E.5. Bitüm oranı - akma grafiği (%100 TSTC katkılı)



Şekil E.6. Bitüm oranı - Marshall katsayısı grafiği (%100 TSTC katkılı)



Şekil E.7. Bitüm oranı - VMA grafiği (%100 TSTC katkılı)