# Yer Seramik Atıklarının Asfalt Betonunun Performans Özelliklerine Etkisi

Nisa Buket Çalık

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2023

# The Effect of Ceramic Floor the Waste on he Performance Properties of Asphalt Concrete

Nisa Buket Çalık

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Civil Engineering

June 2023

# Yer Seramik Atıklarının Asfalt Betonunun Performans Özelliklerine Etkisi

Nisa Buket Çalık

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Ulaştırma Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Murat KARACASU
İkinci Danışman: Araş. Gör. Dr. Kadir Berkhan AKALIN

Haziran 2023

**ONAY**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Bilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Nisa Buket Çalık**'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Yer Seramik Atıklarının Asfalt Betonunun Performans Özelliklerine Etkisi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Murat KARACASU
İkinci Danışman : Araş. Gör. Dr. Kadir Berkhan AKALIN

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Murat KARACASU

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Şafak BİLGİÇ

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Polat YALINIZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..…… sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Murat KARACASU danışmanlığında ve Araş. Gör. Dr. Kadir Berkhan AKALIN ikinci danışmanlığında hazırlamış olduğum "Yer Seramik Atıklarının Asfalt Betonunun Performans Özelliklerine Etkisi" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel 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. 08/06/2023

Nisa Buket ÇALIK

İmza

# ÖZET

Dünya nüfusunun artması, sanayi ve teknolojinin gelişmesi ham madde ihtiyacında büyük bir artışa neden olmuştur. Ham madde ihtiyacının ve kullanımının artışı ile doğal kaynaklar zamanla yetersiz kalmaya başlamıştır. Bu durumda hali hazırda bulunan atıkların azaltılması ve ham madde kaynağı olarak kullanılması konuları oldukça önem kazanmış, bu konudaki çalışmalar ve araştırmalar da hızlanmıştır.

Ülkemizde de diğer ülkelerde olduğu gibi karayolu ulaşımı en çok tercih edilen ulaşım ağıdır. Karayollarında en çok kullanılan esnek üst yapı türü bitümlü sıcak karışımlardır. Bitümlü sıcak karışımlar belirli oranlarda bitüm ve ağırlıkça yaklaşık olarak %95 oranında agreganın şartname sınırları içerisinde bir araya gelmesi ile oluşur ancak maliyeti oldukça yüksektir. Ekonomik olarak ve çevresel açıdan kazanç sağlayabilmek adına bitümlü sıcak karışımlar hazırlanırken bitümde veya agregada mevcut atık ikameleri kullanılarak çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yer seramik atıklarının bitümlü sıcak karışımlarda iri agrega sınıfında kullanılmasının asfalt betonu performans özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Öğütme ve eleme yöntemleri ile 9,50 mm ve 4,75 mm elek üstü malzeme haline getirilen atık yer seramiği asfalt betonu karışımına iri agrega ağırlığının %10, %20, %30 ve %40 oranında ikame edilerek numuneler hazırlanmış ve bu numunelere Marshall tasarım deneyi ve dinamik- statik sünme deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları değerlendirilerek yer seramik atıklarının %20 oranında iri agrega yerine kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Böylece hem ilerleyen zamanlarda yaşanacak ham madde sıkıntısına hem de yer seramik atıklarının bertaraf edilme aşamasında yaşanan çevresel sorunlara da bir alternatif olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Seramik yer karosu, atık, asfalt betonu, geri dönüşüm

# SUMMARY

The increasing world population and the development of industry and technology have led to a significant increase in the demand for raw materials. With the increase in the demand for and use of raw materials, natural resources have become insufficient over time. In this situation, reducing existing waste and using it as a source of raw material have become very important, and studies and research in this field have accelerated.

As in other countries, road transportation is the most preferred transportation network in our country. The most commonly used flexible pavement type on highways is bituminous hot mixtures. Bituminous hot mixtures are formed by a certain proportion of bitumen and approximately 95% of aggregate within the specification limits. However, their cost is quite high. To achieve economic and environmental benefits, studies are being carried out to use waste replacements in bituminous hot mixtures during their preparation in the bitumen or aggregate.

In this study, the effect of using waste floor tiles as coarse aggregate in bituminous hot mixtures on asphalt concrete performance characteristics has been investigated. Samples were prepared by substituting the coarse aggregate weight by 10%, 20%, 30%, and 40% with waste floor tiles that were processed into 9.50 mm and 4.75 mm sieve material by grinding and screening methods, and Marshall design experiment and dynamic-static creep tests were performed on these samples. As a result of the evaluation of the test results, it was concluded that waste floor tiles can be used instead of 20% of coarse aggregate. Thus, it will be an alternative both to the raw material shortage that will be experienced in the future and to the environmental problems experienced in the disposal stage of waste floor tiles.

**Keywords:** Ceramic floor tile, waste, asphalt concrete, recycling

# TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında benden hiçbir emeğini esirgemeyen, bilgi birikimi ve akademik başarıları ile çalışmalarımda daima bana yol gösteren tez danışmanım Prof. Dr. Murat KARACASU'ya teşekkür eder, sonsuz ve en derinden saygılarımı sunarım.

Çalışmalarımın sorunsuz bir şekilde ilerlemesi ve tamamlanabilmesi için bilgileri ile çalışmalarıma ışık tutan ve yardımlarını esirgemeyen ikinci danışmanım Araş. Gör. Dr. Kadir Berkhan AKALIN'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Eğitim hayatım boyunca beni destekleyen, benim fikirlerime, isteklerime değer veren, benden maddi manevi elinde bulanan hiçbir imkanı esirgemeyen babam Yakup ÇALIK ve annem Ayşe ÇALIK'a sonsuz teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

**ÖZET** ..... vi

**SUMMARY** ..... vii

**TEŞEKKÜR** ..... viii

**İÇİNDEKİLER** ..... ix

**ŞEKİLLER DİZİNİ** ..... xiii

**ÇİZELGELER DİZİNİ** ..... xvi

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ** ..... xviii

**1. GİRİŞ ve AMAÇ** ..... 1

**2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI** ..... 3

**3. KARAYOLU ALTYAPI VE ÜSTYAPI ÖZELLİKLERİ** ..... 12

3.1. Karayolu Altyapısı ..... 12

3.2. Karayolu Üstyapısı ..... 12

3.2.1 Rijit üstyapılar ..... 14

3.2.2 Yarı rijit üstyapılar ..... 14

3.2.3 Esnek üstyapılar ..... 14

3.2.3.1 Alt temel tabakası ..... 15

3.2.3.2 Temel tabakası ..... 15

3.2.3.3 Kaplama tabakası ..... 16

**4. SERAMİK KARO ÜRETİMİ VE ATIKLARI** ..... 19

4.1 Seramik ..... 19

4.2 Seramik Karo Üretimi ..... 19

4.3. Seramik Yer Karosu Üretimi ve Oluşan Atıklar ..... 21

4.4. Tez Kapsamında Kullanılan Yer Seramik Atıklarının Özellikleri ..... 23

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

**5. MATERYAL VE YÖNTEM** ..... 24

5.1. Agrega ..... 24

5.1.1. Asfalt Betonunda Kullanılan Agregaların Özellikleri ..... 24

5.1.1.1. Gradasyon ..... 24

5.1.1.2 Porozite ..... 25

5.1.1.3 Dane şekli ve biçimi ..... 26

5.1.1.4. Yüzey yapısı ..... 26

5.2. Agrega Deneyleri ..... 26

5.2.1. Elek Analizi (Dane Dağılımı) Deneyi ..... 27

5.2.1.1. Kullanılan deney aletleri ..... 27

5.2.1.2. Deneyin yapılışı ..... 28

5.2.1.3. Hesaplama ..... 28

5.2.2. Aşınma kaybı (Los Angeles) deneyi ..... 31

5.2.2.1. Kullanılan deney aletleri ..... 31

5.2.2.2. Deneyin yapılışı ..... 32

5.2.2.3. Hesaplama ..... 34

5.2.3. İri agrega özgül ağırlık deneyi ..... 35

5.2.3.1. Kullanılan deney aletleri ..... 35

5.2.3.2. Numune hazırlama ve deneyin yapılışı ..... 35

5.2.3.3. Hesaplama ..... 36

5.2.4. İnce agrega özgül ağırlık deneyi ..... 38

5.2.4.1. Kullanılan deney aletleri ..... 38

5.2.4.2. Deneyin yapılışı ..... 39

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

5.2.4.3. Hesaplama ..... 39
5.2.5. Filler agrega özgül ağırlık deneyi ..... 40
5.2.5.1. Kullanılan deney aletleri ..... 40
5.2.5.2. Numune hazırlama ve deneyin yapılışı ..... 41
5.2.5.3. Hesaplama ..... 41
5.2.6. Birim hacim ağırlık deneyi ..... 42
5.2.6.1. Kullanılan deney aletleri ..... 42
5.2.6.2. Deneyin yapılışı ..... 43
5.2.6.3. Hesaplama ..... 43
5.2.7. Su emme deneyi ..... 45
5.2.7.1. Kullanılan deney aletleri ..... 45
5.2.7.2. Deneyin yapılışı ..... 45
5.2.7.3. Hesaplama ..... 46
5.2.8. Yassılık indeksi deneyi ..... 46
5.2.8.1. Kullanılan deney aletleri ..... 47
5.2.8.2. Deneyin yapılışı ..... 47
5.2.8.3. Hesaplama ..... 47
5.2.9. Donma-Çözülme Deneyi ..... 48
5.2.9.1 Kullanılan deney aletleri ..... 48
5.2.9.2 Deneyin yapılışı ..... 49
5.2.9.3 Hesaplama ..... 49
5.3. Bitüm ..... 50
5.4. Bitüm deneyleri ..... 50

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

5.5. Karışım Deneyleri ..... 55
5.5.1. Marshall Tasarım Deneyi ..... 55
5.5.1.1. Kullanılan deney aletleri ..... 55
5.5.1.2. Numune hazırlama ..... 56
5.5.1.3. Marshall stabilite ve akma deneyi ..... 60
5.5.1.4. Hesaplama ..... 62
5.5.2. Statik ve Dinamik Sünme Deneyi ..... 86
5.5.2.1. Kullanılan deney aletleri ..... 86
5.5.2.2. Deneyin yapılışı ..... 88
5.5.2.3. Hesaplama ..... 89
**6. BULGULAR VE TARTIŞMA** ..... 91
6.1. Marshall Tasarım Deneyi Karşılaştırma Grafikleri ve Sonuçlar ..... 91
6.2. Sünme Deneyleri Karşılaştırma Grafikleri ve Sonuçlar ..... 96
6.3. Ekonomik Analiz ..... 99
**7. SONUÇ VE ÖNERİLER** ..... 100
**KAYNAKLAR DİZİNİ** ..... 102

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Şekil** **Sayfa**

3.1 Karayolu üstyapı enkesiti (KTŞ, 2013) ..... 13
3.2 Esnek üstyapı tabakaları (Er, 2011) ..... 15
4.1 Yer karosu üretimi akım şeması (STB, 2018) ..... 21
4.2. Seramik karo üretiminde açığa çıkan atıklar (Rambaldi vd., 2018) ..... 22
4.3 Seranit/ İnönü fabrikasında bulunan pişmiş yer seramik ve sırlı porselen kırık kazanları ..... 22
4.4. Tez kapsamında kullanılan öğütülmüş yer seramik atıkları ..... 23
5.1 Agrega gradasyon dağılımı (Tunç, 2004) ..... 25
5.2 Elekler, etüv ve terazi ..... 27
5.3 Agrega numuneleri dane boyu dağılımı ..... 29
5.4 Los Angeles aşınma deney makinesi, elek ve agrega numunesi ..... 32
5.5 Yer seramik atıkları Los Angeles deneyi ..... 33
5.6 Özgül ağırlık sehpası, kafes örgülü sepet, terazi ve iri agrega ..... 35
5.7 Yer seramik atıklarının özgül ağırlık deneyi ..... 36
5.8. İnce agrega özgül ağırlık deney aletleri ..... 38
5.9. Filler agrega özgül ağırlık değerinin bulunması ..... 41
5.10. Birim hacim ağırlık deneyinde kullanılan aletler ..... 43
5.11. Su emme deneyi numuneleri ..... 45
5.12. Yassılık indeksi şablonu ..... 47
5.13. 250 g $Na_2SO_4$, tel sepet, çözelti kovası ve terazi ..... 48
5.14. Penetrasyon deney aleti ..... 51
5.15. Yumuşama noktası deney aletleri ..... 51
5.16. Düktilite deney aletleri ..... 52
5.17. Dönel ince film ısıtma kaybı deney aleti (RTFOT) ..... 52
5.18. İnce film ısıtma kaybı deney aleti (TFOT) ..... 53
5.19. Parlama noktası deney aleti ..... 53
5.20. Viskozite deney aleti ..... 54
5.21. Asfalt betonu numunelerinin hazırlanışı ..... 56
5.22. Marshall tasarım deneyi aşamaları - 1 ..... 57

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Şekil** **Sayfa**

5.23. Marshall tasarım deneyi aşamaları – 2 ..... 58
5.24. Marshall tasarım deneyi aşamaları – 3 ..... 59
5.25. Asfalt betonu numunelerinin kalıptan çıkarılması ..... 59
5.26. Marshall stabilite ve akma deneyi numune yüksekliklerinin ölçülmesi ..... 60
5.27. Su banyosu, kurulama işlemi, Marshall test cihazı ve kırılmış numuneler ..... 61
5.28. Bitüm oranı-pratik özgül ağırlık (kontrol numunesi) ..... 64
5.29. Bitüm oranı- boşluk oranı (kontrol numunesi) ..... 64
5.30. Bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı (kontrol numunesi) ..... 65
5.31. Bitüm oranı- Marshall stabilitesi (kontrol numunesi) ..... 66
5.32. Bitüm oranı- VMA (kontrol numunesi) ..... 66
5.33. Bitüm oranı- Marshall katsayısı (kontrol numunesi) ..... 67
5.34. Bitüm oranı- akma (kontrol numunesi) ..... 67
5.35. Bitüm oranı- pratik özgül ağırlık (%10 yer seramik atık) ..... 69
5.36. Bitüm oranı- boşluk oranı (%10 yer seramik atık) ..... 69
5.37. Bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı (%10 yer seramik atık) ..... 70
5.38. Bitüm oranı- Marshall stabilitesi (%10 yer seramik atık ) ..... 70
5.39. Bitüm oranı- VMA (%10 yer seramik atık ) ..... 71
5.40. Bitüm oranı- Marshall katsayısı (%10 yer seramik atık ) ..... 71
5.41. Bitüm oranı- akma değeri (%10 yer seramik atık ) ..... 72
5.42. Bitüm oranı- pratik özgül ağırlık (%20 yer seramik atık) ..... 73
5.43. Bitüm oranı- boşluk oranı (%20 yer seramik atık) ..... 74
5.44. Bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı (%20 yer seramik atık) ..... 74
5.45. Bitüm oranı- Marshall stabilitesi (%20 yer seramik atık) ..... 75
5.46. Bitüm oranı- VMA (%20 yer seramik atık) ..... 75
5.47. Bitüm oranı- Marshall katsayısı (%20 yer seramik atık) ..... 76
5.48. Bitüm oranı- akma değeri (%20 yer seramik atık) ..... 76
5.49. Bitüm oranı- pratik özgül ağırlık (%30 yer seramik atık) ..... 78
5.50. Bitüm oranı- boşluk oranı (%30 yer seramik atık) ..... 78
5.51. Bitüm oranı- Bitümle dolu boşluk oranı (%30 yer seramik atık) ..... 79

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Şekil** **Sayfa**

5.52. Bitüm oranı- Marshall stabilitesi (%30 yer seramik atık) ..... 79
5.53. Bitüm oranı- VMA (%30 yer seramik atık)..... 80
5.54. Bitüm oranı- Marshall katsayısı (%30 yer seramik atık)..... 80
5.55. Bitüm oranı- akma değeri (%30 yer seramik atık) ..... 81
5.56. Bitüm oranı- pratik özgül ağırlık (%40 yer seramik atık) ..... 82
5.57. Bitüm oranı- boşluk oranı (%40 yer seramik atık)..... 83
5.58. Bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı (%40 yer seramik atık)..... 83
5.59. Bitüm oranı-Marshall stabilitesi (%40 yer seramik atık) ..... 84
5.60. Bitüm oranı- VMA (%40 yer seramik atık)..... 84
5.61. Bitüm oranı- Marshall katsayısı (%40 yer seramik atık)..... 85
5.62. Bitüm oranı- akma değeri (%40 yer seramik atık) ..... 85
5.63. Sünme deneyi iklimlendirme kabini ve deney düzeneği ..... 87
5.64. Sünme deneyi için kullanılacak numuneler ve kabin sıcaklık ayarı..... 88
5.65. Sünme deney sonucu oluşan deformasyon..... 89
6.1. Optimum bitüm oranı – yer seramik atığı miktarı..... 91
6.2. Bitüm oranı- pratik özgül ağırlık karşılaştırma grafiği..... 92
6.3. Bitüm oranı- boşluk oranı karşılaştırma grafiği ..... 92
6.4. Bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı karşılaştırma grafiği ..... 93
6.5. Bitüm oranı- Marshall stabilite değerleri karşılaştırma grafiği ..... 94
6.6. Bitüm oranı- akma miktarı karşılaştırma grafiği ..... 94
6.7. Bitüm oranı- Marshall katsayısı karşılaştırma grafiği ..... 95
6.8. Bitüm oranı- agregalar arası boşluk oranı karşılaştırma grafiği ..... 95
6.9. Dinamik sünme vuruş sayısı- ortalama birikimli şekil değiştirme karşılaştırma grafiği ..... 96
6.10. Dinamik sünme rijitliği- vuruş sayısı karşılaştırma grafiği ..... 97
6.11. Statik sünme ortalama birikimli şekil değiştirme- zaman karşılaştırma grafiği..... 98
6.12. Statik sünme rijitliği- zaman karşılaştırma grafiği ..... 98

# ÇİZELGELER DİZİNİ

**Çizelge** **Sayfa**

4.1. Seramik karo üretiminde yer alan ilk on ülke (Baraldi, 2022) ..... 20
4.2. Yer seramik atıkları XRF analiz sonuçları ..... 23
5.1. Aşınma tabakası Tip-1 agrega gradasyonu ve şartname sınırları ..... 29
5.2. Superpave agrega gradasyonu ve şartname sınır değerleri ..... 30
5.3. Deneylerde kullanılan atık ve agrega miktarları (atık miktarı %10 ve %20) ..... 30
5.4. Deneylerde kullanılan atık ve agrega miktarları (atık miktarı %30 ve %40) ..... 31
5.5. Aşınma deneyi numune tipi, miktarları ve bilye sayısı (Ilıcalı vd., 2001) ..... 32
5.6. İri agrega özgül ağırlık deney sonuçları ..... 37
5.7. Yer seramik atıkları özgül ağırlık deney sonuçları ..... 37
5.8. İnce agrega özgül ağırlık deney sonuçları ..... 40
5.9. Filler agrega özgül ağırlık deney sonucu ..... 42
5.10. Agrega sıkışık birim hacim ağırlık deney sonuçları ..... 44
5.11. Yer seramik atıkları sıkışık birim hacim ağırlık deney sonuçları ..... 44
5.12. Agrega gevşek birim hacim ağırlık deney sonuçları ..... 44
5.13. Yer seramik atıkları gevşek birim hacim ağırlık deney sonuçları ..... 45
5.14. İri agrega su emme oranı deney sonuçları ..... 46
5.15. Yer seramik atıkları su emme oranı deney sonuçları ..... 46
5.16. Yassılık indeksi deney sonuçları ..... 48
5.17. Bitüm özellikleri ..... 54
5.18. Marshall tasarım kriterleri (KTŞ, 2013) ..... 63
5.19. Kontrol numunesi deney sonuçları ..... 63
5.20. Kontrol numunesi için optimum bitüm oranı tayini ..... 68
5.21. %10 yer seramik atığı içeren asfalt betonu deney sonuçları ..... 68
5.22. %10 yer seramik atığı içeren karışım için optimum bitüm oranı tayini ..... 72
5.23. %20 yer seramik atığı içeren asfalt betonu deney sonuçları ..... 73
5.24. %20 yer seramik atığı içeren karışım için optimum bitüm oranı tayini ..... 77
5.25. %30 yer seramik atığı içeren asfalt betonu deney sonuçları ..... 77
5.26. %30 yer seramik atığı içeren karışım için optimum bitüm oranı tayini ..... 81

# ÇİZELGELER DİZİNİ

**Çizelge** **Sayfa**

5.27. %40 yer seramik atığı içeren asfalt betonu deney sonuçları ..... 82
5.28. %40 yer seramik atığı içeren karışım için optimum bitüm oranı tayini ..... 86
6.1. 1 km yol için hesaplanan ekonomik analiz değerleri ..... 99

# SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| **Simgeler** | **Açıklama** |
|---|---|
| $\varepsilon_n$ | n yükleme sonucunda oluşan birikmiş eksenel şekil değiştirme |
| $h_0$ | numunenin başlangıçta ölçülen ortalama yüksekliği |
| $h_n$ | n yükleme sonucunda ölçülen ortalama numune yüksekliği |
| $E_n$ | n yükleme sonucu sünme modülü |
| $\sigma$ | yükleme gerilme |

| **Kısaltmalar** | **Açıklama** |
|---|---|
| $G_{ag}$ | Agrega özgül ağırlığı |
| $D_t$ | Maksimum teorik özgül ağırlık |
| OBO | Optimum Bitüm Oranı |
| BDBO | Bitümle Dolu Boşluk Oranı |
| ABO | Agregalar Arası Boşluk Oranı |
| BSK | Bitümlü Sıcak Karışım |
| KTŞ | Karayolları Teknik Şartnamesi |
| SGM | Sanayi Genel Müdürlüğü |
| STB | Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı |
| TSF | Türkiye Seramik Federasyonu |
| KGM | Karayolları Genel Müdürlüğü |
| $SG_b$ | Hacim özgül ağırlık |
| $SG_{ssd}$ | Yüzey kuru suya doygun özgül ağırlık |
| $SG_a$ | Zahiri özgül ağırlık |
| BHAs | Sıkı Birim Hacim Ağırlık |
| BHAg | Gevşek Birim Hacim Ağırlık |
| V | Hava Boşluğu |
| VFA | Bitümle Dolu Boşluk Oranı |
| VMA | Agregalar Arası Boşluk oranı |

# SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| MS | Marshall Stabilitesi |
| KA | Kaba Agrega |
| İA | İnce Agrega |
| MQ | Marshall katsayısı |
| PÖA | Pratik Özgül Ağırlık |
| LVDT | Linear Variable Displacement Transducers |
| XRF | Dalgaboyu Dağılımlı X-ışını Floresans Spektrometresi |
| F | Akma |
| LA | Los Angeles Aşınma Sınıfı |
| $G_{KA}$ | Kaba agrega özgül ağırlığı |
| $G_{İA}$ | İnce agrega özgül ağırlığı |
| $G_F$ | Filler özgül ağırlığı |
| $G_B$ | Bitüm özgül ağırlığı |

# 1. GİRİŞ ve AMAÇ

Günümüzde teknolojik gelişmelerin hız kazanması, ülkeler arasındaki sanayileşme yarışının artması hem hammadde ihtiyacının artmasına hem de çevre açısından birçok zarara yol açmaktadır. Sanayileşme sürecinde kullanılan hammaddeler azalmakta gelecek yıllarda hammadde temininde yaşanacak problemlere neden olmaktadır.

Sürdürülebilirlik yani hammaddenin kendini yenilemesi ve tükenmeden dengeli biçimde kullanımı tehlikeye girmektedir. Bu nedenle üretim sırasında ve sonradan oluşan atıkların depolama sürecine girmeden ve çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi ayrıca ülke ekonomisi adına hammadde yerine kullanılması konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

Son yıllarda büyük yatırımlar içerisinde yer alan karayolu ulaşımı, yük ve yolcu taşımacılığında en çok tercih edilen ulaşım türü olmuştur. Bölgeler arası mesafeler ve yolculuk sürelerini kısaltmak için yapılan çalışmalar hız kesmeden devam ettiğinden güncelliğini korumaktadır. Dünya ve ülke ekonomisi göz önüne alındığında ise çalışmalara paralel olarak yol yapımında, mevcut yolların tadilat ve tamirat işlemlerinde maliyetlerin büyük bir artış içerisinde olduğu gözlemlenmektedir. Karayolu ulaşımı aynı zamanda hammadde kullanımın en fazla olduğu çalışma alanlarından birisidir. Bu nedenle BSK üretiminde atık malzemelerin kullanılması araştırmaları hız kazanmıştır. Uçucu kül, atık camlar, plastik atıklar, lastik kauçuk, atık kireç ve atık seramik karolar BSK üretimi için kullanılabilirliği değerlendirilen atıklardır.

Türkiye seramik kaplama malzeme ihracatı %24 oranında artış göstermiş ve 2020 yılında son 10 yılın en yüksek ihracat rakamına ulaşmıştır. Dünyada 370 milyon $m^2$ üretim ile %2,3 oranında bir paya sahiptir. Çin, Hindistan, Brezilya, Vietnam, İspanya ve İran' dan sonra seramik kaplama malzemeleri üretiminde dünya sıralamasında 2020 itibariyle yedinci sıraya yerleşmiştir. Türkiye seramik kaplama malzemeleri üretiminin her yıl %4,5 oranında artarak 2025 yılına kadar 461 milyon $m^2$ değerine ulaşması beklenmektedir (TSF, 2022). 2019 yılında başlayan COVİD-19 salgınının dünya ticaretine verdiği zararlara bağlı olarak Türkiye'nin ihracat değerleri %6,9 oranında gerileme yaşamıştır fakat inşaat seramikleri

ihracatı bu gerilemeye rağmen ihracatını artıran az sayıda sektörden biri olmuştur (SGM, 2021).

Çalışma alanının genişliği nedeniyle seramik endüstrisinde hem üretimin farklı aşamalarında hem de kullanıldığı alanların başında gelen inşaat sektöründe oldukça yüksek miktarlarda seramik atık oluşmaktadır. Pişmiş ıskarta karolar depolanması ve imha edilmesi açısından zor atıklar sınıfına girmektedir ve depolanma zorunluluğundan dolayı ayrıca bir maliyet gerektirmektedir.

Seramik atıklarının inşaat sektöründe BSK üretiminde %95 oranında kullanılan geleneksel agregalara alternatif olarak kullanılması doğal kaynakların korunması, atıkların çevreye verdiği zararın azaltılması, yeni beton teknolojilerinin geliştirilmesi ve özellikle son yıllarda ülkemizde en önemli yatırım alanları arasında olan karayolu ulaşımında kullanılması hammadde temininde kolaylık sağlayacaktır.

Bu çalışmada, Eskişehir İnönü bölgesinde bulunan fabrikalardan temin edilen pişmiş yer seramik atıklarının öğütülerek asfalt betonu bileşenlerinden biri olan iri agrega sınıfının 9,5 mm ve 4,75 mm elek üstü doğal agregalar ile %10, %20, %30 ve %40 oranlarında yer değiştirmesinin asfalt betonu performans özelliklerine etkisi, kısmi olarak hammadde yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında Karayolları Genel Müdürlüğü Yollar Fenni Şartnamesi dikkate alınarak agrega karışımı hazırlanmış ve her bir karışım için Marshall Tasarım Deneyi yapılarak dayanım ve akma değerleri elde edilmiş, kontrol numunesi ile karşılaştırılarak mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. OBO belirlenen karışım numuneleri üzerinde statik ve dinamik sünme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca agrega deneyleri yer seramik atıkları için tekrarlanmış ve atıkların agrega yerine kullanılabilirliği, hammadde maliyetinin azaltılması ve çevre açısından faydaları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre karışım içerisinde %20 oranında yer seramik atığı kullanılması uygun bulunmuştur.

# 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Lim vd. (2019) uçucu külün ve seramik karo atıklarının BSK'de kullanılarak geri dönüşümü hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada 12 adet numune; filler agrega, 200 no.lu elekten geçen uçucu kül ve 200 no.lu elekten geçen seramik karo atıkları ile değiştirilmiştir. Daha sonra 60/70 penetrasyona sahip %5,5 oranında bitüm kullanılarak Marshall Tasarım Deneyi ile hazırlanmıştır. Marshall stabilite, akma, özgül ağırlık ve boşluk oranı değerleri kontrol numuneleri ile karşılaştırılmış, uçucu kül ve seramik karo atıklarının filler agrega yerine kullanabileceğine böylelikle atık bertarafının da sağlanabileceği ancak daha ileri çalışmalarla desteklenebileceği sonucuna varmışlardır.

Fatima vd. (2014) seramik atık bertarafı için Marshall Tasarım Deneyi ile 200 no'lu elekten geçen seramik karo atıklarının %3 ve %5 oranında filler agrega yerine kullanılmasının uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Farklı bitüm oranlarına sahip (%4,5-%7) numuneler hazırlayarak her biri için Marshall Stabilitesi, özgül ağırlık, akma ve boşluk oranı değerleri elde edilmiştir. %3 ve %5 seramik atığı içeren numuneler için optimum bitüm oranı sırasıyla %5,57 ve %5,80 olarak hesaplanmış ve kontrol numunelerinden daha fazla bitüm içeriğine ihtiyaç duyduğu saptanmıştır. Marshall stabilite değerlerinin her iki seramik atık oranında da kontrol numunelerinden daha yüksek değerlere ulaştığı, akma değerlerinin ise seramik atık içeren numunelerin akma değerinin daha yüksek çıkmasına rağmen sınır değerler arasında kaldığı görülmüştür. Sonuç olarak asfalt betonunda seramik karo atıklarının kullanılmasının çevreyi korumak amaçlı iyi bir çözüm olduğuna ve seramik atık ile hazırlanan numunelerin gereken koşulları karşıladığına ulaşmışlardır.

Kara ve Karacasu (2017) tarafından fayans atıklarının bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında fayans atıklarının ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında ikamesi ile hazırlanan numunelere Marshall tasarım deneyi, dinamik ve statik sünme deneyleri yapılmıştır. Kullanılan atık miktarı arttıkça optimum bitüm oranı değerlerinin arttığı, Marshall stabilitesinin %5,5 bitüm oranı değerine kadar azaldığı %5 bitüm oranı değerinden sonra ise kontrol numunelerine göre daha yüksek stabilite değerine ulaştığı statik ve dinamik sünme deney sonuçları da göz önüne alındığında kontrol numunesine en yakın değerlerin

%10 fayans atık kullanımında elde edildiği fakat %30 oranına kadar atık kullanımının binder tabakası için, %20 atık oranına kadar aşınma tabakası için şartname değerlerini karşıladığı böylece atık fayansın binder ve aşınma tabakaları için agrega olarak kullanımının KTŞ standartlarına uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Atheer ve Tariq (2021) endüstriyel olarak üretilen seramiğin birden fazla kullanım alanı olması ve her geçen gün üretiminin artması nedeniyle atık miktarının da bu oranda arttığını öne sürerek geri dönüşüm adına seramik atık tozunun 80/100 ve 60/70 penetrasyona sahip bitümlere bitüm ağırlığının %3, %6 ve %9 oranında modifiye edilebilmesi için penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, ince film ısıtma kaybı, tekerlek izi ve yorulma testi yapmışlardır. Çalışmalar sonucunda seramik atık tozunun sürdürülebilirliğin bir parçası olabileceği, bitüm özelliklerini iyileştirdiği ancak seramik atık tozunun modifiye oranı artırıldıkça yorulma direncinin azaldığı ayrıca 60/70 penetrasyona sahip bitümün tekerlek izi direncinin 80/100 penetrasyona sahip bitümden daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.

Atheer (2022) tarafından filler agrega yerine seramik atık tozu kullanılan bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerinin Marshall stabilite, esneklik modülü ve dinamik sünme testleri ile değerlendirilmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Los Angeles tamburunda öğütülen 200 nolu elek altı seramik atık tozu %3, %6 ve %9 oranında asfalt betonu numunelerinde filler agrega yerine kullanılmıştır. Bu numunelerin Marshall stabilite değerinin kontrol numunelerine göre daha yüksek çıktığı ancak %6 oranında seramik atık tozu kullanımının yeterli olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Esneklik modülünde ise kontrol numunelerine göre iyileşmeler olduğu sıcaklık arttıkça esneklik modülünün azaldığı gözlemlenmiştir. Dinamik sünme testinde %6 oranında seramik atık tozu içeren numunelerin kalıcı deformasyona karşı daha dayanıklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Feng vd. (2013) endüstriyel atık malzemelerin karayolu mühendisliğinde oldukça fazla kullanılmasından yola çıkarak bu çalışmada seramik atıkların doğal iri agregalar yerine kullanılmasını değerlendirmişlerdir. 4.75 mm ve 9.5 mm boyutlarında seramik atıklarını asfalt betonuna % 0, %20, %40, %60 ve %80 oranında ikame etmişlerdir. Hazırlanan numunelerin her biri için Marshall stabilitesi, akma, boşluk oranı, bitümle dolu boşluk oranı, özgül ağırlık değerlerini hesaplamışlardır. Çin ve Japonya'da oldukça sık kullanılan tekerlek izi deneyini de yapmışlardır. Numunelerdeki seramik atık oranı arttıkça Marshall stabilite

ve akma değerlerinin önce azalıp daha sonra arttığını, özgül ağırlık değerlerinin azaldığını ve bitümle dolu boşluk oranının arttığını gözlemlemişlerdir. En iyi maliyet performansının elde edilmesi için Feng vd. % 40'tan daha az seramik atık ikamesini önermişlerdir. Ayrıca doğal iri agregalar için % 80'e kadar seramik atık ikamesinin yüksek sıcaklıkta tekerlek izinin, düşük sıcaklıkta çatlama ve neme duyarlılığının iyi bir performans gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Shamsaei vd. (2020) bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerini iyileştirmek ve ömrünü uzatmak için seramik atık tozunun %25, %50, %75 ve %100 oranlarında konvansiyonel kalker filler ile değiştirilmesi konusunda bir çalışmada bulunmuşlardır. Değerlendirmeler için Marshall stabilitesi, nem duyarlılığı ve tekerlek izi deneylerini kullanmışlardır. Marshall stabilite değerinin seramik atık tozu oranı arttıkça arttığı ve %100 seramik atık tozu ikamesinde asfalt betonunun neme karşı direncinin %5 oranında arttığı sonucuna varmışlardır. Kontrol numunelerinde ölçülen tekerlek izi derinliğinin seramik atık tozu içeren numunelerden daha yüksek çıktığını böylece Marshall stabilite değerleri ile paralellik gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Bu durumda seramik atık tozu içeren asfalt betonunun hem kalıcı deformasyona karşı mukavemetinin artacağı hem de çevre ve sürdürülebilirlik açısından fayda sağlayacağı sonucuna ulaşmışlardır.

Muniandy vd. (2019) Malezya'da oluşan seramik atıklarının çevreye verdiği zararın önlenebilmesi ve asfalt betonunun performans özelliklerine etkisini değerlendirmek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Granit agregalar BSK içerisindeki ağırlığına göre %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranında 5 mm'den küçük boyutlardaki seramik atıklar ile değiştirilmiştir. Seramik atıklarının asfalt betonundaki performansını değerlendirmek için Esneklik modülü, Marshall Stabilite, akma, termal iletkenlik ve ısıtma hızı gibi testler yapılmıştır. Seramik atık oranı arttıkça optimum bitüm oranının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca seramik atığının %80'e kadar ikamesinin karışım performansını iyileştirdiği, tüm ikame oranlarında en az 8 kN stabilite değerini sağladığı, en iyi performansı ise %20 oranında seramik atık kullanımında gösterdiği böylece seramik atıklarının BSK için kullanılabileceği ve bu çalışmanın çevre açısından fayda sağlayabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Rashid vd. (2019) ince agrega ile metal döküm endüstrilerinden elde edilen döküm kumu ve seramik endüstrilerinden ayrıca inşaat alanlarından elde edilen seramik karo atıklarının kısmen değiştirilerek elde edilen karışımın özelliklerini değerlendirmek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında dökümhane kumu ve seramik karo atığı içeren karışımlara ait Marshall stabilite, akma, boşluk oranı, bitümle dolu boşluk oranı ve birim ağırlık gibi değerler bulunmuştur. Sonuç olarak dökümhane kumunun BSK için Marshall tasarım kriterlerini karşılaması nedeniyle %30 oranında kullanılması önerilmiş, seramik karo atıklarında ise kullanılan yüzde arttıkça Marshall stabilite değerlerinin arttığı bu nedenle daha yüksek ikame yüzdelerinin kullanılabileceğine ulaşılmıştır.

Lokesh vd. (2018) bitümlü sıcak karışımlarda filler agrega olarak seramik, tuğla ve taş tozu gibi endüstriyel atıkların kullanımının karışım özelliklerine etkisini ve çeşitli oranlarda ikamesi ile Marshall stabilite, optimum bitüm oranı ve indirekt çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması üzerine bir çalışmada bulunmuşlardır. Filler agrega olarak tuğla tozu kullanılarak hazırlanan BSK'ların optimum bitüm oranının, taş ve seramik tozu içeren BSK' lara göre daha fazla olduğu; Marshall stabilite değerlerinin atık seramik tozu kullanılarak üretilen BSK'larda daha yüksek çıktığı ayrıca atık tuğla ve taş tozu içeren BSK'lar ile karşılaştırıldığında neme karşı daha fazla dirence sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Oyedepo (2019) tarafından asfalt betonu üretimi için kullanılan doğal iri ve ince agregaların ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında endüstriyel atık olarak nitelendirilen alüminyum cürufu ve öğütülmüş seramik karolar ile değiştirilmesi üzerine Marshall tasarım deneyi yapılmıştır. Alüminyum cürufu ve öğütülmüş seramik karo kullanılarak üretilen asfalt betonunun orta ve hafif trafik koşullarında ayrıca otopark yapımında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Kumar ve Chad (2022) tarafından asfalt betonu yapımında filler agrega olarak seramik atık tozunun kullanılması ve bu tür endüstriyel atıkların etkin bir şekilde bertaraf edilmesine katkıda bulunmak amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada Marshall stabilite ve akma değerlerinin yanı sıra Hint standartlarına bağlı olarak yoğunluk ve boşluk oranı değerleri de elde edilmiştir. %4, %5, %6 ve %7 oranında seramik atık tozu kullanılarak

üretilen silindirik Marshall numunelerinde stabilitenin %6 seramik tozu ikamesine kadar arttığı asfalt betonu performans özelliklerini iyileştirdiği fakat daha fazla çalışmanın yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Silvestre vd. (2013) bitümlü sıcak karışımlarda doğal agrega yerine geri dönüştürülmüş seramik agregaların kullanılmasının karışım özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Toplam karışımın %5'i oranında atık seramik kumu ve %25 oranında iri agrega olarak atık seramik kullanılmıştır. Marshall tasarım deneyi ile optimum bitüm oranı belirlenmiştir. Atık seramik kullanımının optimum bitüm oranı, boşluk oranı, plastik deformasyona karşı direnç ve dolaylı çekme mukavemetinde artışa neden olduğu, Marshall stabilite ve deformasyon değerlerinde azalma olduğu ancak doğal agregaların kısmi ikamesi olarak seramik atıkların %30 oranında kullanılmasının İspanyol spesifikasyonlarındaki özellikleri karşıladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Öner (2020) tarafından doğal hayat ve çevreyi korumak, mevcut kaynakların tükenmesi nedeniyle atık kullanımını arttırmak ve granit seramik atıkların ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında asfalt betonunda kullanımının soyulma direncine etkisini belirlemek amacıyla Nicholson soyulma testi yapılmıştır. Numuneler incelendiğinde %10 ve %20 oranında seramik atık içeren karışımların kontrol numuneleri ile aynı değere sahip olduğu fakat atık oranı arttıkça soyulma direncinin azaldığı maksimum atık kullanımının çevresel etkisi göz önüne alındığında %20 oranında granit seramik atık kullanımının uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Saygı (2019) tarafından granit yer karosu, sırlı porselen yer karosu ve bu iki atığın karışımı kullanılarak bitümlü sıcak karışım içeriğindeki doğal agrega kullanımına Marshall tasarım deneyi ile farklı bir alternatif oluşturmak böylece seramik atıklarının bertaraf edilmesini sağlamak amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Marshall tasarım deneyi sonuçlarına göre optimum bitüm oranı %5,5 olarak belirlenmiş %40 oranında granit yer karosu, %30 oranında sırlı porselen yer karosu ve %30 oranında granit yer karosu ile sırlı porselen yer karosu karışımının KTŞ aşınma tabakası değerlerine uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Haritonovs vd. (2013) yüksek performansa sahip asfalt betonu elde etmek amacıyla çeşitli atık malzemelerin ince ve iri agregalar yerine kullanılması üzerine çalışma

yapmışlardır. Bu konuda Letonya' da yılda 200 bin ton üretimi yapılan çelik cürufunun atıkları ve dolomit kumu atıkları kullanılmıştır. BSK numuneler üzerinde karışım performans testleri, kalıcı deformasyona karşı tekerlek izi testi ve yorulma direnci testi yapılmıştır. %100 atık ikamesi dışında çelik cürufu ve atık dolomit kumu kullanılan numunelerin geleneksel karışımdan daha yüksek yorulma direncine sahip olduğu ve kalıcı deformasyona karşı daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Wibowo vd. (2021) küspe külünün filler agrega olarak, beton atıklarının iri agrega olarak kullanılmasının Marshall tasarım testi ile asfalt betonu performans özelliklerine etkisini araştırmak üzerine bir çalışma yapmışlardır. Şeker fabrikasından elde edilen şeker kamışı küspe külü filler agrega yerine %5, %10 ve %15 oranında kullanılmış ve kullanılan atık yüzdesi arttıkça Marshall stabilite, boşluk oranı değerlerinin arttığı ayrıca yoğunluk ve akma değerlerinin azaldığı ve bulunan değerlerin 2010 Bina Marga şartname sınırlarını karşıladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Varol (2019) tarafından geri dönüştürülmüş asfalt betonunun bitümlü sıcak karışım numunelerinin stabilite, akma ve indirekt çekme mukavemeti değerleri ele alınarak bitümlü temel tabakasında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Karışımlarda %10, %20, %30, %40 ve %46 oranında geri dönüştürülmüş asfalt betonu kullanılmıştır. Stabilite değerinin %30 atık oranına kadar arttığı, akma miktarının tüm numunelerde atık oranı ile paralel olarak arttığı ve şartname sınırları içerisinde kaldığı, indirekt çekme mukavemeti değerlerinin KTŞ'ye göre minimum değerden yüksek olduğu en yüksek değeri ise %40 atık kullanımında verdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Ogundipe ve Nnochiri (2020) tarafından biyolojik olarak parçalanamayan atıklar içerisinde bulunan camların bertaraf edilmesine katkıda bulunmak ve atık camların asfalt betonu performans özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla filler agrega olarak toplam karışımın %8, %10, %12, %14, %16, %18 ve %20 oranında asfalt betonuna ilavesi Marshall testi ile değerlendirilmiştir. Kullanılan atık cam miktarı arttıkça hava boşluklarının azaldığı, bitümle dolu boşluk oranı ve akma değerinin arttığı, Marshall stabilite değerinin %18 ikame oranına kadar arttığı ancak stabilite değerinin geleneksel asfalt betonuna göre daha düşük olduğu ve karışım için %8 oranında atık cam kullanımının uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tagbor vd. (2022) tarafından sürdürülebilirlik açısından asfalt betonunda hurma çekirdeği kabuklarının ve plastik atıkların kullanımının etkisini ve kullanım potansiyelini araştırmak için Marshall tasarım deneyi yapılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan plastik atık miktarı %1 ile sınırlı tutulmuş hurma çekirdeği kabuğu ise %10 ve %20 oranlarında karışımda kullanılmış ayrıca hem %1 plastik atık hem de %20 hurma çekirdeği kabuğu içeren numuneler hazırlanmıştır. Sadece %1 oranında plastik atık içeren numunelerin Marshall değerlerinin kontrol numunesi ile paralel değerler gösterdiği, %10 ve %20 oranında hurma çekirdeği kabuğu içeren numunelerin Marshall stabilite değerlerinin azaldığı, su emme miktarının ve akma değerlerinin arttığı, iki atığın birlikte kullanıldığı numunelerin sadece hurma çekirdeği kabuğu içeren numunelere göre daha iyi performans gösterdiği, karışım içeriğinde doğal agregaların kısmen ikamesi olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Arabani ve Mirabdolazimi (2011) tarafından atık demir tozlarının asfalt betonu yorulma davranışı üzerine etkisini dinamik yükler altında incelemek adına bir model oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında dolaylı çekme deneyi yapılmış ve atık demir tozu kullanılan numunelerde çekme dayanımının arttığı, yorulma ömrünün uzadığı ancak deney sıcaklığı arttıkça numunelerin yorulma davranışının olumsuz yönde etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Jegatheesan vd. (2017) bitümlü sıcak karışım içeriğinde bulunan agregalara alternatif oluşturmak amacıyla 1.18 mm boyutlarında ve toplam agrega ağırlığının %1.77, %2.73, %3.75'i oranlarında talaş külü; bitüm ağırlığının %5, %10, %15'i oranlarında PET kullanılmasının asfalt betonu performans özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bitüm modifiyesi olarak PET kullanılmasının Marshall stabilite değerini ve optimum bitüm oranını arttırdığı, talaş külünün tüm oranlarda Marshall stabilite değerlerinin kontrol numunelerine göre daha düşük olduğu ayrıca PET ve talaş külünün birlikte kullanıldığı karışımlarda Marshall stabilite değerlerinin kontrol değerlerinden daha düşük olduğu ancak uygun maliyetli bir yöntem olarak trafik yoğunluğu az olan yollarda kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Shuaibu vd. Portland (2020) çimentosu ve Gine mısır kabuğu külü ile elde edilen karışımın BSK içeriğinde %5'lik artışlarla %45 ikame oranına kadar dolgu malzemesi olarak kullanılmasının karışım özelliklerine etkisini Marshall tasarım deneyi ile test etmişlerdir. Esnek üst yapılarda BSK'lar için Nijerya Genel Şartnamesi dikkate alınarak yapılan çalışmalarda %20 oranına kadar Marshall Stabilite değerlerinin arttığı %20'den sonra ani bir düşüşe yol açtığı ve hacimsel özelliklerinin BSK için öngörülen özellikleri karşıladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Sargın vd. (2013) pirinç kabuğu külünün sıcak karışım asfalt betonu için filler agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Düzce bölgesinden temin edilen pirinç kabukları 700 °C'de yakılarak pirinç kabuğu külü elde edilmiş ve daha sonra soğumaya bırakılmıştır. Filler agreganın %25, %50, %75 ve %100 oranında pirinç kabuğu külü değiştirilmesi ile Marshall Tasarım Deneyi yapılmış ve stabilite değerleri karşılaştırılarak optimum pirinç kabuğu külü oranı belirlenmiştir. Karışım ağırlığının %5'i oranında kullanılan filler agreganın %50 oranında pirinç kabuğu külü ile değiştirilmesinin en yüksek stabilite değerini verdiği ve özellikle çevre açısından pirinç kabuğu atıklarının yaygın olduğu bölgelerde asfalt betonunda filler agrega yerine kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Modarres ve Rahmanzadeh (2014) asfalt betonu performans özelliklerine kömür atık tozunun etkisini araştırmak için bir çalışma yapmışlardır. Kömür atık tozu filler agrega yerine %25, %50, %75 ve %100 oranında kullanılarak hazırlanan karışımlara ve filler agrega yerine %100 oranında kömür atığı külü kullanılarak hazırlanan karışıma Marshall tasarım deneyi, dolaylı çekme dayanımı ve esneklik modülü testleri yapılmıştır. Asfalt betonu stabilite değerlerinin kömür atık tozu kullanılan numunelerde arttığı, referans karışıma göre nem direnci indekslerinin ve esneklik modülünün daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kömür atığı külü kullanılan numunelerde diğer numunelerin tamamından daha yüksek stabilite değerleri ortaya çıkmıştır ancak kömür atığı külünün yakılması yüksek maliyet çıkaracağı ve çevre kirliliğine yol açacağı için asfalt betonunda filler agrega yerine kömür atık tozunun %50 oranında kullanılmasının daha uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Sung Do vd. (2008) mineral dolgu maddesi ve %25, %50, %75, %100 oranlarında geri dönüştürülmüş atık kireç kullanılarak üretilen asfalt betonunun farklı sıcaklıklarda Marshall kararlığı, yorulma direnci, esneklik modülü ve dolaylı çekme dayanımı gibi

mühendislik özelliklerini değerlendirmek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Atık kireç oranı arttıkça yorulma direnci ve dinamik stabilite değerinin arttığı bu nedenle tekerlek izi direncini iyileştirdiği, düşük sıcaklıklarda çekme dayanımı değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiş ve atık kirecin düşük sıcaklıklarda asfalt betonunun çatlamasına karşı kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sugiyanto (2017) tarafından hurdaya çıkarılan lastik kauçuğun hem hammadde teminini kolaylaştırmak hem de atıkların çevreye verdiği zararları azaltmak amacıyla asfalt betonunda %50 ve %100 oranında ince agrega ikamesi olarak kullanılması ile elde edilen Marshall test sonuçlarının kontrol değerleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmesi adına bir çalışma yapılmıştır. Çalışma sonucunda standart karışımın boşluk oranı, akma ve stabilite değerlerinin hurda lastik kauçuk kullanılan karışımdan daha yüksek olduğu, %100 oranında hurda lastik kauçuk kullanılan karışımın standart karışım değerlerine daha yakın sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

# 3. KARAYOLU ALTYAPI VE ÜSTYAPI ÖZELLİKLERİ

Karayolu, motorlu taşıtların istenilen hızda, güven ve konfor alanı içerisinde ulaşımını sağlamak amacıyla önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak doğal zemin tabakasının belirli bir güzergah boyunca istenilen yüksekliklere getirilmesi ile oluşturulmuş kamuya açık arazi şeridi̇dir. Karayolu altyapı ve üstyapı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Ilıcalı, 1988).

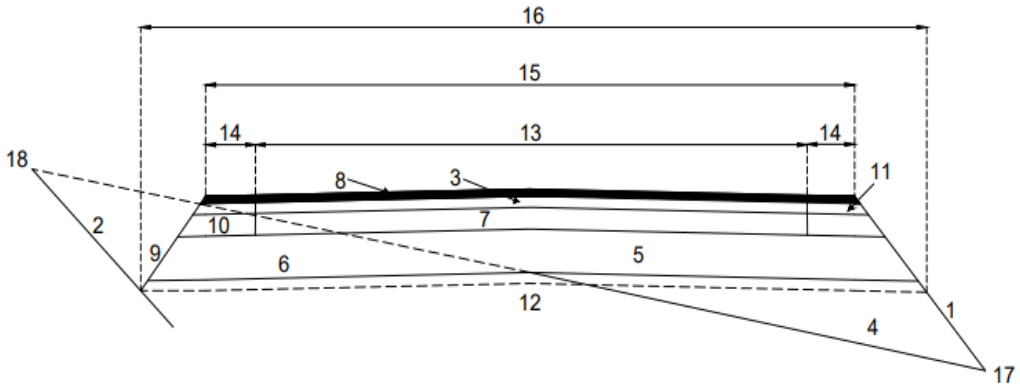
## 3.1. Karayolu Altyapısı

Altyapı, doğal zemin ile tesviye sathı arasında kalan alana denir. Altyapı için tek bir kot oluşturmak amacıyla tesviye yapılır. Altyapı trafik yükleri, su ve don etkilerine dayanıklı bir şekilde zemin özellikleri çok iyi incelenerek istenilen kotta düzgün satıh sağlamak ve üstyapı tarafından iletilen yükleri geniş bir alana yaymak amacıyla yapılmaktadır. Tünel, viyadük, köprü, menfez ve drenaj tesisleri gibi sanat yapıları da altyapıya dahildir (Ilıcalı vd., 2001).

## 3.2. Karayolu Üstyapısı

Trafik yüklerini taşımak, bu yükleri taban zemini taşıma kapasitesini aşmadan taban zemini üzerine dağıtmak, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacıyla alt temel, temel ve kaplama olmak üzere üç tabakadan oluşan yapıya Karayolu Üstyapısı adı verilir (Yayla, 2004).

Rijit (beton yol), yarı rijit ve esnek üstyapı (asfalt) olmak üzere üç çeşit üstyapı türü bulunmaktadır. Taban zemini, çevre koşulları, trafik yükleri ve ekonomik şartlara bağlı olarak güvenilir, rahat, emniyetli ve kolay geçiş sağlamak amacıyla en uygun olanı seçilerek projeye başlanmaktadır (Karacasu ve Bilgiç, 2009). Yol üstyapı en kesiti aşağıda Şekil 3.1'de verilmiştir.




**Şekil 3.1** Karayolu üstyapı enkesiti (KTŞ, 2013)

1. Dolgu şevi
2. Yarma şevi
3. Kaplama tabakası
4. Doğal zemin çizgisi
5. Alt temel tabakası
6. Tesviye yüzeyi
7. Temel tabakası
8. Kaplama yüzeyi
9. Hendek şevi
10. Banket temeli
11. Banket
12. Yol gövdesi taban zemini
13. Trafik şeritleri genişliği
14. Banket genişliği
15. Yol (Platform) genişliği
16. Üstyapı tabanı genişliği
17. Etek noktası
18. Kret noktası

### 3.2.1 Rijit üstyapılar

Rijit üstyapılar elastisite teorisine dayandırılarak temel tabakası üzerine yapılan beton plaklardan oluşmaktadır. Üzerine gelen yükleri geniş bir alana yaymaya çalışır. Yükler taban zeminine iletilirken beton yollar elastik zemine oturan bir kiriş olarak çalışmaktadır (Özey, 1992). Donatı kabul eden tek üstyapı tipi olarak kabul edilmektedir (Ecevit, 2007) . Bu üstyapının performans özellikleri beton plaklar, beton dayanım değerleri, alt temel tabakası, temel tabakası ve bu tabakalarda kullanılan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Trafik hacmi, yıllık trafik artış oranı ve oluşacak trafikteki ağır taşıt miktarı fazla olan bölgelerde beton yollar tercih edilmektedir (Tanyıldızı ve Geçkil, 2019).

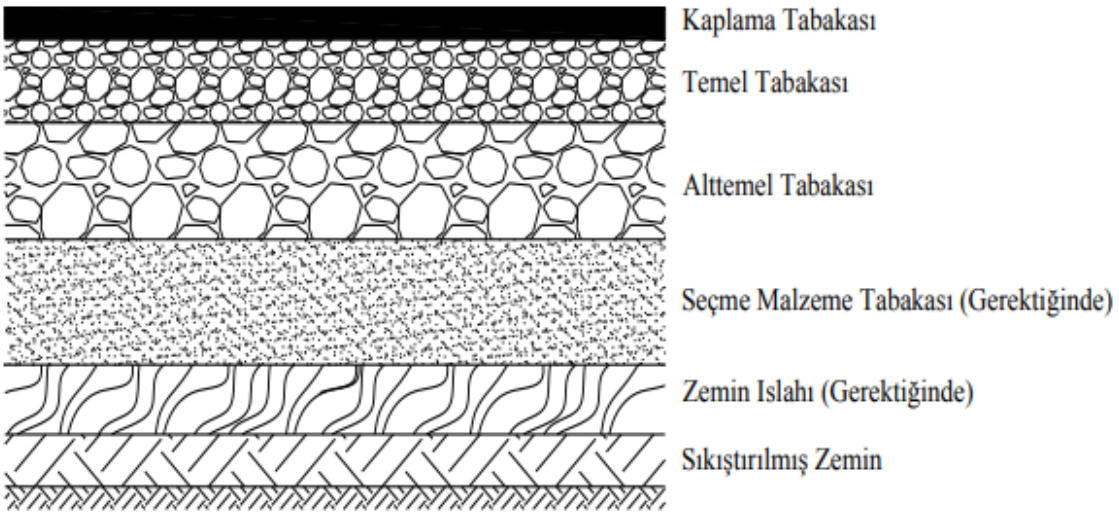
### 3.2.2 Yarı rijit üstyapılar

Granüler temel veya alt temel yerine çimento bağlayıcılı granüler temel veya stabilitesi çimento ile yapılmış alt temel kullanılan ve bu özelliği ile esnek üst yapılardan ayrılan üstyapı türüdür. Bu tabakaların üzerine sırasıyla bitümlü temel, binder ve aşınma tabakaları serilir. Türkiye' de trafik yükünün çok olduğu devlet yolları ve otoyollarda yarı rijit üstyapılar tercih edilmektedir (Önal ve Kahramangil, 1993).

### 3.2.3 Esnek üstyapılar

Bitümlü kaplama tabakaları ile oluşan, tesviye sathı ile iyi bir yüzeysel temas sağlayan üzerine gelen trafik yüklerini kaplama, temel ve alt temel yoluyla taban zeminine ileten ülkemizde kullanımı yaygın olan üstyapı türüdür (Ilıcalı vd., 2001).

Üstyapılarda performans özelliklerini belirleyen kaplama stabilitesi adezyon, kohezyon ve dane sürtünmesi gibi değerlere kullanılan agreganın ve bitümün özelliklerine bağlıdır. Konforlu sürüş için düzgün yüzeye ve emniyet için yeterli kayma direncine sahip, çevre ve iklim şartlarına dayanıklı, yüklerin taşıma gücünü aşmadan yayılabilmesi için yeterli kalınlık ve mukavemete sahip olmalıdır (Tunç, 2007).




**Şekil 3.2** Esnek üstyapı tabakaları (Er, 2011)

### 3.2.3.1 Alt temel tabakası

Üstyapı temel tabakasını taşımak üzere taban zemini üzerine yerleştirilmiştir. Alt temel tabakası ince parçacıkların taban tabakasına nüfuz etmesini önleyen, su ve don olaylarına karşı tampon bölge görevi gören, bitümlü tabakanın inşası için çalışma platformu oluşturmak amacıyla yapılan belirli fiziksel özelliklere sahip granüler malzemeden oluşmuştur (Öztürk ve Komut, 2021). Çevresel ve ekonomik faktörler göz önüne alındığında cüruf, moloz ve inşaat atıklarının alt temel tabakası için kullanımı elverişlidir (Kara, 2012).

### 3.2.3.2 Temel tabakası

Alt temel ve kaplama tabakası arasına inşa edilen temel tabakası bağlayıcı olmadan ya da yüksek stabiliteye sahip olması istenen bölgelerde bitüm veya çimento ile işlem görmüş fiziksel özellikleri alt temel tabakasına göre daha iyi olan belirli gronülometrideki malzeme ile oluşturulan bir veya birden fazla tabakadan oluşur (Ilıcalı vd., 2001). Stabilizasyonda amaç taşıma gücü az olan, su tutma kapasitesi fazla olan zeminlerin geçirimsiz ve daha dayanıklı hale getirilmesidir (Fındık, 2005). Temel tabakası kaplama tabakasına destek olacak şekilde taşıtlardan meydana gelen gerilmeleri taban zemininin taşıma gücü sınırları içerisinde yaymakla ve kaplamalar için gerekli stabilite ve yeterli drenajı sağlamakla yükümlüdür.

Karayollarında üç çeşit temel kullanılmaktadır:

**Granüler Temel (GT):** Minimum granüler temel kalınlığı 15 cm olan, iyi derecelendirilmiş gradasyona sahip çakıl, kırmataş, kırılmış cüruf gibi malzemelerden oluşan temel çeşididir (Saygı, 2019).

**Plent- Miks Temel (PMT):** İyi derecelendirilmiş gronülometriye sahip agreganın plentte optimum su içeriğinde karıştırılması ve yola serilip sıkıştırılması ile elde edilir.(Seren, 2015)

**Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT):** İyi derecelendirilmiş gronülometriye sahip agreganın plentte belirli oranlarda çimento ve su ile karıştırılması ve yola serildikten sonra sıkıştırılması ile oluşmaktadır. Özellikle trafik yükünün fazla olduğu yollarda yüksek stabiliteye sahip temel olarak kullanılmaktadır (Seren, 2015).

### 3.2.3.3 Kaplama tabakası

Kaplama tabakası; trafik yüklerine doğrudan maruz kalan, bu yükler nedeniyle oluşan basma ve çekme gerilmelerine karşı koyan, taşıtlara sürüş konforu ve emniyetli bir yüzey sağlayan esnek üstyapının en üst tabakasıdır. Çevre ve iklim koşullarından meydana gelebilecek her türlü deformasyona ve trafik yüklerinden oluşacak gerilmelere karşı koyabilmesi için elastisite ve stabilite değerlerinin esnek üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek olması gerekmektedir (Er, 2011). Kaplama tabakası binder tabakası altta aşınma tabakası binder tabakasının üstünde olacak şekilde iki bölümden oluşur. Kaplama tabakasının kalın yapılması gereken durumlarda maliyeti azaltmak ve sıkıştırmada kolaylık oluşturmak amacıyla aşınma tabakasına göre daha iri malzeme kullanılarak binder tabakası oluşturulur. Aşınma tabakası ise yeterli pürüzlülüğün ve su geçirimliliğinin sağlanması için daha kaliteli malzemelerden yapılan tabakadır (Varol, 2019).

**Sathi ( Yüzeysel ) Kaplamalar:** Yol yüzeyine ince bir şekilde asfalt veya katran serildikten sonra üzerine agrega dökülür ve bir silindir vasıtasıyla sıkıştırma işlemi yapılır. Sathi kaplamalar ekonomiklik ve imalat hızı gibi nedenlerle ülkemizde en yaygın kullanılan

kaplama tipi olmuştur (Tutan ve Komut, 2020). Sathi kaplama bir temel tabakası üzerine trafik yoğunluğu dikkate alınarak tek veya çift kat şeklinde yapılabilir ancak bu kaplama türü hava sıcaklığının fazla olduğu ve kış mevsiminde tuzlama gerektirecek bölgelerde iyi dayanım göstermeyeceği için tercih edilmemektedir (Saygı, 2019).

**Asfalt Betonu Kaplamalar:** Uygun sıcaklık ve nem ortamında agrega, bitüm ve filler malzemenin sabit karıştırma tesislerinde bir araya getirilmesi ile oluşturulur (Kara, 2012). Asfalt betonu mukavemet ve stabilitesini agrega kenetlenmesinden ve agrega, bitüm ve filler malzemeden oluşan harcın özelliklerinden sağlamaktadır (Al-Ali, 2016). Asfalt betonu bitümlü sıcak karışım ve bitümlü soğuk karışımlar olmak üzere iki grupta incelenir. Bu iki gruptan yaygın olanı bitümlü sıcak karışımlardır. Yüksek standartlı yollarda bitümlü temel tabakası, aşınma ve binder tabakalarında kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar çok fazla yüke maruz kaldıkları için kalıcı deformasyona uğramadan yükleri alt tabakalara emniyetle iletmeli ve esneklikleri nedeniyle geçici deformasyon yapabilmelidir (Er, 2011).

BSK kaplamaların sahip olması gereken özellikler:

- **Stabilite:** Taşıtların oluşturmuş olduğu dinamik, statik yüklere ve tekerleklerden oluşan çekme, basınç, kesme kuvveti ve sökülmeye karşı kaplamanın göstermiş olduğu mukavemete denir. Stabilitenin çatlamalara neden olmadan trafik yüklerini karşılaması nedeniyle stabilite projelendirilmede dikkate alınan en önemli parametredir. Yolda görülebilecek en yüksek sıcaklık değeri dikkate alınarak belirlenmektedir (Sümen, 2022).

- **Dayanıklılık:** Çevre koşulları sonucu oluşabilecek değişime karşı gösterdiği mukavemete başka bir deyişle aşınma, soyulma, kabarmaya karşı sahip olduğu dirence denilmektedir. Kaplamanın yüksek dayanıklılığa sahip olabilmesi, bitüm oranının fazla olması bu yol ile geçirimsizliğin sağlanması ve soyulmaya karşı yüksek dirence sahip olan agregaların kullanılması ile mümkündür (Kara, 2012).

- **Geçirimsizlik:** Karışımın içerisindeki hava boşlukları ile ilgili olup karışımın hava ve su girişine karşı gösterdiği dirence denir (Üstünkol, 2006).

- **İşlenebilirlik:** Agrega boyutu, şekli, yüzey dokusu, gradasyonu ve bitüm viskozitesi gibi özellikler nedeniyle değişkenlik gösterebilen karıştırılması, serilmesi ve sıkıştırılması sırasında kolaylık oluşturan özelliktir.

- **Esneklik:** Taban zemininde meydana gelen çökmelere, oturmalara ve yol gövdesinde meydana gelebilecek çatlamalara karşı koyabilme yeteneğine denir. Bitüm oranı ve filler miktarı esnekliği etkilemektedir. Sıcak hava koşullarında kıvamını koruyacak ve soğuk hava koşullarında kırılmayacak BSK üretimleri yapılmalıdır (Karabel, 2017).

- **Kayma Direnci:** Taşıtların frenleme sırasında güvenle durabilmesi için teker ve yüzey arasında oluşan gerekli sürtünme kuvvetidir. Kayma direnci agregalar arası içsel sürtünme, bitüm kohezyonu, açık ve kaba gradasyonlu karışım ile artmaktadır (Al-Ali, 2016). Sıcaklık, çevre olayları, uygulama hatalarından dolayı kaplamanın yüzeye çıkması ve bitüm ağırlıklı bir tabakanın oluşmasına kusma adı verilmektedir. Kusma olayı kayma direncinin düşmesine neden olan faktörlerden biridir (Kuloğlu, 2004).

# 4. SERAMİK KARO ÜRETİMİ VE ATIKLARI

## 4.1 Seramik

Bir veya birden fazla metalin, metal olmayan elementler ile bileşik oluşturması sonucu ortaya çıkan inorganik bileşiklere seramik adı verilir. Seramikler geleneksel ve ileri teknoloji seramikler olarak iki ana gruba ayrılır (Akkurt vd., 2019). Geleneksel seramikler ise kullanım alanlarına göre yer-duvar karoları, sağlık gereçleri, sofra eşyaları, yapı gereçleri, refrakterler, cam, sır ve emaye olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Üretiminde genel olarak kullanılan üç bileşen vardır bunlar; kil, feldspat ve kuvarstır. Kil mukavemeti sağlayan kuvars ise iskeleti oluşturan maddedir (Kilerci, 2002).

## 4.2 Seramik Karo Üretimi

Seramik sektörü 1960'lı yıllardan itibaren yapı sektörünün gelişmesi ile birlikte kullanım alanını arttırarak dünyada özellikle gelişmiş ülkelerde hızla büyüyerek önemli bir hacme ulaşmıştır. Seramik sektörü alanlarından biri olan seramik kaplama malzemeleri duvar ve yer karosu olarak sınıflandırılan seramikten yapılmış plakalardır. İnşaat sektörünün etkisi ile oldukça fazla kullanım alanına sahip olması 1990'lı yıllarda seramik karo üretiminin rekabet ortamının gözle görülür derecede yükselmesine seramik firmalarının uluslararası pazarda ilk sıralarda yer almaya yönelik çalışmalarına yol açmıştır (Savaş, 2022). Günümüzde seramik karo pazar büyüklüğünün 2027 yılına kadar yıllık %6,7'lik bileşik büyüme oranı ile 2027 yılında 582,68 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir. Türk seramik sanayi bugün ülkemizin önde gelen sektörlerinden ve dünya pazarında rekabet gücümüzün en yüksek olduğu alanlardan biri olmanın yanı sıra Türkiye seramik kaplama malzeme üretimi açısından değerlendirildiğinde dünyada altıncı sırada yer almaktadır (SGM, 2021). Çizelge 4.1'de dünyada seramik karo üretiminde yer alan ilk on ülke, üretim miktarları ve dünya üretimindeki payları verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Seramik karo üretiminde yer alan ilk on ülke (Baraldi, 2022)

| Ülke | 2017 milyon $m^2$ | 2018 milyon $m^2$ | 2019 milyon $m^2$ | 2020 milyon $m^2$ | 2021 milyon $m^2$ | Dünya Üretim Payı | 20-21 Yılları Arası Değişim |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.Çin | 10.146 | 9.011 | 8.225 | 8.474 | 8.863 | 48.3 % | 4.6 % |
| 2.Hindistan | 1.897 | 2.011 | 2.223 | 2.318 | 2.550 | 13.9 % | 10.0 % |
| 3.Brezilya | 867 | 872 | 909 | 840 | 1.049 | 5.7 % | 24.9 % |
| 4.İspanya | 530 | 530 | 510 | 488 | 587 | 3.2 % | 20.3 % |
| 5.İran | 373 | 383 | 398 | 449 | 458 | 2.5 % | 2.0 % |
| **6.Türkiye** | **355** | **335** | **296** | **370** | **438** | **2.4 %** | **18.4 %** |
| 7.İtalya | 422 | 416 | 401 | 344 | 435 | 2.4 % | 26.5 % |
| 8.Endonezya | 307 | 383 | 347 | 304 | 410 | 2.2 % | 34.9 % |
| 9.Vietnam | 560 | 602 | 560 | 534 | 370 | 2.0 % | -30,7 % |
| 10.Mısır | 300 | 300 | 300 | 285 | 310 | 1.7 % | 8.8 % |
| Toplam | 15.757 | 14.843 | 14.169 | 14.406 | 15.470 | 84.4 % | 7.4 % |

Seramik kaplama sanayisi inşaat seramikleri içindeki en büyük iki gruptan biri olup Çizelge 4.1'de dünya sıralamasındaki yeri göz önüne alındığında Türkiye'nin geleneksel üreticisi olduğu inşaat malzeme sanayilerinin başında geldiği görülmektedir. Türkiye içerisindeki üretimi yıllar içinde kademeli bir artış göstermiş ve üretime paralel olarak 2022 yılında seramik kaplama malzemeleri ihracatı değer olarak yüzde 28,5 artarak 581 milyon dolara yükselmiştir (TSF Dergisi, 2022). Seramik kaplama malzeme üretimi ülkemizde Eskişehir-Bilecik-Kütahya başta olmak üzere bölgelere ayrılmıştır. Seramik kaplama malzeme üreticilerinin bulundukları bölgelere göre tesis dağılımı;

%49,82'si Eskişehir-Bilecik-Kütahya bölgesi,

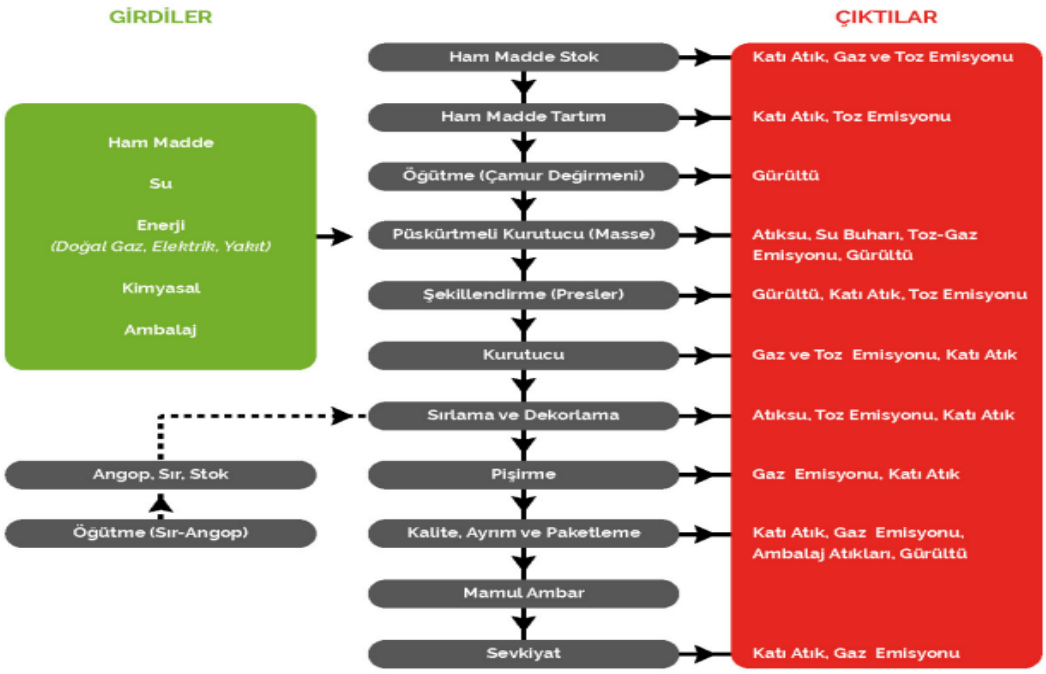
%28,61'i İzmir-Manisa-Uşak-Aydın bölgesi,

%14,61'i Çanakkale,

%6,96'sı Çankırı-Yozgat şeklindedir. (SGM, Sektörel Raporlar ve Analizler Serisi, 2021)

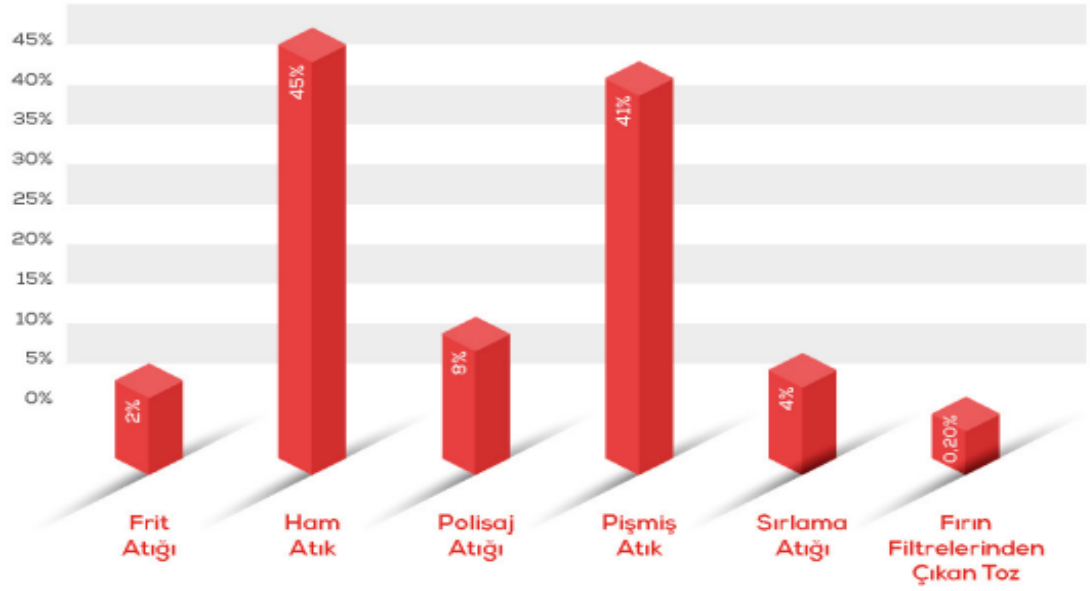
### 4.3. Seramik Yer Karosu Üretimi ve Oluşan Atıklar

Yer karosu üretiminde 1970'li yıllardan itibaren yavaş pişirimden hızlı pişirime geçilmiştir. Yer karoları 1180-1210 ℃ gibi yüksek sıcaklıklarda 28-45 dakikada rulolu fırınlarda tek pişirime tabi tutulmaktadır (Kayacı, 2006). Mekanik mukavemetleri ve yük taşıma kapasiteleri oldukça yüksektir. İstenildiği takdirde duvar kaplamasında da kullanılabilir ancak duvar karosuna göre daha ağırdır. İçeriğinde kil esaslı hammaddeler, kuvars, feldspat ve feldispatik kumlar gibi tamamlayıcı malzemeler kullanılmaktadır. Yüzeyinde bulunan sırlar nedeniyle aşınmaya ve çizilmeye karşı dayanıklıdır. Yer karosu üretim aşamaları Şekil 4.1'de gösterilmektedir (STB, 2018).




**Şekil 4.1** Yer karosu üretimi akım şeması (STB, 2018)

Seramik karo sektöründe üretimde kurutma, sırlama ve pişirme gibi farklı aşamalarda meydana gelen kırıklardan, çatlaklardan veya düşük standartta üretimden kaynaklanan çok miktarda atık malzeme ortaya çıkmaktadır (Ardahanlı, 2020). Bazı karo üretici firmalar ortaya çıkan atıkları %80 oranında seramik karo üretimine dahil ederek aynı kalitede ürünler elde edilebilmektedir (STB, 2018). Üretim aşamasında ve sonrasında oluşan seramik karo atıklarının yüzdesel dağılımı Şekil 4.2'de verilmiştir.




**Şekil 4.2.** Seramik karo üretiminde açığa çıkan atıklar (Rambaldi vd., 2018)

Bu çalışmada asfalt betonunun hem ekonomik olması hem de asfalt betonu performans özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla ülkemizde %49,8 üretim oranı ile seramik karo üretiminde ilk sırada yer alan Eskişehir-Bilecik-Kütahya bölgesinde bulunan Eskişehir SERANİT/İNÖNÜ fabrikasından temin edilen pişmiş yer karosu atıkları kullanılmıştır. Sadece bu bölgede ayda ortalama 200 ton pişmiş yer karosu atığı oluşmaktadır. Şekil 4.3'te İnönü fabrikasının farklı bölümlerinde ve stok sahalarında bulunan pişmiş yer karosu atıklarına ait görüntüler verilmiştir.



**Şekil 4.3** Seranit/ İnönü fabrikasında bulunan pişmiş yer seramik ve sırlı porselen kırık kazanları

Fabrikada sırlama bantları, fırınlar ve kalite ayrım gibi bölümlerde bulunan kırık kazanlarındaki pişmiş karolar yığın halinde hammadde stok sahalarında toplanmaktadır.

### 4.4. Tez Kapsamında Kullanılan Yer Seramik Atıklarının Özellikleri



**Şekil 4.4.** Tez kapsamında kullanılan öğütülmüş yer seramik atıkları

**Çizelge 4.2.** Yer seramik atıkları XRF analiz sonuçları

| **Oksitler** | **Değer(%)** |
|---|---|
| MgO | 0,54 |
| $Al_2O_3$ | 17,75 |
| $SiO_2$ | 68,37 |
| $P_2O_5$ | 0,13 |
| $SO_3$ | 0,09 |
| $K_2O$ | 2,38 |
| CaO | 0,65 |
| $TiO_2$ | 0,46 |
| $Fe_2O_3$ | 2,01 |
| $Na_2O$ | 3,99 |
| MnO | 0,05 |
| A.Z. | 3,56 |

# 5. MATERYAL VE YÖNTEM

## 5.1. Agrega

Agregalar asfalt betonuna yük taşıma kapasitesi sağlayan, asfalt betonu performansını dane boyutu, dane şekli, yüzey dokusu gibi fiziksel özellikleri nedeniyle doğrudan etkileyen, yol yapımında kullanılan ana malzemelerden birisidir. Agregalar elde ediliş biçimine ve dane boyutlarına göre sınıflandırılmaktadır (Er, 2011).

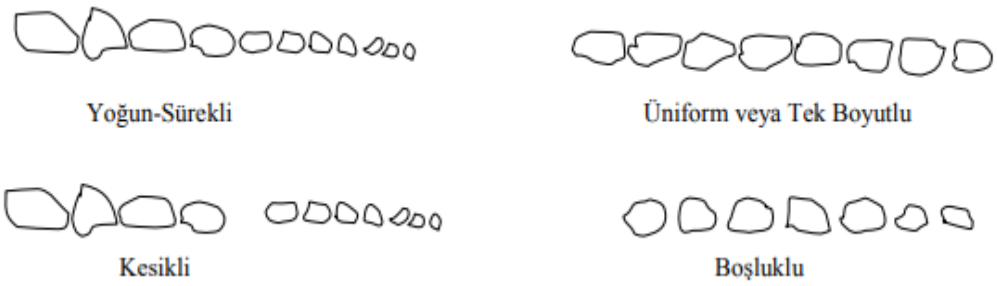
- Elde Ediliş Biçimine Göre Sınıflandırma: Doğal ve yapay agregalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğal agregalar deniz, nehir, göl ve taş ocaklarından elde edilen kırılmış veya kırılmamış agregalardır. Yapay agregalar ise yüksek fırın cüruf taşı, yüksek fırın cüruf kumu gibi sanayi ürünü agregaları kapsamaktadır.
- Dane Boyutuna Göre Sınıflandırma: İri agrega, ince agrega ve filler olmak üzere üç grupta incelenir. İri agrega 4,75 mm'lik elek (4 No.lu) üzerinde kalan malzemeyi, ince agrega 4,75 mm elekten geçen 200 No.lu yani 0,075 mm'lik elek üzerinde kalan malzemeyi filler (taşunu) ise 0,075 mm elek altına geçen malzemeyi ifade etmektedir.

### 5.1.1. Asfalt Betonunda Kullanılan Agregaların Özellikleri

#### 5.1.1.1. Gradasyon

Gradasyon agrega karışımını oluşturan tanelerin boyutlarına göre dağılımını ifade etmektedir. Yol yapısını oluşturan her bir tabakanın mukavemeti ve görevi farklıdır bu nedenle her tabaka için agrega gradasyonu farklı olmalıdır (Yelken, 2009). Karayolları Teknik Şartnamesi gradasyon limitleri göz önüne alınarak çalışmanın bu sınırlar içerisinde kalması sağlanır. Dane boyutu arttıkça işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşır, boşluk miktarı azalır ve segregasyon artar. Agrega danelerinin toplam yüzeyi azalır, yoğunluk ve stabilite artar, bitüm ihtiyacı azalır. Agregalar gradasyon yönünden aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (Tunç, 2004) :

- Yoğun-Sürekli Gradasyon: İyi derecelendirilmiş gradasyon olarak da ifade edilir. En kaba malzemeden en ince malzemeye kadar boşluklar doldurularak en uygun oranda oluşturulan karışımdır.
- Boşluklu-Sürekli Gradasyon: İçeriğinde ince agrega olmaması nedeniyle karışım boşluk oranı yüksektir. Drenaj, filtre vb. amaçlar için dona duyarsız tabakalar için kullanılmaktadır.
- Kesikli Gradasyon: Belirli aralıklardaki dane çaplarını içeriğinde barındırmaz bu nedenle boşluk oranı fazladır. Yol inşaatlarında genel olarak kullanılmamaktadır.
- Üniform veya Tek Boyutlu Gradasyon: Aynı boyuta sahip agregalardan oluşmaktadır. Sathi kaplama gibi düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır.




**Şekil 5.1** Agrega gradasyon dağılımı (Tunç, 2004)

### 5.1.1.2 Porozite

Agrega danelerinin su emme yeteneğine sahip boşluklarının miktarına porozite adı verilmektedir. Yeterli poroziteye sahip agregalarda bitümün emilimi kolay olacağından bitüm ve agrega arasındaki adezyon güçlü olacaktır. Böylece stabilite artacak, su nedeniyle oluşacak soyulmalar azalacaktır. Ancak aşırı poroz agregalar kullanılacak bitüm oranını artırmaktadır ve sıcak günlerde kusmalara neden olmaktadır (Yelken, 2009).

#### 5.1.1.3 Dane şekli ve biçimi

Agrega dayanımı kaplama kalitesini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Agrega dayanımını agrega şekli ve yapısı etkilemektedir. Agrega açısal kenara ve kübik bir yapıya sahip ise asfalt betonu içerisinde kenetlenme özelliği yuvarlak ve düz kenara sahip agregaya göre daha fazladır. Bu nedenle yükten daha çok etkilenecek üst tabakalarda kırmataş kullanılması şartı vardır (Tunç, 2004).

#### 5.1.1.4. Yüzey yapısı

Yüzey yapısı agreganın pürüzlülük veya cilalılık durumu ile nitelendirilen özelliğidir. Cilalı agregalar asfalt betonuna tutunamayacağı ve istenen kayma direncini gösteremeyeceği nedeniyle yol yapımında kullanılmamaktadır. Pürüzlü agregalar ise kayma direncini, içsel sürtünme açısını ve adezyon kuvvetini artırmaktadır (Yelken, 2009).

### 5.2. Agrega Deneyleri

Agregaların yol yapımında kullanılabilmesi için özenle seçilmiş numunelere agreganın fiziksel özelliklerini belirleyecek kalite kontrol deneylerinin yapılmış olması ve deney sonuçlarının şartname sınırları içerisinde kalması istenmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan agregalara aşağıda verilen deneyler yapılmıştır.

1. Elek Analizi (Dane Dağılımı) Deneyi
2. Aşınma Kaybı Deneyi (Los Angeles Deneyi)
3. İri Agrega Özgül Ağırlık Deneyi
4. İnce Agrega Özgül Ağırlık Deneyi
5. Filler Agrega Özgül Ağırlık Deneyi
6. Birim Hacim Ağırlık Deneyi
7. Su Emme Deneyi
8. Yassılık İndeksi Deneyi
9. Donma-Çözülme Deneyi

### 5.2.1. Elek Analizi (Dane Dağılımı) Deneyi

Standart elekler ile agrega dane boyutu dağılımını belirmek amacıyla yapılan deneydir. Eleklerden geçen agreganın toplam agrega miktarına oranı yüzde olarak hesaplanır.

#### 5.2.1.1. <u>Kullanılan deney aletleri</u>

- **Elekler:** En üstte bir kapak ve en altta elek altı bulunacak şekilde BSK'lar için 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, 2,0 mm, 0,425 mm, 0,300 mm, 0,180 mm, 0,150 mm, 0,075 mm göz açıklığı olan eleklerdir.
- **Terazi:** 0,1 g hassasiyet ile numune tartımını sağlayan terazi
- **Etüv:** 165 ℃'ye ayarlanabilen yeterli büyüklüğe sahip etüv







**Şekil 5.2** Elekler, etüv ve terazi

#### 5.2.1.2. Deneyin yapılışı

Agrega numunesi homojen duruma gelene kadar iyice karıştırılır. Hazırlanan numune 110 ℃'ye ayarlanabilen etüvde 24 saat boyunca kurutulur ve oda sıcaklığında bekletildikten sonra tartılır. Elekler en büyükten başlanarak en küçük açıklıklı eleğe kadar yukarıdan aşağıya sıralanır. Sıralanmış durumdaki elekler elek sarsma makinesine yerleştirilir ve numune en üstteki eleğin içerisine koyularak işlem her elek için 2 dk. olacak şekilde eleme işlemine başlanır. Elekten geçen malzeme miktarı elek üstünde kalan malzeme miktarının %1'inden az olması durumunda eleme süresinin yeterli olduğu anlaşılır. Eleme sonrasında her elekte kalan malzeme 0,1 g hassasiyetli terazi ile tartılır.

#### 5.2.1.3. Hesaplama

Elek analizi deney sonucu her elek üzerinde kalan numune ağırlığının toplam numune ağırlığına oranının yüzdesi olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_S = \frac{W_S}{W_i} \times 100\ (\%) \quad \textbf{(5.1)}$$

Formülde;

$P_S$: Herhangi bir elek için elek üzerinde kalan malzeme oranı (%)

$W_S$: Herhangi bir elek için elek üzerinde kalan malzeme ağırlığı (g)

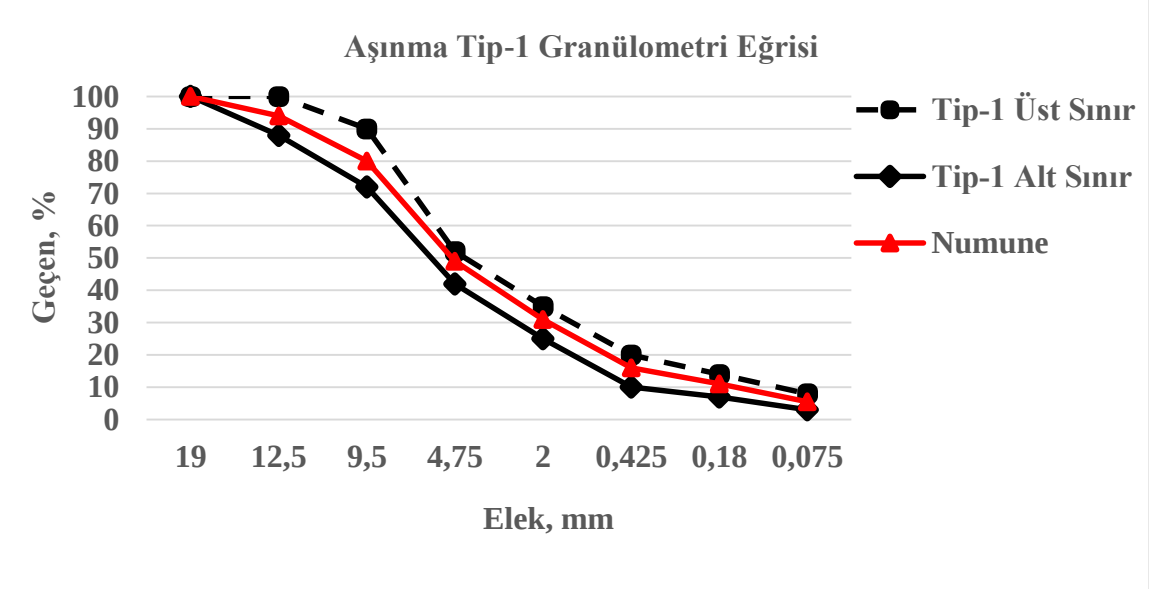
$W_i$: Deneyde kullanılan toplam numune ağırlığı (g)

Tez çalışması kapsamında agrega olarak Eskişehir bölgesi kireçtaşı malzemesi kullanılmıştır. Agrega numuneleri KTŞ'de belirlenen sınırlara uygun olarak Aşınma Tabakası Tip-1 gradasyonunu temsil edecek şekilde hazırlanmıştır. Aşınma Tabakası Tip-1 agrega dağılımı Çizelge 5.1'de verilmiştir. (KTŞ, 2013)

**Çizelge 5.1.** Aşınma tabakası Tip-1 agrega gradasyonu ve şartname sınırları

| Elek No | Elek Çapı (mm) | Şartname Üst Sınır | Şartname Alt Sınır | % Geçen | % Kalan | Ağırlık (gr) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **3/4"** | **19** | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 0,00 | |
| **1/2"** | **12,5** | 100,00 | 88,00 | 94,00 | 6,00 | 69,00 |
| **3/8"** | **9,5** | 90,00 | 72,00 | 80,00 | 14,00 | 161,00 |
| **#4** | **4,75** | 52,00 | 42,00 | 49,00 | 31,00 | 356,50 |
| **#10** | **2** | 35,00 | 25,00 | 31,00 | 18,00 | 207,00 |
| **#40** | **0,425** | 20,00 | 10,00 | 16,00 | 15,00 | 172,50 |
| **#80** | **0,18** | 14,00 | 7,00 | 11,00 | 5,00 | 57,50 |
| **#200** | **0,075** | 8,00 | 3,00 | 5,50 | 5,50 | 63,25 |
| **Filler** | | | | | 5,50 | 63,25 |
| | | | | | **Toplam** | **1150,00** |

Yukarıda çizelgede verildiği üzere her asfalt betonu numunesi için 1150 g agrega kullanılmıştır. En büyük tane boyutu 12,5 mm olarak alınmıştır. Elekten geçen agrega yüzdeleri şartname sınır değerleri arasında kalmıştır. Çizelge 5.1'de belirtilen gradasyona ait granülometri eğrisi Şekil 5.2'de verilmiştir.




**Şekil 5.3** Agrega numuneleri dane boyu dağılımı

Tez çalışması kapsamında hem Marshall hem Superpave tasarım yöntemlerine uygun olması amacıyla her iki tasarımın sınır değerlerini karşılayan asfalt betonu numuneleri hazırlanmıştır. Superpave yasak bölge sınırlarına uyulmuştur. Çizelge 5.2'de Superpave tasarım yöntemi agrega gradasyon değerleri ve şartname sınırları verilmiştir.

**Çizelge 5.2.** Superpave agrega gradasyonu ve şartname sınır değerleri

| Elek No | Elek Çapı (mm) | Şartname Alt Sınır | Şartname Üst Sınır | Yasak Bölge Alt Sınır | Yasak Bölge Üst Sınır | Numune Geçen (%) | Ağırlık (g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **3/4"** | **19** | 100,00 | 100,00 | | | 100,00 | 0,00 |
| **1/2"** | **12,5** | 83,00 | 100,00 | | | 94,00 | 69,00 |
| **3/8"** | **9,5** | 70,00 | 90,00 | | | 80,00 | 161,00 |
| **# 4** | **4,75** | 40,00 | 55,00 | | | 49,00 | 356,50 |
| **# 8** | **2,36** | 29,00 | 42,00 | 39,10 | 39,10 | 34,00 | 172,50 |
| **# 10** | **2** | 25,00 | 38,00 | 33,00 | 35,00 | 31,00 | 34,50 |
| **# 16** | **1,18** | 18,00 | 32,00 | 25,60 | 31,60 | 24,00 | 80,50 |
| **# 30** | **0,6** | 12,00 | 25,00 | 19,10 | 23,10 | 18,00 | 69,00 |
| **# 40** | **0,425** | 10,00 | 20,00 | 17,00 | 20,00 | 16,00 | 23,00 |
| **# 50** | **0,3** | 8,00 | 18,00 | 15,50 | 15,50 | 14,00 | 23,00 |
| **# 80** | **0,18** | 6,00 | 15,00 | | | 11,00 | 34,50 |
| **# 100** | **0,15** | 5,00 | 13,00 | | | 10,00 | 11,50 |
| **# 200** | **0,075** | 4,00 | 10,00 | | | 5,50 | 51,75 |
| **Filler** | | | | | | | 63,25 |
| | | | | | | **Toplam** | **1150** |

Numune içeriğinde 9,5 mm ve 4,75 mm elek üstü agregalarda yer seramik atıkları kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan agrega miktarları ve yer seramik atık miktarları Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te verilmiştir.

**Çizelge 5.3.** Deneylerde kullanılan atık ve agrega miktarları (atık miktarı %10 ve %20)

| Elek Çapı (mm) | Atık Miktarı 10% | Agrega Miktarı 90% | Atık Miktarı 20% | Agrega Miktarı 80% |
|---|---|---|---|---|
| **9,5** | 16,10 | 144,90 | 32,20 | 128,80 |
| **4,75** | 35,65 | 320,85 | 71,30 | 285,20 |

**Çizelge 5.4.** Deneylerde kullanılan atık ve agrega miktarları (atık miktarı %30 ve %40)

| Elek Çapı (mm) | Atık Miktarı 30% | Agrega Miktarı 70% | Atık Miktarı 40% | Agrega Miktarı 60% |
|---|---|---|---|---|
| **9,5** | 48,30 | 112,70 | 64,40 | 96,60 |
| **4,75** | 106,95 | 249,55 | 142,6 | 213,90 |

### 5.2.2. Aşınma kaybı (Los Angeles) deneyi

Los Angeles deneyi doğal veya yapay agregaların aşınma direncini belirlemek amacıyla Los Angeles tamburu ile yapılan deneydir. Genelde iri agregalar için uygulanır. Aşınma kaybı değeri % olarak ifade edilmektedir ( Karacasu, 2016).

#### 5.2.2.1 Kullanılan deney aletleri

- **Los Angeles aşınma deney makinesi:** İki ucu kapalı iç çapı 71,1 ± 0,5 cm, uzunluğu 50,8 ± 0,5 cm olan, yatay ekseni etrafında dakikada 30-35 devir yapacak şekilde dönebilen içi boş çelik yan silindir ve deney esnasında numune kaybını önleyecek kapaktan ibarettir. Üzerinde programlanabilen otomatik devir sayacı bulunur.
- **Aşındırma bilyeleri:** Çelik veya dökme demirden yapılmış, yaklaşık 4,7 cm'lik çapa sahip olan 390-450 g ağırlığında bilyelerdir.
- **Elek:** 1,7 mm açıklığa sahip elek
- **Terazi:** 0,01 g hassasiyet ile numune tartımını sağlayan terazi




**Şekil 5.4** Los Angeles aşınma deney makinesi, elek ve agrega numunesi

### 5.2.2.2. Deneyin yapılışı

Deney numunesi yıkanır, elenir ve etüvde kurutulur daha sonra tartılarak önceden standartlara göre numune tipine göre sayısı belirlenmiş bilyeler ile birlikte tambur içerisine koyularak kapağı sıkıca kapatılır. Los Angeles deney makinesi dakikada 30-35 devir olacak şekilde 500 devir yapmak üzere ayarlanır. Devir sayısı tamamlandıktan sonra numune tamburdan tepsiye alınarak 1,7 mm açıklığa sahip elekten elenir ve elek üzerinde kalan agrega hassas terazi ile tartılır (Karacasu, 2016).

**Çizelge 5.5.** Aşınma deneyi numune tipi, miktarları ve bilye sayısı (Ilıcalı vd., 2001)

| **Elek Çapı** | | **Granülometri sınıfları ve aşınma deneyi için gerekli numune miktarları (g)** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Geçtiği elek (mm) | Üzerinde Kaldığı Elek (mm) | A | B | C | D | E | F | G |
| 75 | 63 | | | | | 2500 | | |
| 63 | 50 | | | | | 2500 | | |
| 50 | 37,5 | | | | | 5000 | 5000 | |
| 37,5 | 25 | 1250 | | | | | 5000 | 5000 |
| 25 | 19 | 1250 | | | | | | 5000 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 19 | 12,5 | 1250 | 2500 | | | | | |
| 12,5 | 9,5 | 1250 | 2500 | | | | | |
| 9,5 | 6,3 | | | 2500 | | | | |
| 6,3 | 4,75 | | | 2500 | | | | |
| 4,75 | 2,36 | | | | 5000 | | | |
| **Toplam Tolerans** | | 5000 ±10 | 5000 ±10 | 5000 ±10 | 5000 ±10 | 10000 ±100 | 10000 ±75 | 10000 ±50 |
| **Kullanılan Bilye Sayısı** | | 12 | 11 | 8 | 6 | 12 | 12 | 12 |
| **Yükleme Ağırlığı (g)** | | 5000 ±25 | 4584 ±25 | 3330 ±20 | 2500 ±15 | 5000 ±25 | 5000 ±25 | 5000 ±25 |

Tez çalışması kapsamında 4,75 mm ve 9,5 mm aralığında kalan agregalar ve yer seramik atıklarına Los Angeles aşınma kaybı deneyi yapılmıştır. C sınıfı ağırlık miktarı ve buna karşılık gelen bilye sayısı (8 adet) kullanılmıştır.



**Şekil 5.5** Yer seramik atıkları Los Angeles deneyi

Karayolu inşasında kullanılan agregaların çevresel etkenler nedeniyle aşınmaya ve parçalanmaya maruz kaldığı göz önünde bulundurulmakta ve bu durumu önlemek amacıyla agrega aşınma değerlerinin KTŞ 2013'te belirtilen sınır değerlerini sağlaması beklenmektedir (Yılmaz, 2019).

**5.2.2.3. <u>Hesaplama</u>**

Deney sonunda 1,7 mm elek üzerinde kalan numune ağırlığının tartılan ilk numune ağırlığına oranı aşınma direnci olarak aşağıda verilen formül ile hesaplanır.

$$LA = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\ (\%)\ (\mathbf{5.2})$$

Formülde;

$W_1$: Numunenin etüvde kurutulduktan sonraki ilk ağırlığı (g)

$W_2$: Numunenin 500 devir sonunda tartılan ağırlığı (g)

LA: 500 devir sonunda oluşan LA aşınma kaybı oranı (%)

C tipi numune için agrega ilk ağırlığı ($W_1$ ) 5000 g alınmıştır. 500 devir sonunda 1,7 mm elek üzerinde kalan agrega miktarı ( $W_2$) 4098,4 g tartılmıştır.

$$LA = \frac{5000 - 4098{,}4}{5000} \times 100 = 18{,}032\ (\%)\ LA20$$

C tipi numune için yer seramik atık ilk ağırlığı ( $W_1$) 5000 g alınmıştır. 500 devir sonunda 1,7 mm elek üzerinde kalan yer seramik atık miktarı ( $W_2$ ) 4095,7 g tartılmıştır.

$$LA = \frac{5000 - 4095{,}7}{5000} \times 100 = 18{,}086\ (\%)\ LA20$$

Deney tamamladığında kırmataş agrega ile yer seramik atıklarının Los Angeles aşınma yüzdesinin ≤ 20 olduğu, birbirine yakın değerlerden oluştuğu ve aynı aşınma katsayısı sınıfında (LA20) yer aldığı sonucuna varılmıştır.

### 5.2.3. İri agrega özgül ağırlık deneyi

Deney iri agregaların (4,75 mm elek üzerinde kalan agregaların) özgül ağırlık değerini tayin etme amacıyla yapılmaktadır.

#### 5.2.3.1. Kullanılan deney aletleri

- **Özgül ağırlık sehpası:** Su içerisinde tartım yapmayı sağlayan yüksekliği ayarlanabilir sehpa.
- **Kafes örgülü sepet:** 4,75 mm'den daha az açıklığa sahip paslanmaz sepet.
- **Kova:** İçerisine tel sepet sığabilecek büyüklükte su doldurulan kova.
- **Terazi:** 0.1 g hassasiyet ile tartım yapabilen 20 kg çekerli terazi.
- **Kurutma bezi:** Numune üzerindeki suyu emmesi için kullanılan bezler.



**Şekil 5.6** Özgül ağırlık sehpası, kafes örgülü sepet, terazi ve iri agrega

#### 5.2.3.2. Numune hazırlama ve deneyin yapılışı

Agrega dağılımını temsil edecek şekilde 4,75 mm açıklıklı elek üzerinde kalan agregalardan 2 kg numune alınır ve yıkanır. Numuneler 24 saat su içerisinde bekletildikten sonra sudan çıkarılır ve kurutma bezleri ile yüzey kuru suya doygun ağırlık tartılır. Böylece $M_{SSD}$ değeri elde edilir. Aynı numune tel sepet yardımı ile üstten 5 cm su içerisinde kalacak şekilde su dolu kovaya daldırılır agrega daneleri arasında boşluk kalmaması için sepet birkaç kez sarsılır ve sudaki ağırlık $M_S$ değeri bulunur. Daha sonra numuneler su içerisinden

çıkarılıp bir tepsiye alınır 110 ℃ etüvde kurutulur oda sıcaklığında değişmez ağırlığına ulaştığında tartılır ve $M_K$ değeri kaydedilir.



**Şekil 5.7** Yer seramik atıklarının özgül ağırlık deneyi

### 5.2.3.3. Hesaplama

İri agrega özgül ağırlık değerleri aşağıda verilen formüller ile hesaplanır.

$$SG_B = \frac{A}{B - C} \quad (\mathbf{5.3})$$

$$SG_{ssd} = \frac{B}{B - C} \quad (\mathbf{5.4})$$

$$SG_a = \frac{A}{A - C} \quad (\mathbf{5.5})$$

Formülde;

$SG_b$: Hacim özgül ağırlık (g/cm$^3$)

$SG_{ssd}$: Yüzey kuru suya doygun özgül ağırlık (g/cm$^3$)

$SG_a$: Zahiri özgül ağırlık (g/cm$^3$)

A: Agrega kuru ağırlığı (g)

B: Agrega yüzey kuru suya doygun ağırlığı (g)

C: Agreganın sudaki ağırlığı (g)

**Çizelge 5.6.** İri agrega özgül ağırlık deney sonuçları

| **İRİ AGREGA** | | Numune1 | Numune2 | Ortalama |
|---|---|---|---|---|
| Agrega Kuru Ağırlığı (g) | **A** | 1990,000 | 1990,000 | |
| Agrega YKSD Numune Ağırlığı (g) | **B** | 1998,120 | 1996,000 | |
| Agreganın Sudaki Ağırlığı (g) | **C** | 1255,260 | 1254,800 | |
| Hacim Özgül Ağırlık (g / cm3) | $\mathbf{SG_b}$ | 2,679 | 2,685 | 2,682 |
| Zahiri Özgül Ağırlık (g / cm3) | $\mathbf{SG_a}$ | 2,708 | 2,707 | 2,708 |
| YKSD Özgül Ağırlık (g / cm3) | $\mathbf{SG_{ssd}}$ | 2,690 | 2,693 | 2,691 |

**Çizelge 5.7.** Yer seramik atıkları özgül ağırlık deney sonuçları

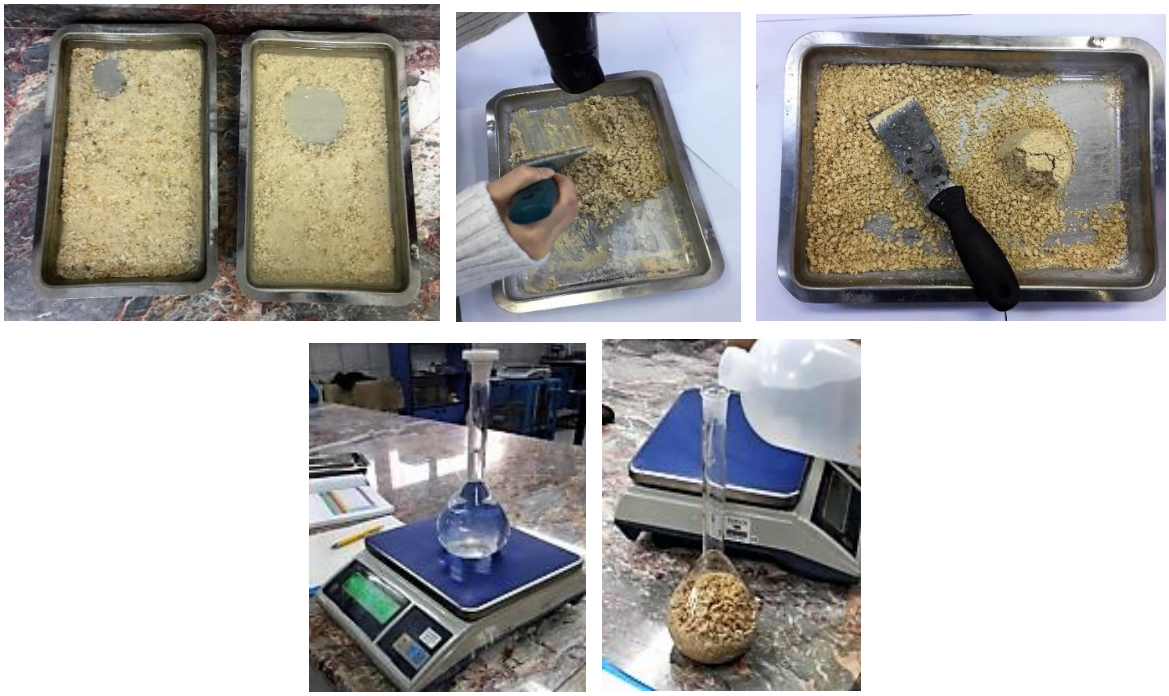
| **YER KAROSU** | | Numune1 | Numune2 | Ortalama |
|---|---|---|---|---|
| Kuru Ağırlık (g) | **A** | 2000,000 | 2000,000 | |
| YKSD Numune Ağırlığı (g) | **B** | 2031,730 | 2031,580 | |
| Sudaki Ağırlık (g) | **C** | 1167,800 | 1168,500 | |
| Hacim Özgül Ağırlık (g / cm3) | $\mathbf{SG_b}$ | 2,315 | 2,317 | 2,316 |
| Zahiri Özgül Ağırlık (g / cm3) | $\mathbf{SG_a}$ | 2,403 | 2,405 | 2,404 |
| YKSD Özgül Ağırlık (g / cm3) | $\mathbf{SG_{ssd}}$ | 2,352 | 2,354 | 2,353 |

### 5.2.4. İnce agrega özgül ağırlık deneyi

Deney 4,75 mm elek altı ve 0,075 mm elek üstü ince agregaların özgül ağırlık değerinin hesaplanması amacıyla yapılır.

#### 5.2.4.1. Kullanılan deney aletleri

- **Terazi:** 0,1 g hassasiyet ile tartım yapabilen terazi**.**
- **Piknometre:** 500 veya 1000 ml kapasiteli cam ölçü kabı.
- **Tepsi:** Yüzey kuru suya doygun ağırlığın belirlenebilmesi için numunenin koyulacağı metal tepsi.
- **Metal koni kalıp:** En az 0,8 mm et kalınlığına sahip üst çapı 40 ± 3 mm, alt çapı 90 ± 3 mm ve yüksekliği 75 mm olan kesik koni şeklinde metal kalıp.
- **Sıkıştırma çubuğu:** 25 mm kalınlığa ve yaklaşık 350 g ağırlığa sahip yuvarlak uçlu çubuk.
- **Sıcak hava kaynağı:** Numunenin kurutulması için gerekli ısıyı sağlayabilen kaynak (saç kurutma makinesi)



**Şekil 5.8.** İnce agrega özgül ağırlık deney aletleri

### 5.2.4.2. Deneyin yapılışı

Agrega dane dağılımını temsil edecek şekilde 4,75 mm ve 0,075 mm açıklıklı elekler arasında kalan agregalardan 1 kg numune ayrı ayrı 500 g olmak üzere iki tepsi içerisine alınır. 24 saat su dolu tepsi içerisinde bekletilir. Numune 24 saat sonra malzeme kaybetmemeye özen gösterilerek süzülür. Herhangi bir sıcak hava kaynağı ile kurutulmaya başlanır. Yüzey kuru suya doygun ağırlığın bulunması için koni metodu kullanılır. Kurutulan numune üç tabaka halinde her tabakada 25 vuruş ile sıkıştırılmak suretiyle metal koni içerisine koyulur. Numune ile doldurulan koni tepsi içerisinde ters çevrilir ve kaldırılır. Eğer numune yüzey kuru suya doygun hale gelmişse ince agregalar serbest bir şekilde çöker çökme olmazsa kurutma işlemine devam edilir. Numunenin sudaki ağırlığını bulmak için deneyin bir sonraki kısmına geçilir. Piknometre boş ağırlığı ve piknometre çizgisine kadar su ile dolu olan ağırlığı tartılır. Sonra piknometre içerisindeki su boşaltılır ve yüzey kuru suya doygun durumda olan ince agregalar piknometre içerisine koyularak tartılır. Piknometre yarısına kadar su ile doldurulur. Düz bir yüzey üzerine hafif hafif vurarak ve aynı zamanda döndürülerek numune içerisindeki hava kabarcıkların çıkması sağlanır. Ardından piknometre çizgisine kadar su eklenir ve tartılır. Son olarak numune bir tepsi içerisine alınır ve 110 ℃ etüvde kurutulur. Etüvden çıkarılıp oda sıcaklığında soğutulan kuru numune ağırlığı tartılır (Karacasu, 2016).

### 5.2.4.3. Hesaplama

İnce agrega özgül ağırlık değerleri aşağıda verilen formüller ile hesaplanır.

$$SG_b = \frac{E}{B + C - A - D} \quad (\mathbf{5.6})$$

$$SG_{ssd} = \frac{C - A}{B + C - A - D} \quad (\mathbf{5.7})$$

$$SG_a = \frac{E}{B - E - D} \quad (\mathbf{5.8})$$

Formülde;

$SG_b$: Hacim özgül ağırlık (g/cm$^3$)

$SG_{ssd}$: Yüzey kuru suya doygun özgül ağırlık (g/cm$^3$)

$SG_a$: Zahiri özgül ağırlık (g/cm$^3$)

A: Piknometre ağırlığı (g)

B: Piknometre + su ağırlığı (g)

C: Piknometre + yüzey kuru suya doygun numune ağırlığı (g)

D: Piknometre + su + yüzey kuru suya doygun numune ağırlığı (g)

E: Kuru numune ağırlığı (g)

**Çizelge 5.8.** İnce agrega özgül ağırlık deney sonuçları

| **İNCE AGREGA** | | Numune1 | Numune2 | Ortalama |
|---|---|---|---|---|
| Piknometre Ağırlığı (g) | **A** | 705,660 | 697,440 | |
| Piknometre + Su (g) | **B** | 1701,700 | 1677,160 | |
| Piknometre +YKSD Numune Ağırlığı (g) | **C** | 1224,330 | 1214,150 | |
| Piknometre + Su + YKSD Numune Ağırlığı (g) | **D** | 2018,720 | 2009,570 | |
| Kuru Numune Ağırlığı (g) | **E** | 500,000 | 500,000 | |
| Hacim Özgül Ağırlık (g / cm3) | $\boldsymbol{SG_b}$ | 2,480 | 2,713 | 2,596 |
| Zahiri Özgül Ağırlık (g / cm3) | $\boldsymbol{SG_a}$ | 2,733 | 2,983 | 2,858 |
| YKSD Özgül Ağırlık (g / cm3) | $\boldsymbol{SG_{ssd}}$ | 2,572 | 2,804 | 2,688 |

### 5.2.5. Filler agrega özgül ağırlık deneyi

Deney 0,075 mm açıklıklı elek altı agreganın özgül ağırlığını ve su emme oranını tayin etmek amacıyla yapılır.

#### 5.2.5.1. <u>Kullanılan deney aletleri</u>

- **Piknometre:** 1000 veya 500 ml kapasiteli cam ölçü kabı.
- **Terazi:** 0,1 g hassasiyet ile tartım yapabilen terazi.
- **Vakum pompası:** Ortam basıncını 3 kPa'a kadar düşürebilen pompa.



**Şekil 5.9.** Filler agrega özgül ağırlık değerinin bulunması

### 5.2.5.2. Numune hazırlama ve deneyin yapılışı

Agrega dane dağılımını temsil edecek şekilde 0,075 mm açıklıklı elek altındaki agregadan 100 g alınır. 110 °C'ye ayarlanmış etüvde değişmez ağırlık sağlanana kadar kurutulur. Daha önceden tartılmış piknometre içerisine koyulur ve piknometre ile birlikte tartılır, not edilir. Sonra numune üzerine piknometre çizgisine kadar su ilave edilir ve tekrar tartılır (Karacasu, 2016).

### 5.2.5.3. Hesaplama

Filler agrega özgül ağırlık değeri aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$SG_a = \frac{E}{(B - A) + (D - C)} \quad (\mathbf{5.9})$$

Formülde;

A: Piknometre ağırlığı (g)

B: Piknometre + su ağırlığı (g)

C: Piknometre + numune ağırlığı (g)

D: Piknometre + su + numune ağırlığı (g)

E: Kuru numune ağırlığı (g)

$SG_a$: Zahiri özgül ağırlık ( g / $cm^3$ )

**Çizelge 5.9.** Filler agrega özgül ağırlık deney sonucu

| **FİLLER AGREGA** | | Numune1 | Numune2 | Ortalama |
|---|---|---|---|---|
| Piknometre Ağırlığı (g) | **A** | 132,860 | 144,740 | |
| Pikonometre + Su (g) | **B** | 631,540 | 643,000 | |
| Piknometre +YKSD Numune Ağırlığı (g) | **C** | 232,840 | 244,770 | |
| Piknometre + Su + YKSD Numune Ağırlığı (g) | **D** | 695,220 | 707,450 | |
| Kuru Numune Ağırlığı (g) | **E** | 100,000 | 100,000 | |
| Zahiri Özgül Ağırlık (g / cm3) | **$SG_a$** | 2,755 | 2,811 | 2,783 |

### 5.2.6. Birim hacim ağırlık deneyi

Birim hacim ağırlık deneyi agregaların sıkışık ve gevşek durumda birim ağırlıklarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Deney ölçü kabı kullanılan en büyük numune çapına göre belirlenmektedir (Ilıcalı vd., 2001).

#### 5.2.6.1. <u>Kullanılan deney aletleri</u>

- **Hacim ölçü kabı:** Deformasyona uğramaması için gerekli et kalınlığına sahip metal hacmi belli ölçü kabı.
- **Terazi:** 0,1 g hassasiyet ile tartım yapabilen terazi.
- **Şişleme çubuğu:** 16 mm çapında ve 600 mm uzunluğa sahip küresel uçlu paslanmaz çelik çubuk.



**Şekil 5.10.** Birim hacim ağırlık deneyinde kullanılan aletler

### 5.2.6.2. Deneyin yapılışı

**Sıkışık Birim Hacim Ağırlık:** Ölçü kabı birim hacim ağırlığı hesaplanacak malzeme ile 1/3 oranında doldurularak çok sert olmamak koşuluyla 25 defa şişlenir. Kap ikinci kez 2/3 oranına kadar doldurulur ve işlem tekrarlanır. Son olarak kabın tamamı doldurulur, tekrar şişlenerek kabın üst yüzeyi düzeltilir ve agrega ile birlikte tartılır (Ilıcalı vd., 2001).

**Gevşek Birim Hacim Ağırlık:** Ölçü kabı yukarıdan 5 cm'den fazla boşluk kalmayacak şekilde birim hacim ağırlık tayini yapılacak malzeme ile doldurulur. Kalan kısım agregadan oluşan gözle görülür boşluklar kapatılacak şekilde doldurulur ve yüzey el ile tesviye edilerek tartılır (Ilıcalı vd., 2001).

### 5.2.6.3. Hesaplama

Sıkışık birim hacim ağırlık aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$BHA_s = \frac{W_s - W_i}{V} \quad (\mathbf{5.10})$$

Formülde:

$BHA_s$: Agrega sıkışık birim hacim ağırlık ( g /cm$^3$ )

$W_i$ : Ölçü kabının boş ağırlığı (g)

$W_s$: Ölçü kabının sıkışık agrega ile dolu ağırlığı (g)

V: Ölçü kabı hacmi (cm$^3$)

**Çizelge 5.10.** Agrega sıkışık birim hacim ağırlık deney sonuçları

| Agrega Sıkışık Birim Hacim Ağırlık Deneyi | Birim | Miktar |
|---|---|---|
| Wi | g | 5250,00 |
| Ws | g | 9964,50 |
| V | cm3 | 3000,00 |
| BHAs | g/cm3 | **1,57** |

**Çizelge 5.11.** Yer seramik atıkları sıkışık birim hacim ağırlık deney sonuçları

| Yer Seramik Atıkları Sıkışık Birim Hacim Ağırlık Deneyi | Birim | Miktar |
|---|---|---|
| Wi | g | 5250,00 |
| Ws | g | 9378,90 |
| V | cm3 | 3000,00 |
| BHAs | gr/cm3 | **1,38** |

Gevşek birim hacim ağırlık aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$BHA_g = \frac{W_g - W_i}{V} \quad (\mathbf{5.11})$$

Formülde:

$BHA_g$: Agrega sıkışık birim hacim ağırlık ( g/cm$^3$ )

$W_i$ : Ölçü kabının boş ağırlığı (g)

$W_g$: Ölçü kabının sıkışık agrega ile dolu ağırlığı (g)

V: Ölçü kabı hacmi (cm$^3$)

**Çizelge 5.12.** Agrega gevşek birim hacim ağırlık deney sonuçları

| Agrega Gevşek Birim Hacim Ağırlık Deneyi | Birim | Miktar |
|---|---|---|
| Wi | g | 5250,00 |
| Wg | g | 9151,50 |
| V | cm3 | 3000,00 |
| BHAg | g/cm3 | **1,30** |

**Çizelge 5.13.** Yer seramik atıkları gevşek birim hacim ağırlık deney sonuçları

| Yer Seramik Atıkları Gevşek Birim Hacim Ağırlık Deneyi | Birim | Miktar |
|---|---|---|
| Wi | g | 5250,00 |
| Wg | g | 9051,90 |
| V | cm3 | 3000,00 |
| BHAg | g/cm3 | **1,27** |

### 5.2.7. Su emme deneyi

Deneyde kullanılacak agregaların su emme oranını tayin etmek amacıyla yapılır.

#### 5.2.7.1. Kullanılan deney aletleri

- **Terazi:** 0,1 g hassasiyet ile tartım yapabilen terazi.
- **Tepsi:** Numuneyi suda bekletmek için kullanılacak metal tepsi.
- **Kurutma bezi:** Yüzey kuru suya doygun durumun sağlanabilmesi açısından numune üzerindeki suyu emmesi için kullanılan bezler.



**Şekil 5.11.** Su emme deneyi numuneleri

#### 5.2.7.2. Deneyin yapılışı

Yaklaşık 2000 g ağırlığında iri agregalardan oluşan numune hazırlanır. 24 saat boyunca su içerisinde bekletilir. Sonra yüzey kuru suya doygun ağırlığın saptanabilmesi için agrega kurutma bezleri ile yüzey kuru hale getirilir ve tartılır. Çalışma kapsamında agreganın

yanı sıra 9,5 mm ve 4,75 mm açıklıklı elek üstünde kalan yer seramik atıklarına da su emme deneyi yapılmıştır.

#### 5.2.7.3. Hesaplama

Su emme oranı aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$SE = \frac{M_{SSD} - M_K}{M_K} \quad (\mathbf{5.12})$$

Formülde;

SE: Su emme oranı (%)

$M_{SSD}$: Agreganın yüzey kuru suya doygun ağırlığı (%)

$M_K$: Agrega kuru ağırlığı (g)

**Çizelge 5.14.** İri agrega su emme oranı deney sonuçları

| Agrega Su Emme Deneyi | Birim | Miktar |
|---|---|---|
| Mk | g | 2005,60 |
| MSSD | g | 2013,00 |
| SE | % | **0,37** |

**Çizelge 5.15.** Yer seramik atıkları su emme oranı deney sonuçları

| Yer Seramik Atıkları Su Emme Deneyi | Birim | Miktar |
|---|---|---|
| Mk | g | 2000,20 |
| MSSD | g | 2045,00 |
| SE | % | **2,24** |

### 5.2.8. Yassılık indeksi deneyi

Kalınlığı nominal boyutunun 0,6'sından daha küçük olan agrega daneleri yassı olarak tanımlanır. Agregaların yassılık indeksini belirlemek amacıyla şablon yardımıyla yapılan deneydir (Orhan, 2012).

### 5.2.8.1. Kullanılan deney aletleri

- **Terazi:** 0,1 g hassasiyet ile tartım yapabilen terazi.
- **Yassılık indeksi şablonu ve elekleri:** 4,9 × 30 mm, 7,2 × 40 mm, 10,2 × 50 mm, 14,4 × 60 mm, 19,7 × 80 mm, 26,3 × 90 mm ve 33,9 × 100 mm olmak üzere standart yuva boyutlarına sahip şablon.



**Şekil 5.12.** Yassılık indeksi şablonu

### 5.2.8.2. Deneyin yapılışı

Elek açıklığı 9,5 ve 12, 5 mm olan eleklerin üstünde kalan numuneden 500 g alınır. Agregalar yassılık indeksi şablonundan manuel olarak teker teker geçirilir. Şablondan geçen numune ağırlığı tartılır.

### 5.2.8.3. Hesaplama

Deney sonucu aşağıda verilen formül ile hesaplanır.

$$FI = \frac{W_s}{W_i} \times 100 \ (\mathbf{5.13})$$

Formülde;

FI: Yassı agrega yüzdesi (%)

$W_s$: Şablondan geçen agrega miktarı (g)

$W_i$: Toplam agrega miktarı (g)

**Çizelge 5.16.** Yassılık indeksi deney sonuçları

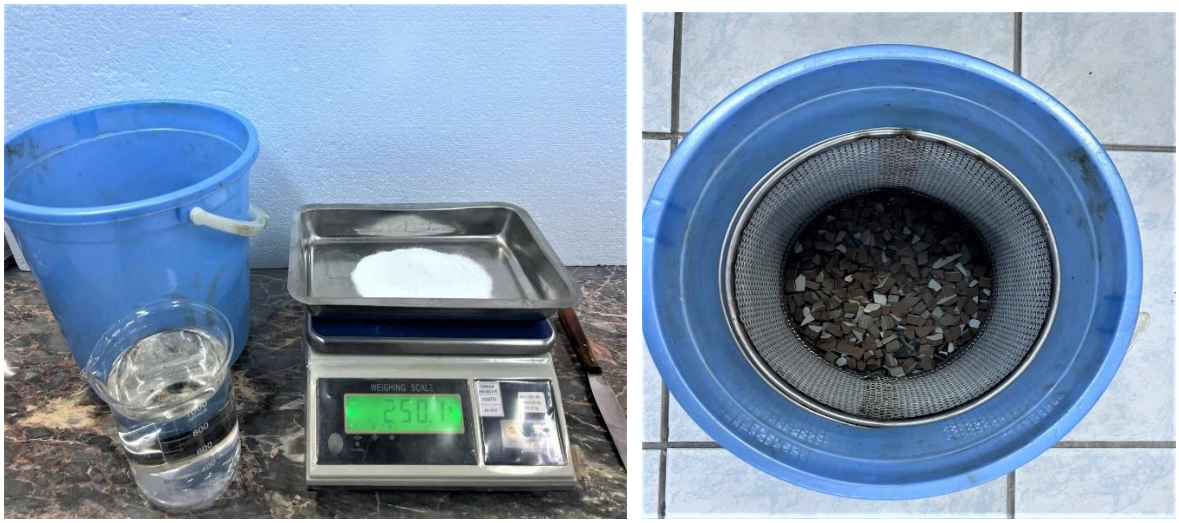
| di-Di | Şablon Genişliği Di/2 (mm) | Numune Miktarı (g) | Şablondan Geçen Miktar (g) | FIi (%) |
|---|---|---|---|---|
| 9,5-12,5 | 6,25 | 500,00 | 81,00 | 16,20 |

### 5.2.9. Donma-Çözülme Deneyi

Deneyde laboratuvar ortamında agregaların tekrarlı olarak donma çözülme etkilerine maruz kaldığında nasıl davranacağını belirlemek amacıyla yapılmaktadır.

#### 5.2.9.1 Kullanılan deney aletleri

- **Çözelti Kovası:** Numune hacminin 5 katı hacme sahip kova
- **Terazi:** 0,1 g hassasiyete sahip terazi
- **Tel Sepet:** Numuneleri çözelti içerisinde tutmak için kullanılan sepet
- **Çözelti:** 1 litre suya 250 g $Na_2SO_4$ tuzu eklenerek oluşturulur.



**Şekil 5.13.** 250 g $Na_2SO_4$, tel sepet, çözelti kovası ve terazi

### 5.2.9.2 Deneyin yapılışı

2 adet agregalar ve 2 adet yer seramik atığı için olmak üzere 4 adet numune hazırlanır. Numuneler tel sepete koyularak üst yüzeyde 5 cm çözelti olacak şekilde çözelti kovasına yerleştirilir. 17 ±0,5 saat bekletilerek çözeltiden çıkarılır ve 110 ± 5 ℃ de 2 ± 0,25 saat kurutulur. Daha sonra 5 ± 0,2 saat oda sıcaklığında bekletilir. Döngü 5 kez tekrarlanır sonunda numune yıkanır 110 ± 5 ℃ de değişmez kütleye ulaşana kadar kurutulur ve tartılır.

### 5.2.9.3 Hesaplama

Deney sonucu aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır. Deney yer seramik atıklarının su emme miktarının agregalara göre daha fazla çıkması nedeniyle donma çözülmeye maruz kaldığında malzeme davranışını belirlemek amacıyla yapılmıştır.

$$FTR = \frac{W_i - W_s}{W_i} \times 100$$

$FTR$: Donma-çözülme kaybı (%)

$W_i$: Başlangıç numune miktarı (g)

$W_s$: Deney sonu numune miktarı (g)

$$FTR_{numune1} = \frac{W_i - W_s}{W_i} \times 100 = \frac{500 - 496{,}30}{500} \times 100 = 0{,}74$$

$$FTR_{numune2} = \frac{W_i - W_s}{W_i} \times 100 = \frac{500 - 495{,}7}{500} \times 100 = 0{,}86$$

Yer seramik atıkları için donma çözülme miktarı iki numunenin ortalaması alınarak %0,8 olarak bulunmuştur.

$$FTR_{agrega} = \frac{W_i - W_s}{W_i} \times 100 = \frac{500 - 493}{500} \times 100 = 1{,}4$$

Doğal agregalar için donma çözülme miktarı %1,4 olarak bulunmuştur. Yer seramik atıkları ile doğal agregalar donma çözülme miktarında birbirleri ile benzerlik göstermektedir.

## 5.3. Bitüm

Ham petrolün rafine edilmesi ile elde edilen, oda sıcaklığında yarı katı veya katıya yakın halde bulunan, kohezyon ve adezyon gibi özellikleri nedeniyle yapışkan ve su içermeyen maddeye bitüm adı verilmektedir. Asfalt betonu ve sathi kaplamalarda istenen derecede ısıtılmak şartıyla kullanılır. Bitümler termoplastik özelliğe sahip olup penetrasyon derecesine ve yumuşama noktasına göre sınıflandırılmaktadır (Orhan, 2012).

## 5.4. Bitüm deneyleri

Bitümün karayolu çalışmalarında kullanılabilmesi için bir takım özelliklerinin bilinmesi ve şartname sınırlarına göre uygunluğunun değerlendirilmesi gerekmektedir. Bitüme uygulanması gereken deneyler aşağıda verilmiştir.

1. **Penetrasyon Deneyi:** Standart uçlu bir iğnenin belirli sürede, 25 ℃ sıcaklıkta ve yük altında düşey doğrultuda bitüm içerisine batma miktarının belirlenerek bitümün kıvamlılığının tespit edilmesi için uygulanır (Karacasu, 2016).



**Şekil 5.14.** Penetrasyon deney aleti

2. **Yumuşama Noktası Deneyi :** Bitümün hangi sıcaklıkta akmaya başlayacağını sıcaklığa duyarlılığını yüzük-bilye yöntemi ile belirleyen deneydir (Ertaş, 2019).



**Şekil 5.15.** Yumuşama noktası deney aletleri

3. **Düktilite Deneyi:** Bitümün yavaş etkiyen yükler altında cm cinsinden uzama miktarının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır (Karacasu, 2016).



**Şekil 5.16.** Düktilite deney aletleri

4. **Isıtma Kaybı Deneyi:** Karışım hazırlama, serme ve sıkıştırma sırasında bitümde oluşan yaşlanma örneklenir. Dönel ince film ısıtma kaybı deneyi (RTFOT) ve ince film ısıtma kaybı deneyi (TFOT) olmak üzere deney iki şekilde yapılabilir. Böylece bitümün yaşlanmasından dolayı oluşan kayıp tespit edilir (Orhan, 2012).




**Şekil 5.17.** Dönel ince film ısıtma kaybı deney aleti (RTFOT)



**Şekil 5.18.** İnce film ısıtma kaybı deney aleti (TFOT)

5. **Parlama Noktası Deneyi:** Isıtılan deney numunesinin buharına deney aleti temas ettirilir ve numunenin parladığı fakat yanmaya devam etmediği derece belirlenir. Uygulama sırasında oluşabilecek tehlikeyi önlemek amacıyla parlama noktasının bilinmesi oldukça önemlidir (Ilıcalı vd., 2001).



**Şekil 5.19.** Parlama noktası deney aleti

6. **Özgül Ağırlık Deneyi:** Piknometre metodu ile bitümüm özgül ağırlığını tayin etmek amacıyla yapılır. Deney sırasında bitüm içerisinde buharlaşmanın olmamasına dikkat edilmelidir.

7. **Viskozite Deneyi:** Bitümün akmaya karşı direncini belirlemek amacıyla yapılan deneydir. Viskozite değeri sıcaklık ile ters orantılı olmakla birlikte bitümün farklı sıcaklık değerlerindeki akma oranını ifade etmektedir. 135 ℃'deki viskozite bitümün agregaları düzgün bir şekilde sarma kabiliyetini gösterir. Viskozitesi yüksek olan bitüm agregayı saramaz, viskozitesi düşük olan bitüm ise kusma eğilimde olacaktır. Bu nedenle viskozite optimum oranda olmalıdır.



**Şekil 5.20.** Viskozite deney aleti

Çalışma kapsamında 50/70 penetrasyonlu TÜPRAŞ Kırıkkale üretim tesislerinden elde edilen bitüm kullanılmıştır. Kullanılan bitümün malzeme özellikleri Çizelge 5.17'de verilmiştir.

**Çizelge 5.17.** Bitüm özellikleri

| **Özellik** | **Değer** | **Standart** |
|---|---|---|
| Penetrasyon (25 ℃, 100 g) | 64 | ASTM D5 |
| Yumuşama Noktası (℃) | 48 | ASTM D36/D36M-09 |
| Düktilite (25 ℃, 5 cm/dk) | > 100 cm | ASTM D113-07 |
| Isıtma Kaybı (%) | 0,43 | ASTM D6-95 |
| Parlama Noktası (℃) | 314 | ASTM D92-05a |
| Özgül Ağırlık (g/cm$^3$) | 1,026 | ASTM D70-09e1 |
| Viskozite (135 ℃, cP) | 437,5 | ASTM D4402-06 |
| Viskozite (165 ℃, cP) | 137,5 | ASTM D4402-06 |

## 5.5. Karışım Deneyleri

Temel ve üstyapı üzerinde kaplamaların yük altında oluşabilecek deformasyonlarının ve performanslarının değerlendirilebilmesi için stabilite, akma ve sünme gibi bir takım deneyler yapılmaktadır. Deney sonucunda asfalt betonunun özellikleri, yük taşıma kapasitesi ve yük altındaki davranışları belirlenir.

### 5.5.1. Marshall Tasarım Deneyi

Dünyanın bir çok yerinde 1940'lardan bu yana geliştirilerek karışım dizaynlarında kullanılan ve karayolu kuruluşları tarafından kabul gören tasarım yöntemidir. Asfalt betonunun fiziksel, mekanik davranışlarını ve karışımda kullanılacak optimum bitüm oranını belirlemek üzere sağlam ve durabilitesi yüksek bir üstyapı modeli elde etmek amacıyla yapılmaktadır (Selçuk, 2019).

#### 5.5.1.1. Kullanılan deney aletleri

- **Dijital Terazi:** 0,1 g hassasiyet ile tartım yapabilen terazi.
- **Mikser:** Homojen karışım oluşturabilmek için agrega ve bitümün karıştırılmasını sağlayan alet.
- **Isıtma Kabı:** Agrega ve bitüm karıştırılırken ısı kaybetmemesi amacıyla mikserin altına yerleştirilen ısı kaynağı.
- **Kürek:** Karışımın kalıplara koyulması için kullanılan metal kürek.
- **Şişleme Çubukları:** Malzeme içerisinde boşluk kalmaması için sıkıştırmaya yarayan çubuklardır.
- **Numune Kalıpları:** 6,35 cm yüksekliğe ve 10 cm'lik çapa sahip taban plakası, gövde ve ekten oluşan silindirik metal kalıplar.
- **Marshall Tokmağı:** Kalıplara koyulan karışımın ısı kaybetmeden sıkıştırılması için kullanılan yol yapımında silindirin görevini laboratuvar ortamında karşılayan cihazdır.

- **Kriko:** Numuneleri kalıptan zarar görmeden çıkarmak için kullanılan cihaz.
- **Kumpas:** Kalıptan çıkan numunelerin yüksekliğini ölçmek için kullanılan hassas ölçü aleti.
- **Sıcak Su Banyosu:** Kalıptan çıkarılan numuneleri 60 ℃ sıcaklıkta tutabilmek için kullanılan içi su dolu banyo.
- **Marshall Test Cihazı:** Marshall briketlerinin akma ve dayanımlarını ölçmek için kullanılan cihaz.

### 5.5.1.2. Numune hazırlama

İri agrega, ince agrega ve filler agrega olmak üzere üç tip agregadan oluşan gradasyonu belirli her biri 1150 g olan 21 adet numune bir gün önceden hazırlanır ve 160 ℃'ye ayarlanmış etüvde 24 saat bekletilir.



**Şekil 5.21.** Asfalt betonu numunelerinin hazırlanışı

Deney sırasında kullanılacak olan kürek, şişleme çubuğu, mikser başlığı ve kalıp gibi malzemeler ısı kaybını önlemek amacıyla numuneler ile birlikte etüve konulur. Karışımda

kullanılacak bitümün ise 160 ℃'ye sahip etüve 2-3 saat önceden konulması yeterlidir. Karışımlara ilave edilecek olan bitüm oranları %0,5'lik artışlarla %3,5 - %6,5 arasında değişecek ve her bitüm oranına ait üçer numune hazırlanacaktır.

Deneye başlamadan önce teraziyi ısıdan korumak amacıyla üzerine ısı geçirmeyen bir malzeme konulur. Etüvden çıkarılan mikser kabı bu malzemenin üzerine yerleştirilir ve agrega karışımı kap içerisine boşaltılır. Bir çubuk ile agreganın ortasında boşluk açılır, terazi sıfırlanır ve karışım için gerekli olan oranda bitüm ilave edilir.



**Şekil 5.22.** Marshall tasarım deneyi aşamaları - 1

Mikser başlığı etüvden çıkarılır ve cihaza takılır. Agrega ve bitüm ile doldurulan mikser kabı da cihaza takılır ve kabın altına ısıtıcı yerleştirilerek cihaz 90 s boyunca çalıştırılır. Isı kaybını en aza indirmek amacıyla son 10 saniyede şişleme çubuğu, kürek, numune kalıbı etüvden çıkarılır ve tabanına önceden kesilmiş yağlı kağıt koyulur.



**Şekil 5.23.** Marshall tasarım deneyi aşamaları – 2

Kalıp içerisine karışım kürek yardımı ile koyulurken aynı zamanda boşluk kalmaması amacıyla şişleme yapılır. Karışımın tamamı kalıba koyulduktan sonra yüzeyi düzeltilir ve üzerine yağlı kağıt konulur. Kalıp Marshall tokmağına yerleştirilir Marshall tokmağı her yüzeye 75 vuruş yapmak üzere sıkıştırma işlemini gerçekleştirir. Tokmak durduktan sonra kalıbın alt ve üst yüzeyindeki yağlı kağıtlar çıkarılır ve asfalt betonu numunesi numaralandırılır. Bu işlemler sırasıyla 21 adet numune için gerçekleştirilir.



**Şekil 5.24.** Marshall tasarım deneyi aşamaları – 3

Asfalt betonu numuneleri soğuması için en az 3 saat açık havada bekletilir. Soğuyan briketler kriko yardımıyla kalıptan çıkarılır. Kalıplar bir sonraki deneyde kullanılmak üzere temizlenir ve kaldırılır.



**Şekil 5.25.** Asfalt betonu numunelerinin kalıptan çıkarılması

### 5.5.1.3. Marshall stabilite ve akma deneyi

Sıkıştırılmış silindirik asfalt betonu numunelerinin deformasyona karşı direnci, Marshall test cihazında numunelere 50 mm/dk'lık bir hızla yük uygulanması ile ölçülür. Marshall dayanımı yoğunluk-boşluk oranı ve stabilite-akma değeri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Cihaz standart olarak kabul edilen 60 ℃ sıcaklıkta numunenin taşıyabileceği maksimum yükü numunelere uygularken oluşan deformasyon akma değeri olarak kaydedilmektedir. Deney sonucunda agrega karışımının türüne ve atık miktarına göre optimum bitüm oranı tayin edilir (Wafaie, 2022).

Kriko yardımıyla kalıptan çıkarılan asfalt betonu numuneleri 24 saat bekletildikten sonra pürüzlü yüzeyleri eğe ile temizlenir. Numune yükseklikleri kumpas ile üç noktadan 360°/3 = 120° lik açı yapacak şekilde ölçülür ve kaydedilir.




**Şekil 5.26.** Marshall stabilite ve akma deneyi numune yüksekliklerinin ölçülmesi

Marshall stabilite deneyine başlanmadan önce numunelerin havadaki ve sudaki ağırlıkları tartılarak kaydedilir. Sonra asfalt betonu numuneleri 60°C sıcaklığa ayarlanmış su banyosunda 30 - 40 dk kadar bekletilir. Su banyosundan çıkarılan numuneler kurutma bezi ile kurulanır ve Marshall test cihazına yerleştirilir. Cihaz çalıştırılarak 50 mm/dk hız ile yükleme başlar gözle görülür deformasyon sağlandığında cihaz durdurulur. Elde edilen stabilite ve akma değerleri not edilir. Numunenin su banyosundan çıkarılması ve deneyin tamamlanma süresi her numune için 30 saniyeyi geçmemelidir (Yıldırım, 2020; Nouman, 2022).




**Şekil 5.27.** Su banyosu, kurulama işlemi, Marshall test cihazı ve kırılmış numuneler

### 5.5.1.4. Hesaplama

Marshall stabilite ve akma deneyi yapıldıktan sonra optimum bitüm oranı tayini için gerekli tüm veriler elde edilmiş olur. Elde edilen veriler test föylerine işlenir her numune için fiziksel ve mekanik özellikler föylerde belirtilen çeşitli hesaplamalar ile bulunur. Numuneler farklı yüksekliklerde olduğu için düzeltme faktörü kullanılmalıdır. Ortalama yükseklik 63,5 mm ve düzeltme faktörü 1 olarak kabul edilir. Briket yüksekliği 63,5 mm'den fazla ise düzeltme faktörü < 1 ve briket yüksekliği 63,5 mm'den az ise düzeltme faktörü > 1 olmak koşuluyla Marshall faktörlerinin bulunduğu çizelgeden seçilir. Karışım içerisindeki agregaların özgül ağırlık ve teorik özgül ağırlık değerleri ise aşağıda verilen formüller ile hesaplanmaktadır.

$$G_{ag} = \frac{1}{\frac{\%KA}{G_{KA}} + \frac{\%İA}{G_{İA}} + \frac{\%F}{G_F}} \qquad (\mathbf{5.14})$$

$$D_t = \frac{100 + \%B}{\frac{\%KA}{G_{KA}} + \frac{\%İA}{G_{İA}} + \frac{\%F}{G_F} + \frac{\%B}{G_B}} \qquad (\mathbf{5.15})$$

Formülde;

$G_{ag}$: Agrega özgül ağırlığı (kg/m$^3$)

$D_t$: Maksimum teorik özgül ağırlık (kg/m$^3$)

%KA: Karışımda kullanılan kaba agrega yüzdesi

%İA: Karışımda kullanılan ince agrega yüzdesi

%F: Karışımda kullanılan filler yüzdesi

%B: Karışımda kullanılan bitüm yüzdesi

$G_{KA}$: Kaba agrega özgül ağırlığı (g/cm$^3$)

$G_{İA}$: İnce agrega özgül ağırlığı (g/cm$^3$)

$G_F$: Filler özgül ağırlığı (g/cm$^3$)

$G_B$: Bitüm özgül ağırlığı (g/cm$^3$)

Her bir numune için pratik özgül ağırlık (PÖA), boşluk oranı (V), Marshall dayanımı (MS), bitümle dolu boşluk oranı (VFA), agregalar arası boşluk oranı (VMA) ve akma

değerlerinin bulunması sonucunda grafikler çizilerek Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)'ne göre optimum bitüm oranı (OBO) tayini yapılmıştır.

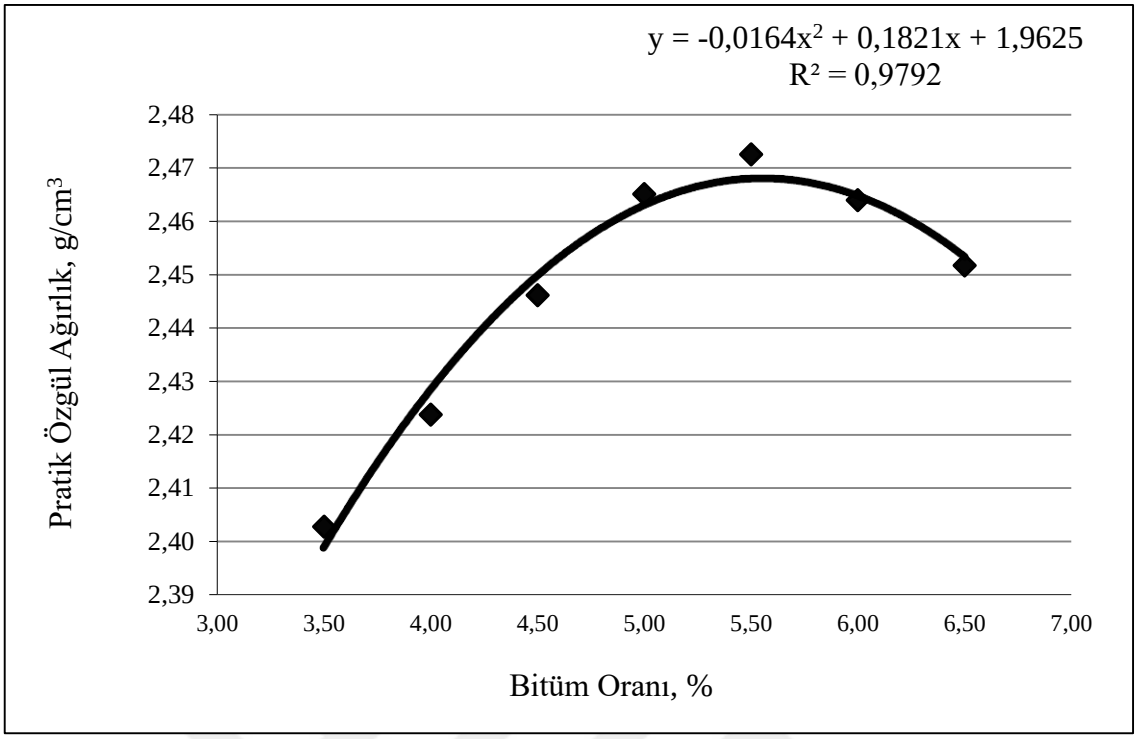
**Çizelge 5.18.** Marshall tasarım kriterleri (KTŞ, 2013)

| **Deney** | **Bitüm oranı** | |
|---|---|---|
| Kaplama türü | Binder | Aşınma |
| Pratik Özgül Ağırlık (g/cm$^3$) | Max | Max |
| Marshall Dayanımı (kg) | Min. 750 | Min. 900 |
| Boşluk Oranı (%) | 4-6 | 3-5 |
| Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%) | 60-75 | 65-75 |
| Agregalar Arası Boşluk Oranı (%) | Min. 13 | Min. 14 |
| Akma (mm) | 2-4 | 2-4 |

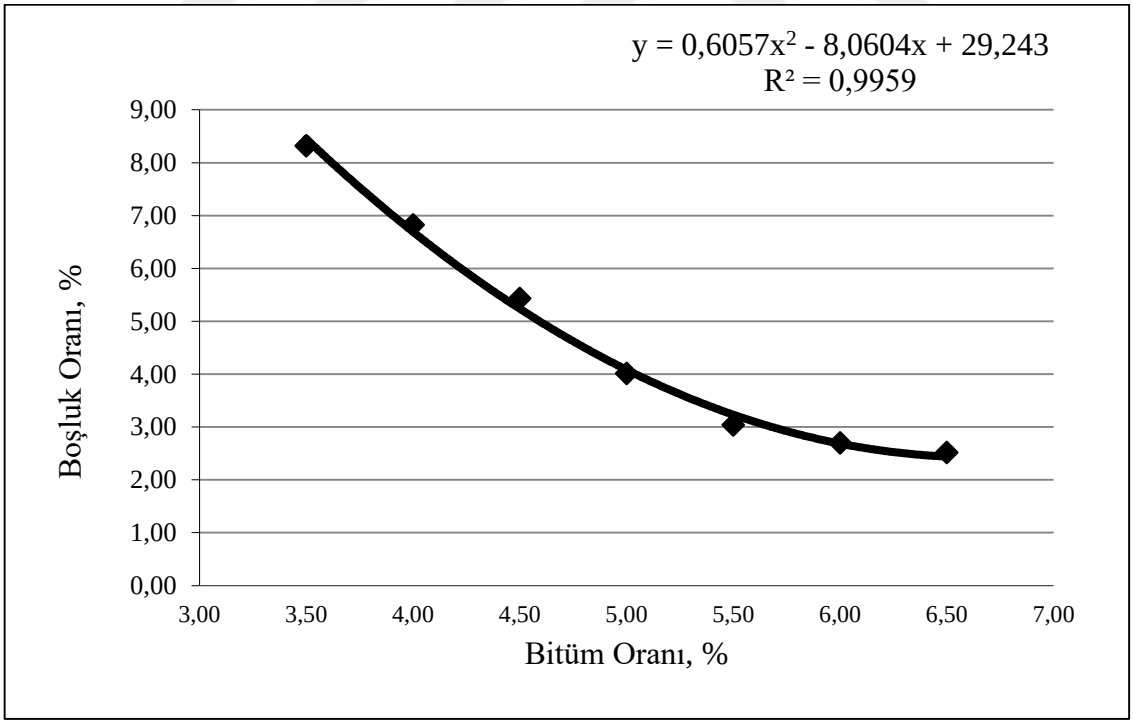
Bir adet kontrol olmak üzere %10, %20, %30 ve %40 yer seramik atığı içeren 5 adet döküm yapılmıştır. Tüm dökümlerde 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Tez kapsamında yapılan Marshall dökümlerine ait sonuçlar aşağıda verilmiştir.

**Çizelge 5.19.** Kontrol numunesi deney sonuçları

| **Kontrol %0 Atık 50/70** | **Bitüm Oranı (%)** | **Pratik Özgül Ağırlık (g/cm$^3$)** | **Boşluk Oranı (%)** | **Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)** | **Marshall Stabilite (kg)** | **Akma (mm)** | **MQ** | **VMA (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 3,5 | 2,403 | 8,320 | 48,280 | 1860,170 | 2,727 | 657,960 | 16,370 |
| **2** | 4 | 2,424 | 6,820 | 56,510 | 1867,970 | 2,744 | 673,500 | 16,050 |
| **3** | 4,5 | 2,446 | 5,430 | 63,950 | 1883,720 | 2,974 | 586,670 | 15,870 |
| **4** | 5 | 2,465 | 4,010 | 74,010 | 1690,330 | 3,479 | 429,600 | 15,470 |
| **5** | 5,5 | 2,473 | 3,040 | 80,510 | 1360,220 | 4,186 | 334,620 | 15,690 |
| **6** | 6 | 2,464 | 2,700 | 83,420 | 1111,340 | 4,989 | 224,670 | 16,290 |
| **7** | 6,5 | 2,452 | 2,520 | 85,270 | 1023,080 | 5,946 | 172,600 | 17,170 |

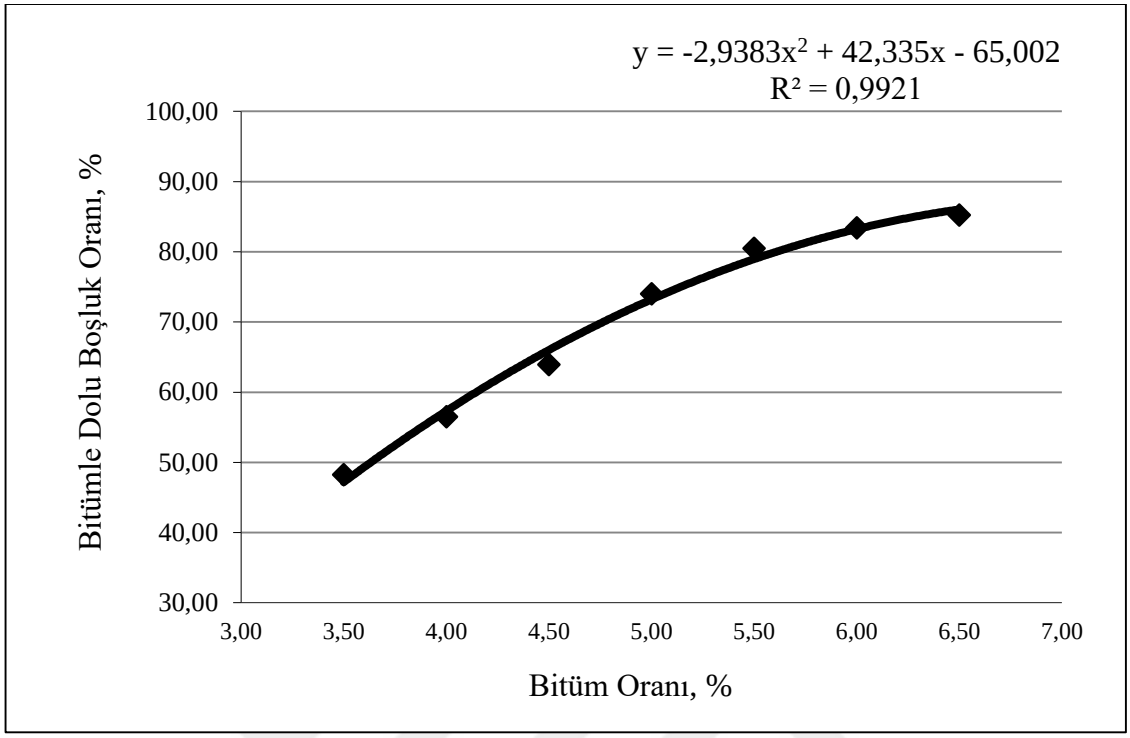



**Şekil 5.28.** Bitüm oranı-pratik özgül ağırlık (kontrol numunesi)




**Şekil 5.29.** Bitüm oranı- boşluk oranı (kontrol numunesi)

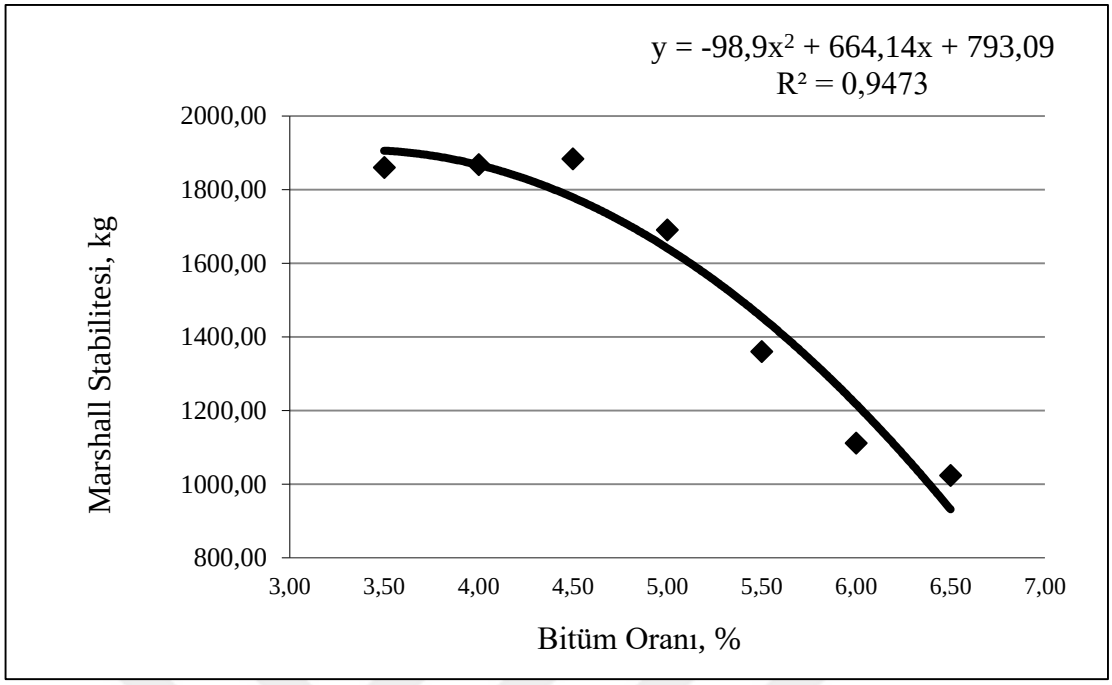
Boşluk oranı bitüm yüzdesi arttıkça boşluklara bitüm dolması nedeniyle azalma göstermektedir. Şartnamede boşluk oranının %3 ile %5 arasında olması istenmektedir.



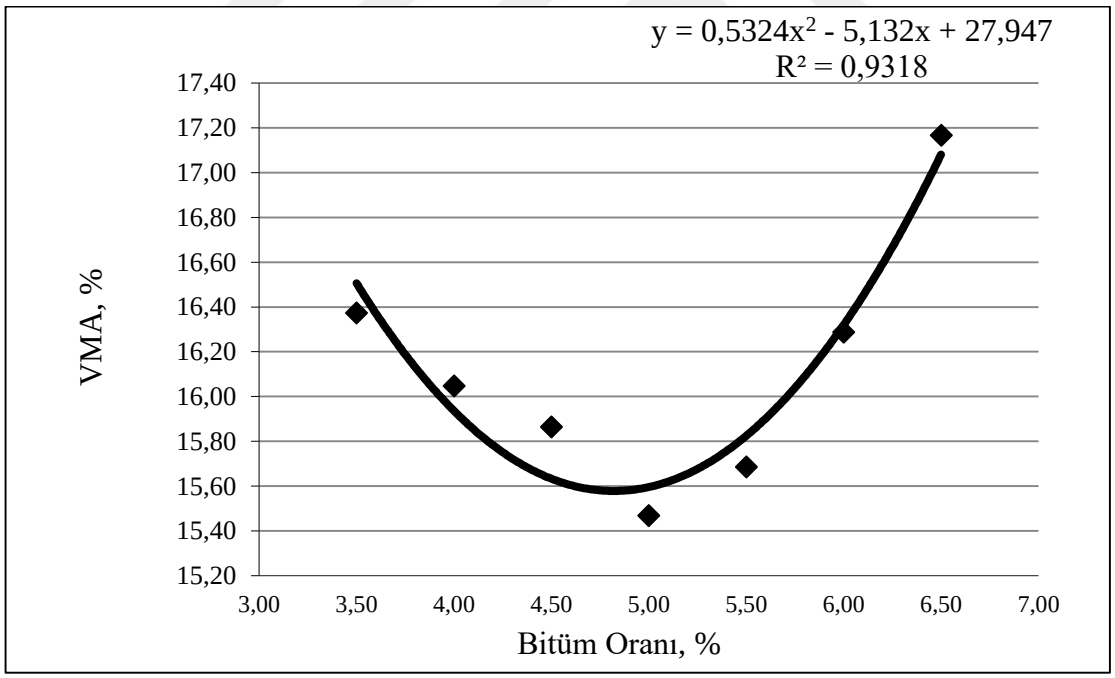

**Şekil 5.30.** Bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı (kontrol numunesi)

Bitümle dolu boşluk oranı daneler arasındaki boşlukların bitümle dolu boşluklara yüzdesi olarak alınır. Şartname sınırları %65 ile %75 arasındadır. Değer daha az ise bitümün olması gerektiğinden az kullanıldığı anlaşılır. Agregayı çevrelen bitüm film tabakasının az olması kaplamanın kırılganlığını artırır ve hava koşullarına karşı performansını düşürmektedir. Bitümle dolu boşluk oranının limit değerlerin üzerinde bir orana sahip olması ise sıcak havalarda kaplamada kusmaların oluşmasına ve asfalt betonunun trafik yüklerine karşı direncinin azalmasına neden olacaktır (Öksüz, 2011).

Numunenin kırılmasına neden olan maksimum yük miktarına Marshall stabilitesi adı verilir. Bitüm oranı arttıkça Marshall stabilite değeri azalmaktadır. Şekil 5.30. da gösterildiği gibi bir maksimum nokta değeri yakalanamazsa bitüm oranını tayin edebilmek için %7 bitüm oranı kullanılarak da numune dökümü gerçekleştirilir (Karacasu, 2016).

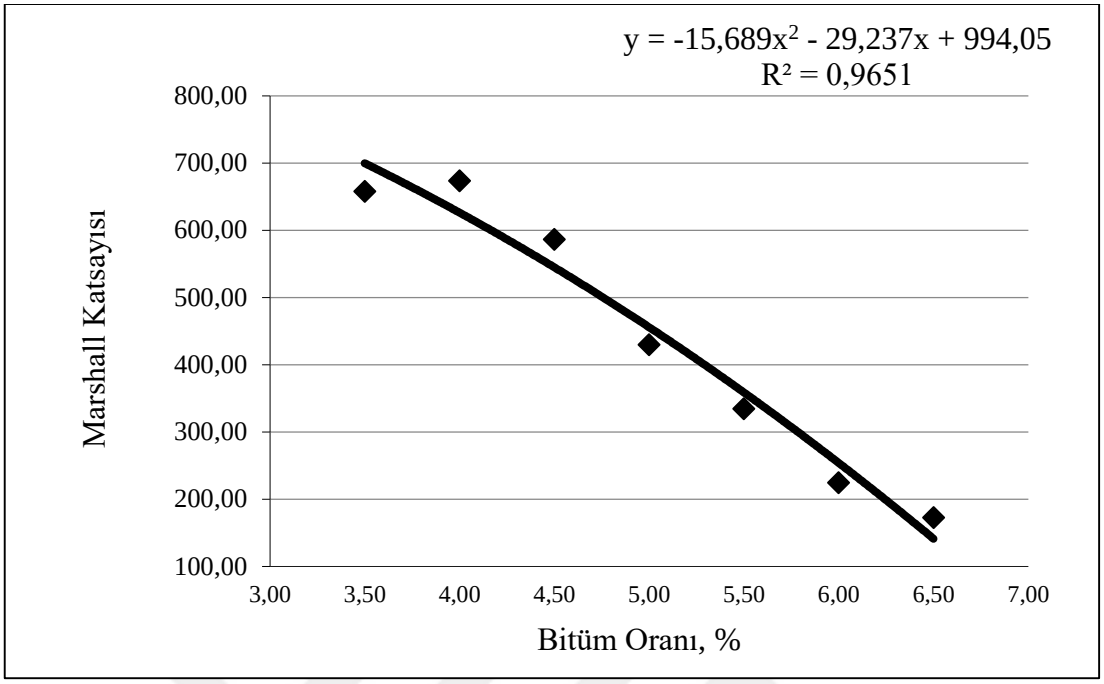



**Şekil 5.31.** Bitüm oranı- Marshall stabilitesi (kontrol numunesi)

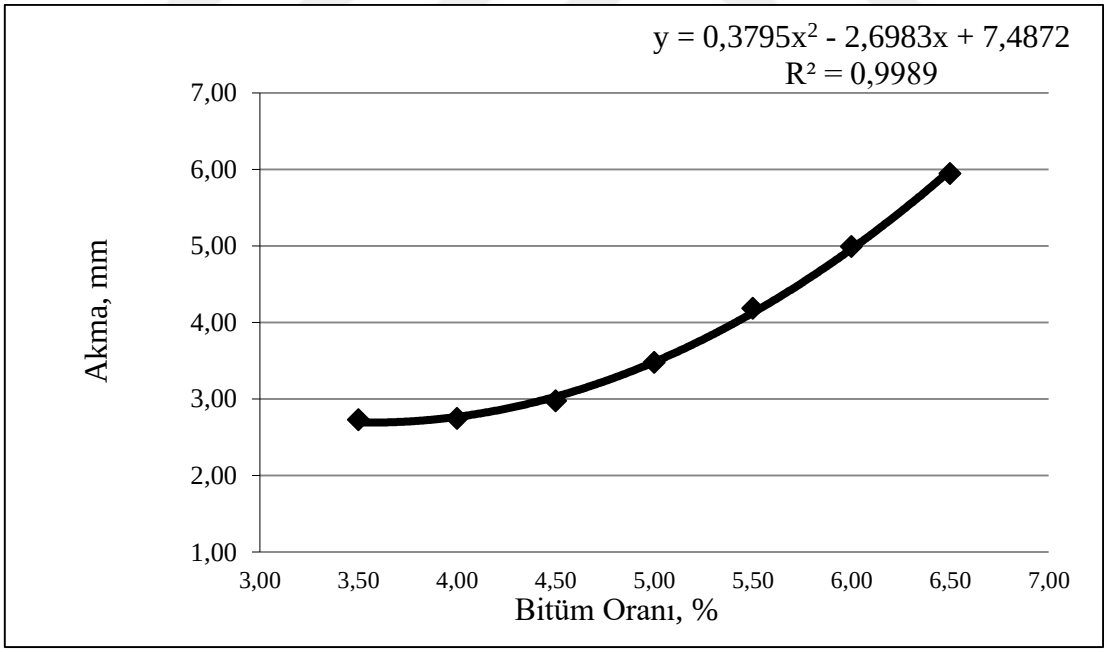



**Şekil 5.32.** Bitüm oranı- VMA (kontrol numunesi)

Agregalar arası boşluk oranı (VMA), hava boşluğunu ve efektif bitüm yüzdesini içerir. Agrega hacim özgül ağırlığı esas alınarak toplam hacmin yüzdesi olarak hesaplanmaktadır (Ilıcalı vd., 2001).




**Şekil 5.33.** Bitüm oranı- Marshall katsayısı (kontrol numunesi)




**Şekil 5.34.** Bitüm oranı- akma (kontrol numunesi)

Asfalt betonu numunelerinde akma değeri yük altında oluşan deformasyonu ve malzeme davranışını belirleyen, malzemenin plastiklik ve esneklik özelliklerini kontrol eden

değerdir (Umar ve Ağar, 1991). 2013 Karayolları Teknik Şartnamesine göre akma değeri 2 mm ile 4 mm arasında olmalıdır.

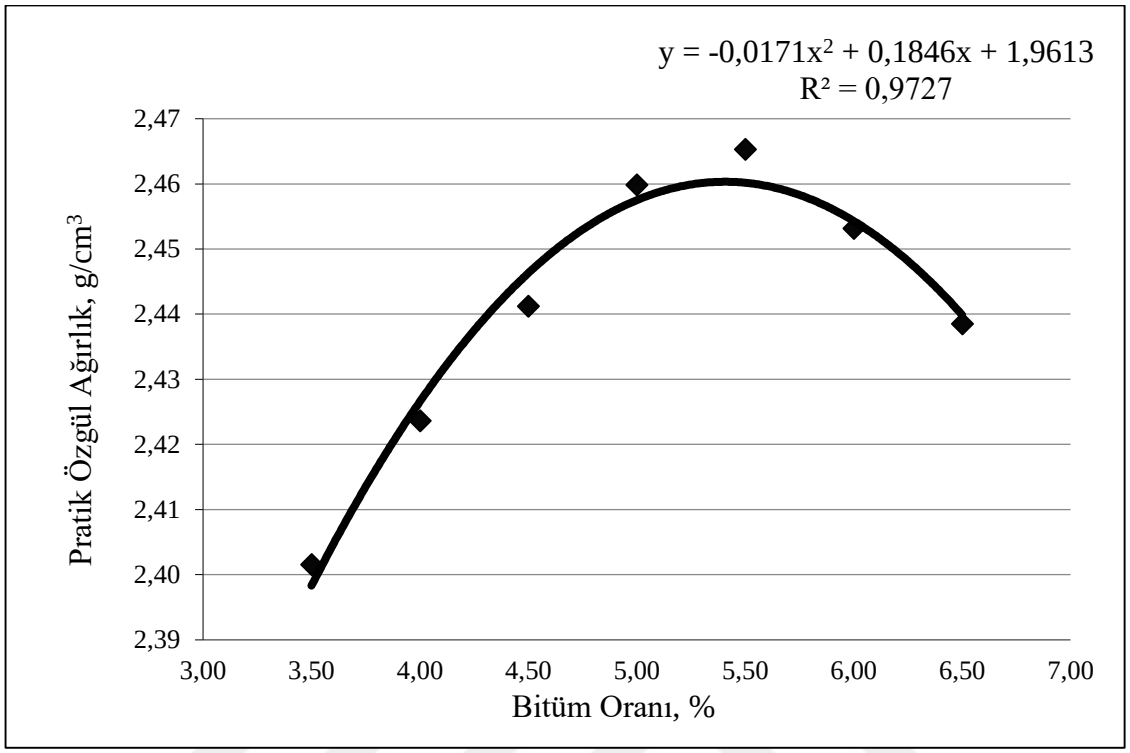
**Çizelge 5.20.** Kontrol numunesi için optimum bitüm oranı tayini

| **Optimum Bitüm Oranı** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Değişken | Standart | Bitüm Oranı | Bitüm Oranı Denklem Değeri | Optimum Bitüm Oranı Değeri |
| Pratik Özgül Ağırlık | maks | 5,55 | 2,47 | 2,46 |
| Boşluk Oranı | 4 | 5,04 | 4,00 | 4,79 |
| Bitümle Dolu Boşluk Oranı | 70 | 4,76 | 70,00 | 68,76 |
| Marshall Stabilitesi | maks | 3,36 | 1908,06 | 1735,38 |
| Akma Değeri | 2-4 | - | - | 3,17 |
| Agregalar Arası Boşluk Oranı | 14-16 | - | - | 15,59 |
| ORTALAMA | | **4,68** | | |

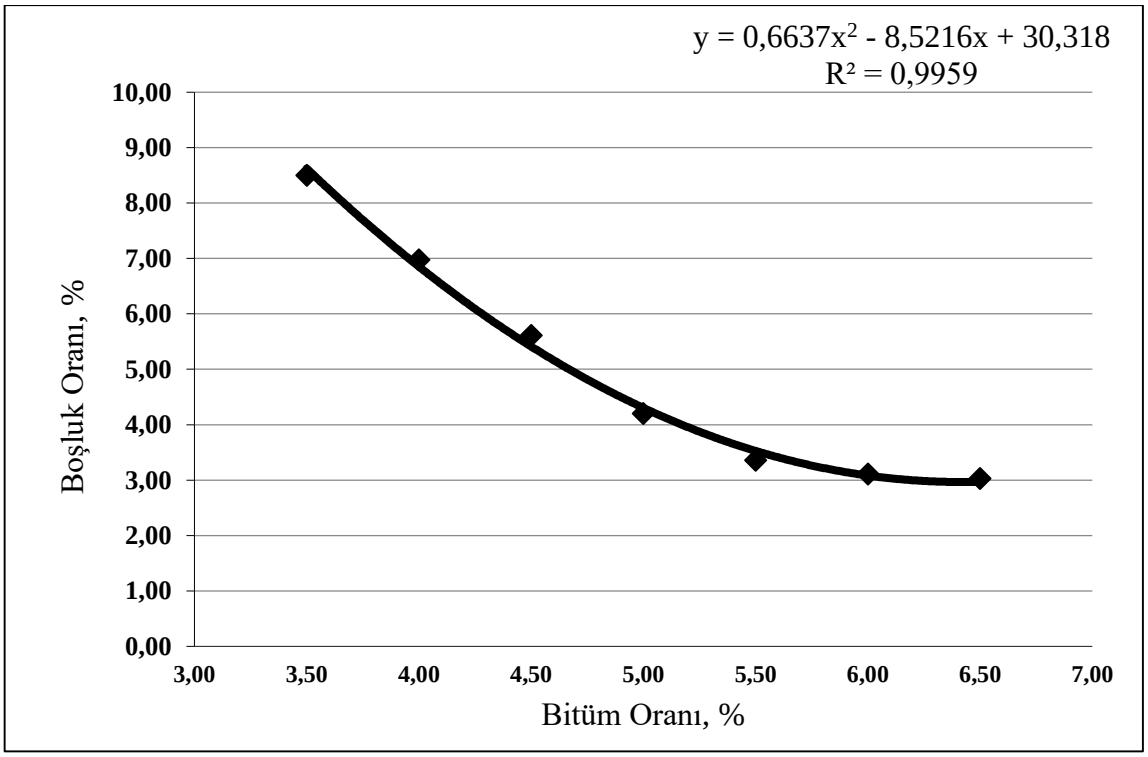
Çizelge 5.20. de gösterildiği üzere optimum bitüm oranı değişkenlerin tamamı için hesaplandıktan sonra hesaplanan değerlerin ortalaması alınmıştır. Kontrol numunesi için optimum bitüm oranı değeri %4,68 olarak bulunmuştur.

**Çizelge 5.21.** %10 yer seramik atığı içeren asfalt betonu deney sonuçları

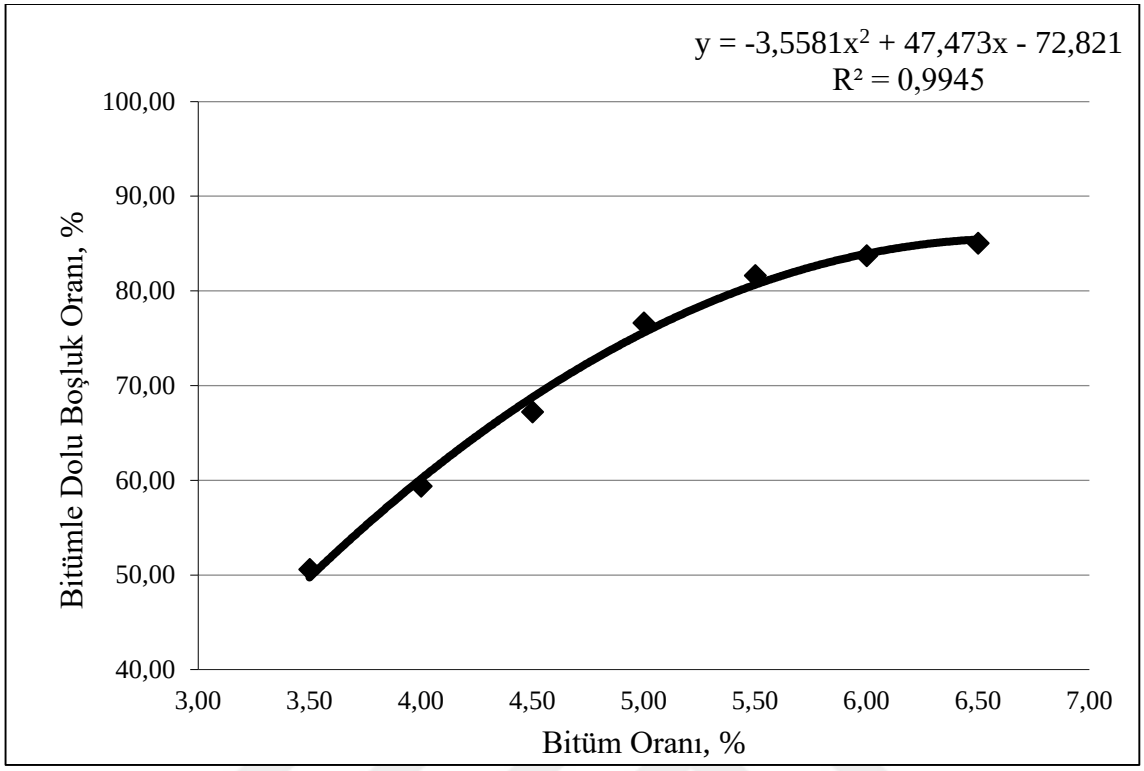
| **%10 Atık 50/70** | **Bitüm Oranı (%)** | **Pratik Özgül Ağırlık (g/cm3)** | **Boşluk Oranı (%)** | **Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)** | **Marshall Stabilite (kg)** | **Akma (mm)** | **MQ** | **VMA (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 3,5 | 2,402 | 8,500 | 50,600 | 1842,470 | 2,402 | 795,080 | 15,910 |
| **2** | 4 | 2,424 | 6,970 | 59,370 | 1913,850 | 2,490 | 848,290 | 15,550 |
| **3** | 4,5 | 2,441 | 5,610 | 67,220 | 1923,070 | 2,717 | 652,090 | 15,340 |
| **4** | 5 | 2,460 | 4,200 | 76,620 | 1733,550 | 3,568 | 506,760 | 15,100 |
| **5** | 5,5 | 2,465 | 3,360 | 81,630 | 1431,990 | 4,505 | 323,550 | 15,320 |
| **6** | 6 | 2,453 | 3,110 | 83,740 | 1168,860 | 5,356 | 225,580 | 16,130 |
| **7** | 6,5 | 2,438 | 3,030 | 85,060 | 1052,580 | 5,954 | 172,600 | 16,910 |



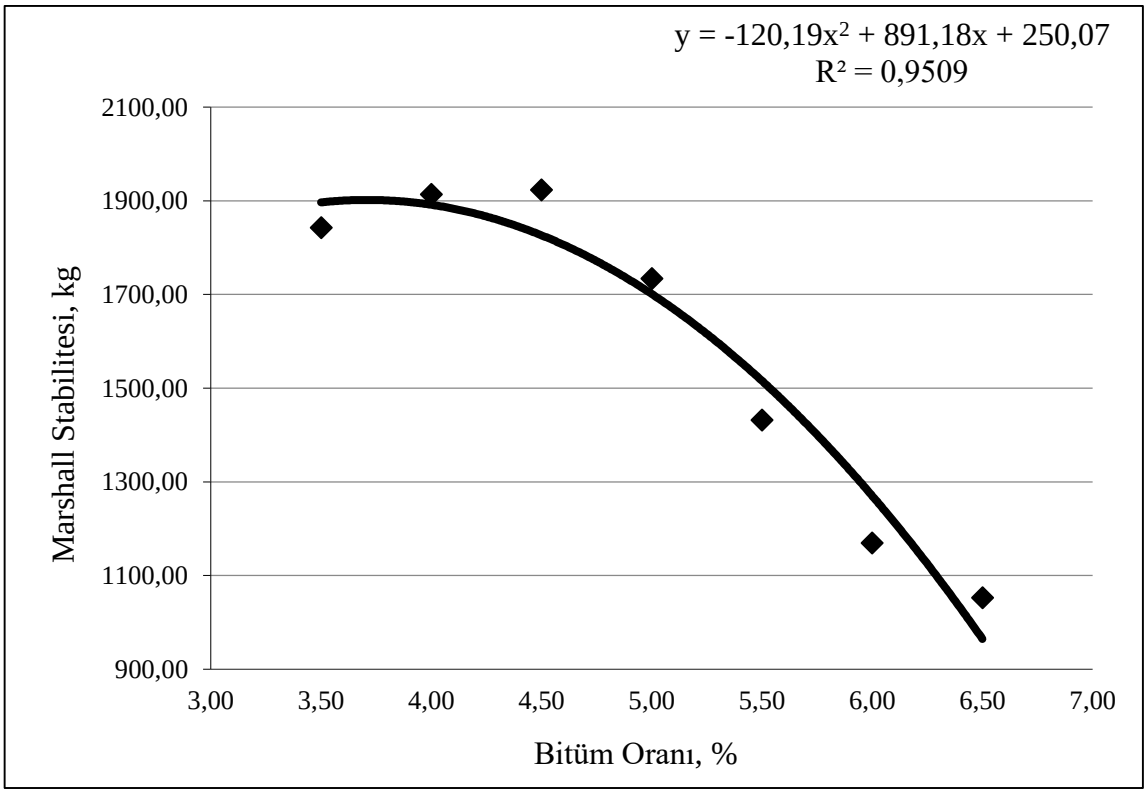

**Şekil 5.35.** Bitüm oranı- pratik özgül ağırlık (%10 yer seramik atık)



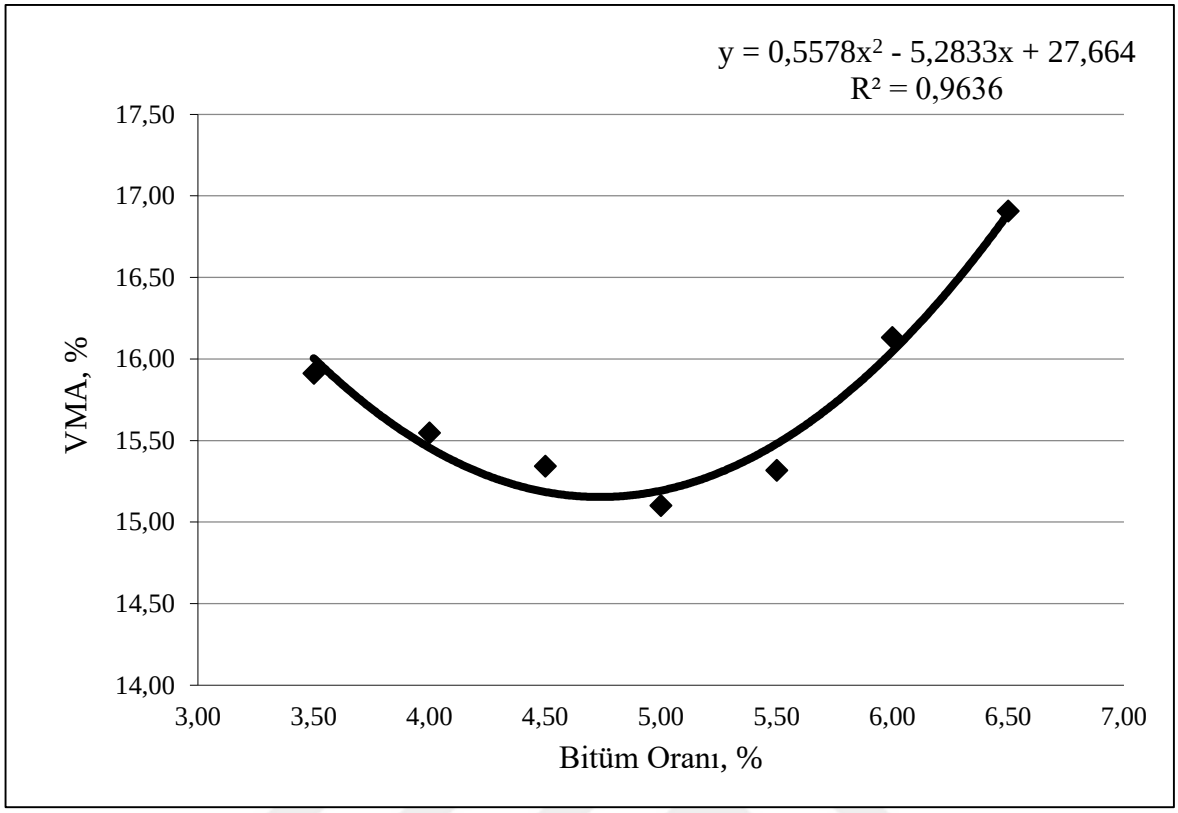

**Şekil 5.36.** Bitüm oranı- boşluk oranı (%10 yer seramik atık)



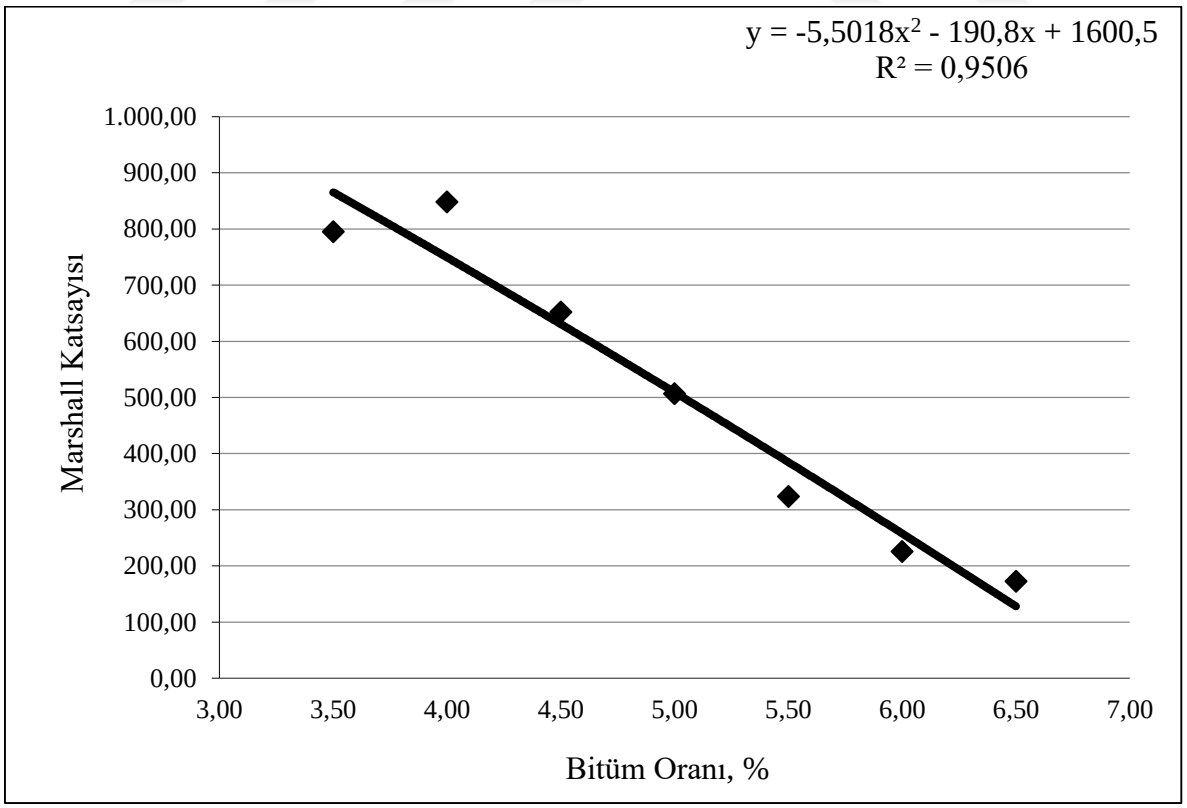

**Şekil 5.37.** Bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı (%10 yer seramik atık)



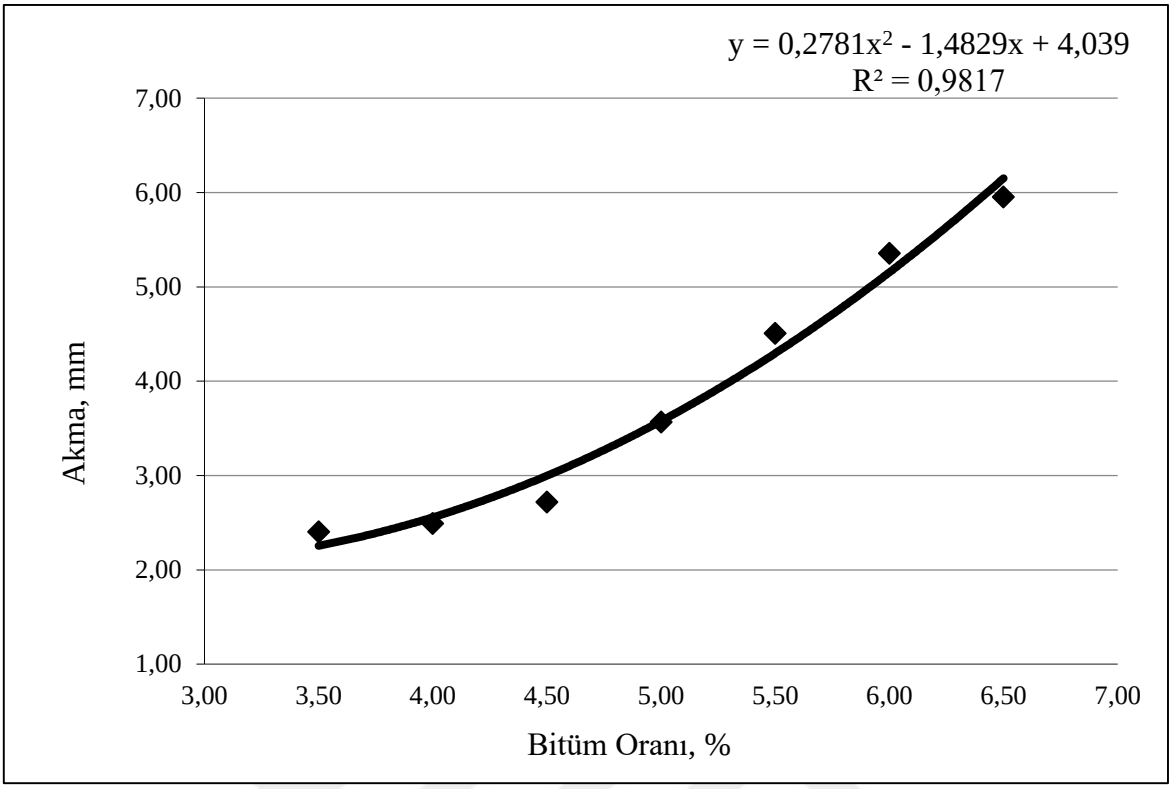

**Şekil 5.38.** Bitüm oranı- Marshall stabilitesi (%10 yer seramik atık )




**Şekil 5.39.** Bitüm oranı- VMA (%10 yer seramik atık )




**Şekil 5.40.** Bitüm oranı- Marshall katsayısı (%10 yer seramik atık )




**Şekil 5.41.** Bitüm oranı- akma değeri (%10 yer seramik atık )

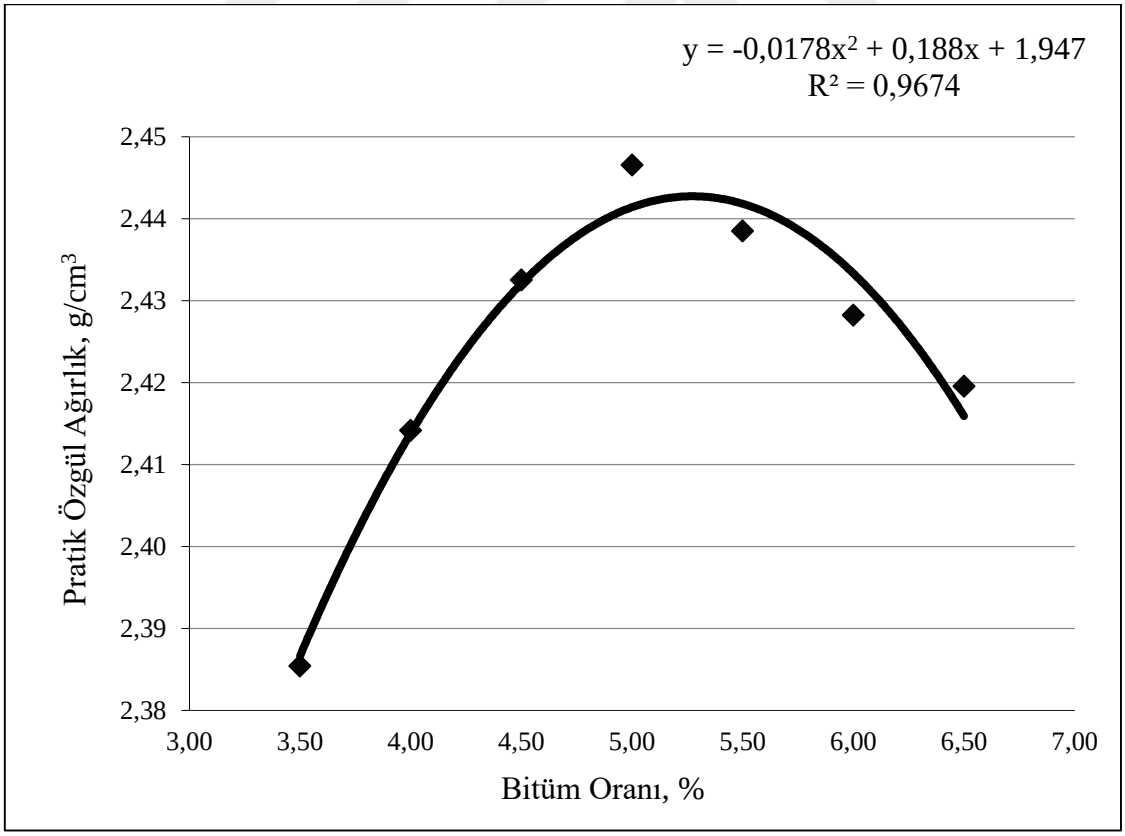
**Çizelge 5.22.** %10 yer seramik atığı içeren karışım için optimum bitüm oranı tayini

| **Optimum Bitüm Oranı** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Değişken | Standart | Bitüm Oranı | Bitüm Oranı Denklem Değeri | Optimum BitümOranı Değeri |
| Pratik Özgül Ağırlık | maks | 5,40 | 2,46 | 2,45 |
| Boşluk Oranı | 4 | 5,17 | 4,00 | 4,89 |
| Bitümle Dolu Boşluk Oranı | 70 | 4,58 | 70,00 | 71,91 |
| Marshall Stabilitesi | maks | 3,71 | 1902,04 | 1780,14 |
| Akma | 2-4 | - | - | 3,23 |
| Agregalar Arası Boşluk Oranı | 14-16 | - | - | 15,15 |
| ORTALAMA | | **4,71** | | |

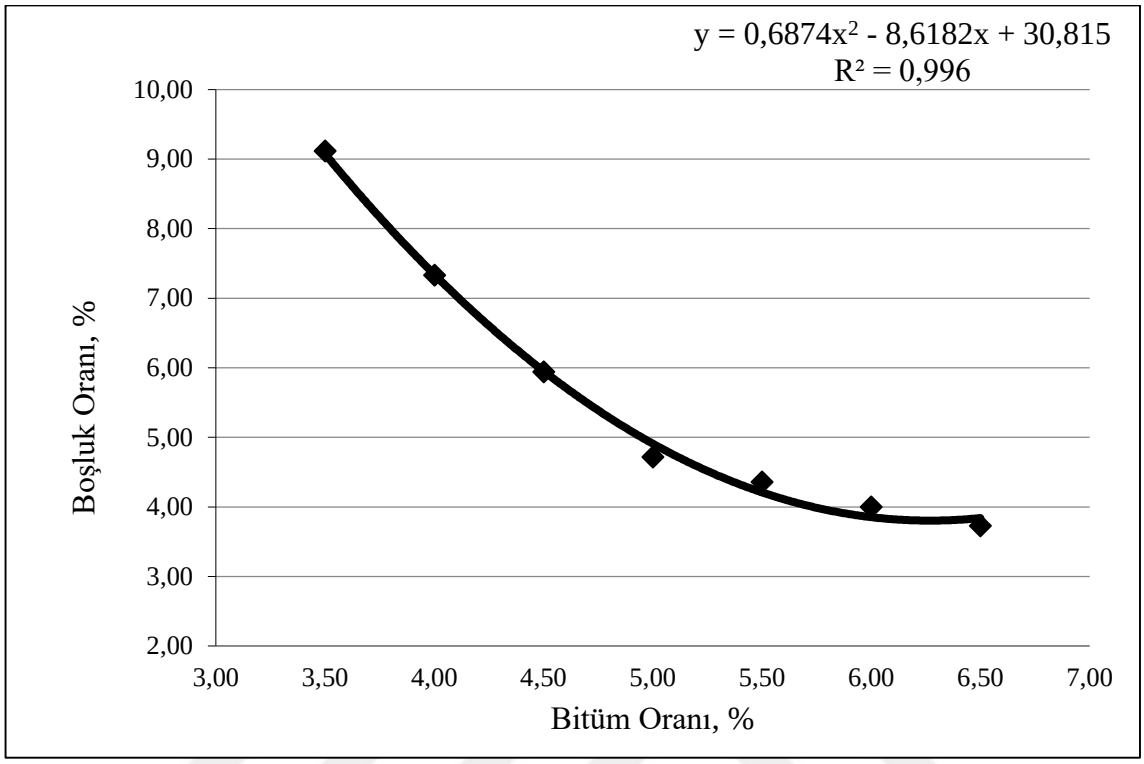
Çizelge 5.22. de %10 oranında yer seramik atığı içeren asfalt betonu numunelerinin optimum bitüm oranı %4,71 olarak bulunmuştur.

**Çizelge 5.23.** %20 yer seramik atığı içeren asfalt betonu deney sonuçları

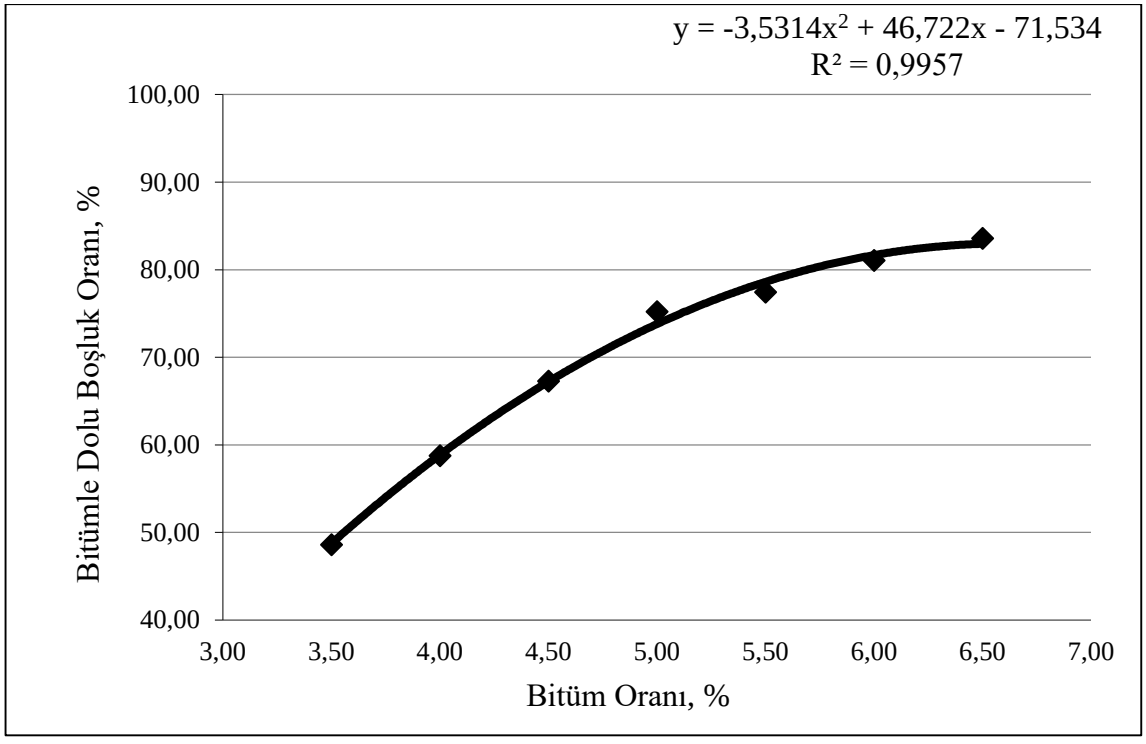
| %20 Atık 50/70 | Bitüm Oranı (%) | Pratik Özgül Ağırlık (g/cm3) | Boşluk Oranı (%) | Bitüm İle Dolu Boşluk Oranı (%) | Marshall Stabilite (kg) | Akma (mm) | MQ | VMA (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 3,5 | 2,385 | 9,110 | 48,570 | 2468,330 | 2,639 | 853,000 | 15,990 |
| **2** | 4 | 2,414 | 7,330 | 58,750 | 2550,360 | 2,682 | 878,310 | 15,580 |
| **3** | 4,5 | 2,433 | 5,940 | 67,260 | 2259,950 | 2,965 | 762,150 | 15,340 |
| **4** | 5 | 2,447 | 4,720 | 75,210 | 1974,840 | 3,908 | 479,900 | 15,110 |
| **5** | 5,5 | 2,439 | 4,350 | 77,420 | 1596,520 | 4,086 | 314,750 | 15,750 |
| **6** | 6 | 2,428 | 4,000 | 81,040 | 1436,850 | 5,079 | 261,780 | 16,230 |
| **7** | 6,5 | 2,420 | 3,720 | 83,570 | 1227,400 | 6,437 | 190,490 | 17,060 |



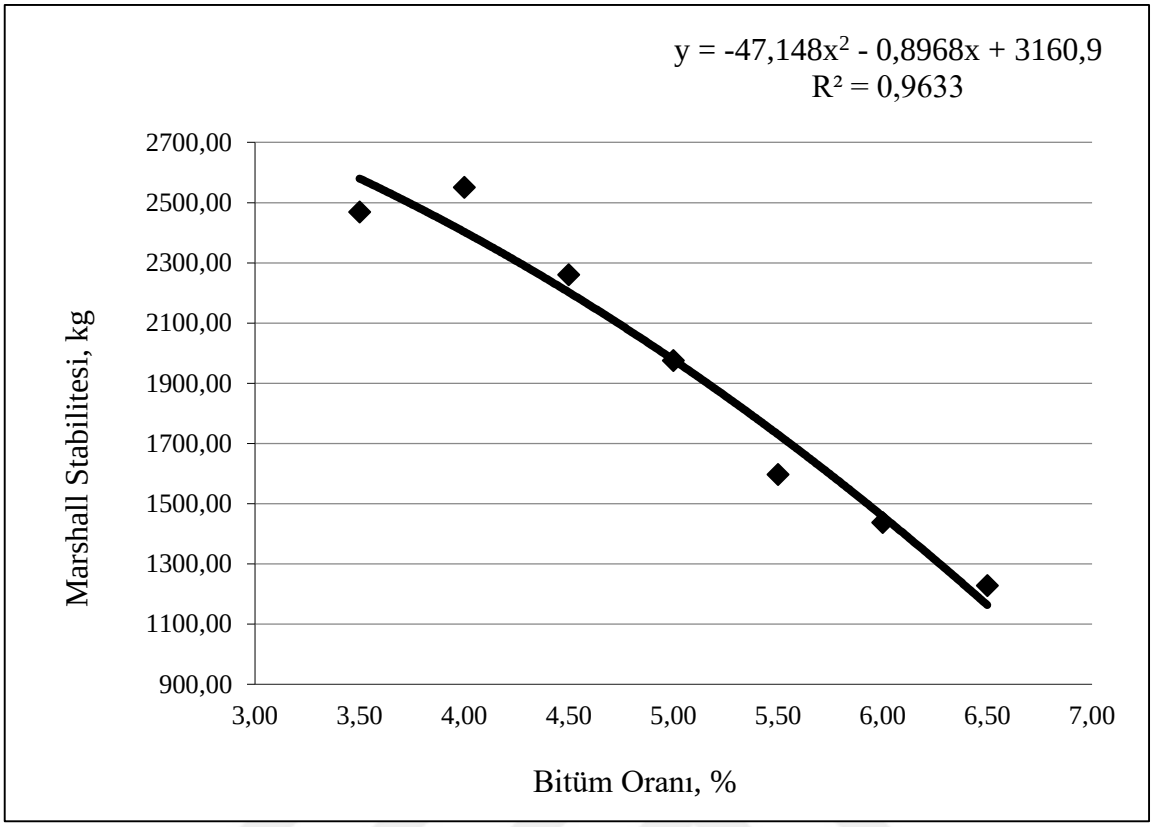

**Şekil 5.42.** Bitüm oranı- pratik özgül ağırlık (%20 yer seramik atık)



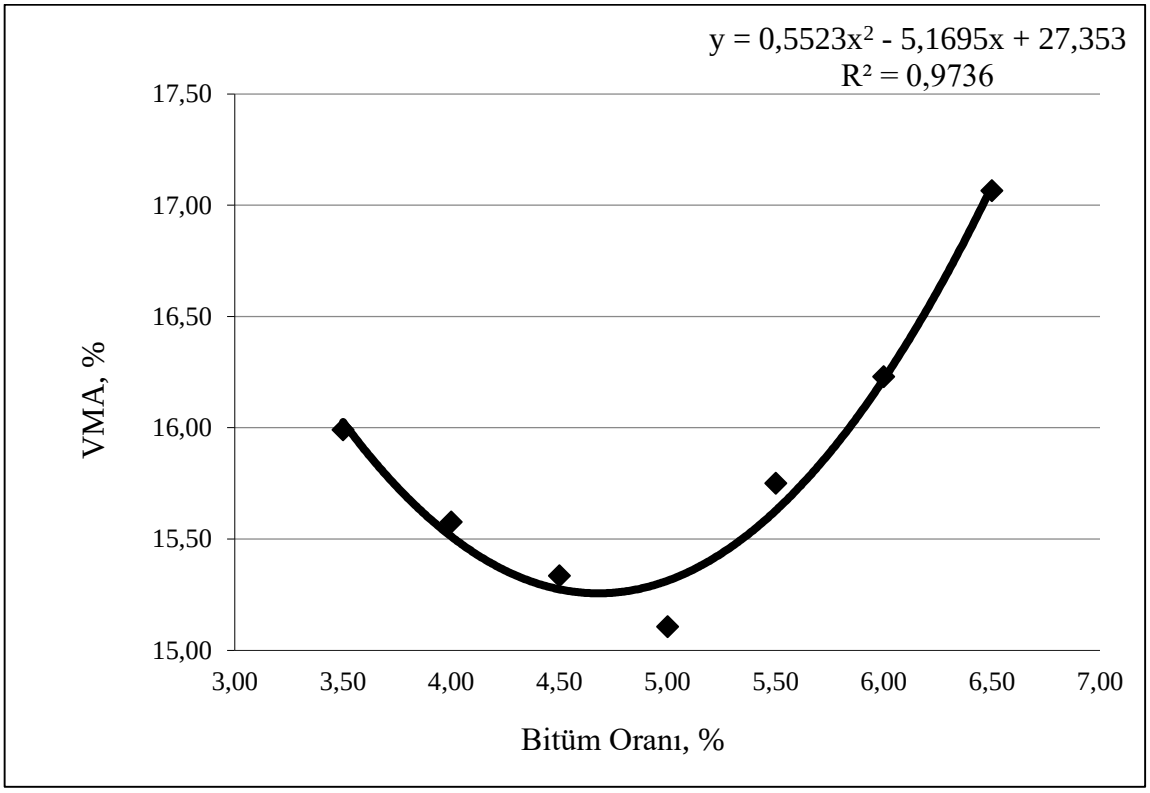

**Şekil 5.43.** Bitüm oranı- boşluk oranı (%20 yer seramik atık)



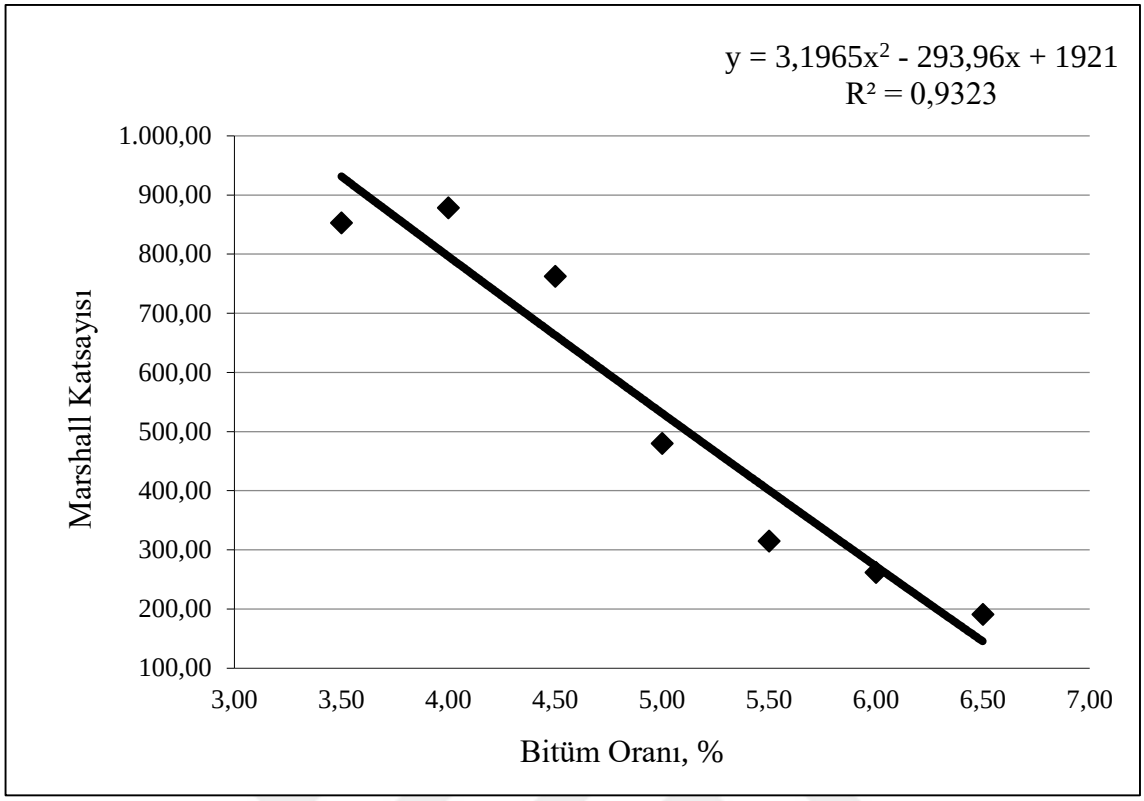

**Şekil 5.44.** Bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı (%20 yer seramik atık)



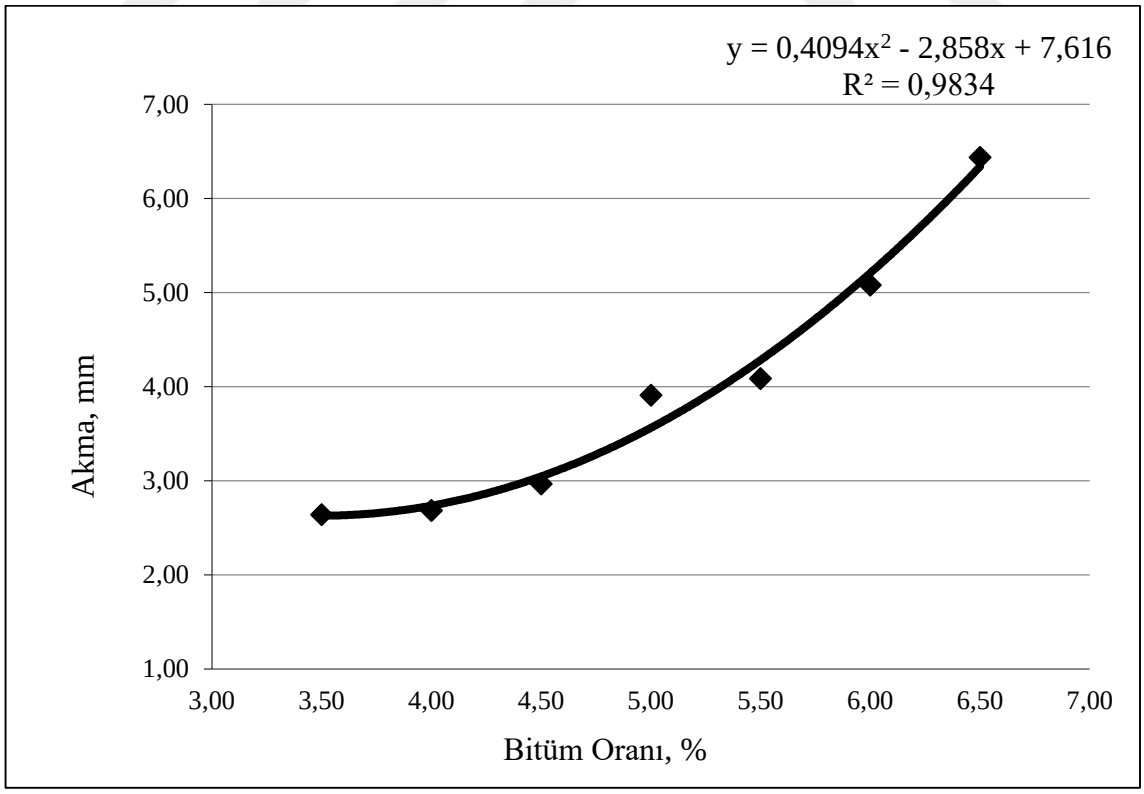

**Şekil 5.45.** Bitüm oranı- Marshall stabilitesi (%20 yer seramik atık)




**Şekil 5.46.** Bitüm oranı- VMA (%20 yer seramik atık)




**Şekil 5.47.** Bitüm oranı- Marshall katsayısı (%20 yer seramik atık)




**Şekil 5.48.** Bitüm oranı- akma değeri (%20 yer seramik atık)

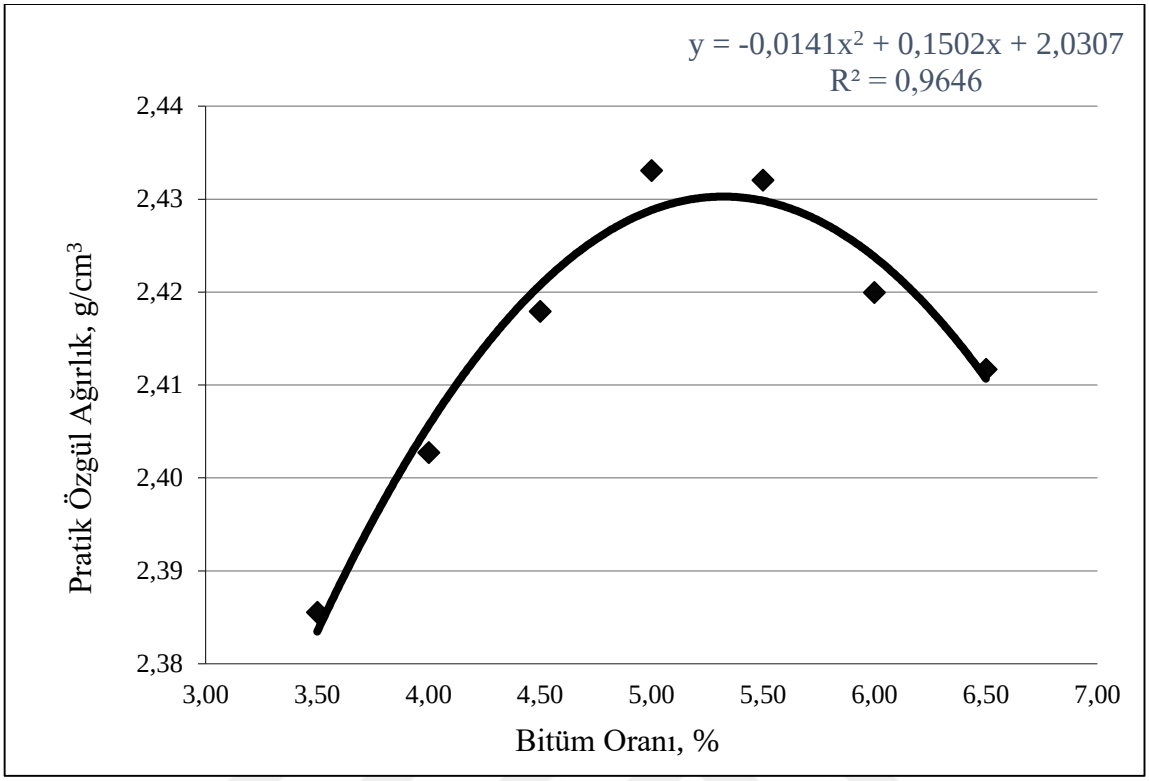
**Çizelge 5.24.** %20 yer seramik atığı içeren karışım için optimum bitüm oranı tayini

| **Optimum Bitüm Oranı** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Değişken | Standart | Bitüm Oranı | Bitüm Oranı Denklem Değeri | Optimum Bitüm Oranı Değeri |
| Pratik Özgül Ağırlık | maks | 5,28 | 2,44 | 2,44 |
| Boşluk Oranı | 4 | 5,73 | 4,00 | 5,24 |
| Bitümle Dolu Boşluk Oranı | 70 | 4,70 | 70,00 | 86,16 |
| Marshall Stabilitesi | maks | 3,59 | 2550,36 | 2059,05 |
| Akma | 2-4 | - | - | 3,36 |
| Agregalar Arası Boşluk Oranı | 14-16 | - | - | 15,27 |
| ORTALAMA | | **4,82** | | |

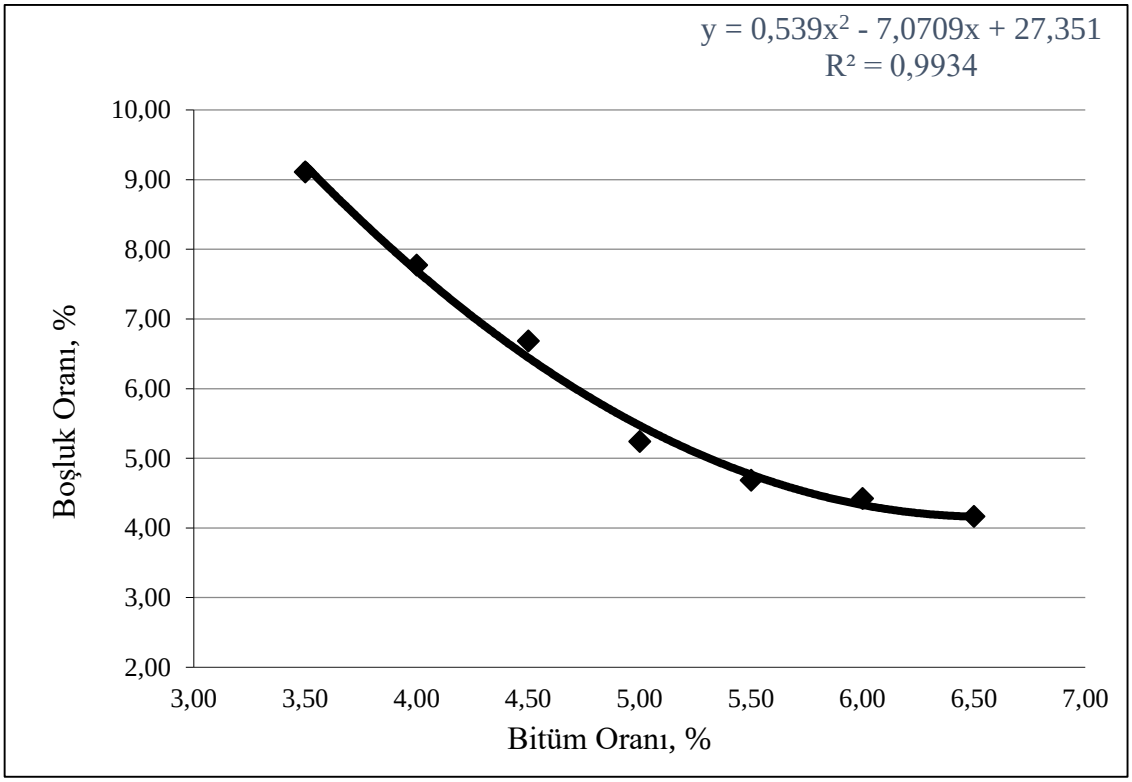
Çizelge 5.24. de %20 oranında yer seramik atığı içeren asfalt betonu numunelerinin optimum bitüm oranı %4,82 olarak bulunmuştur.

**Çizelge 5.25.** %30 yer seramik atığı içeren asfalt betonu deney sonuçları

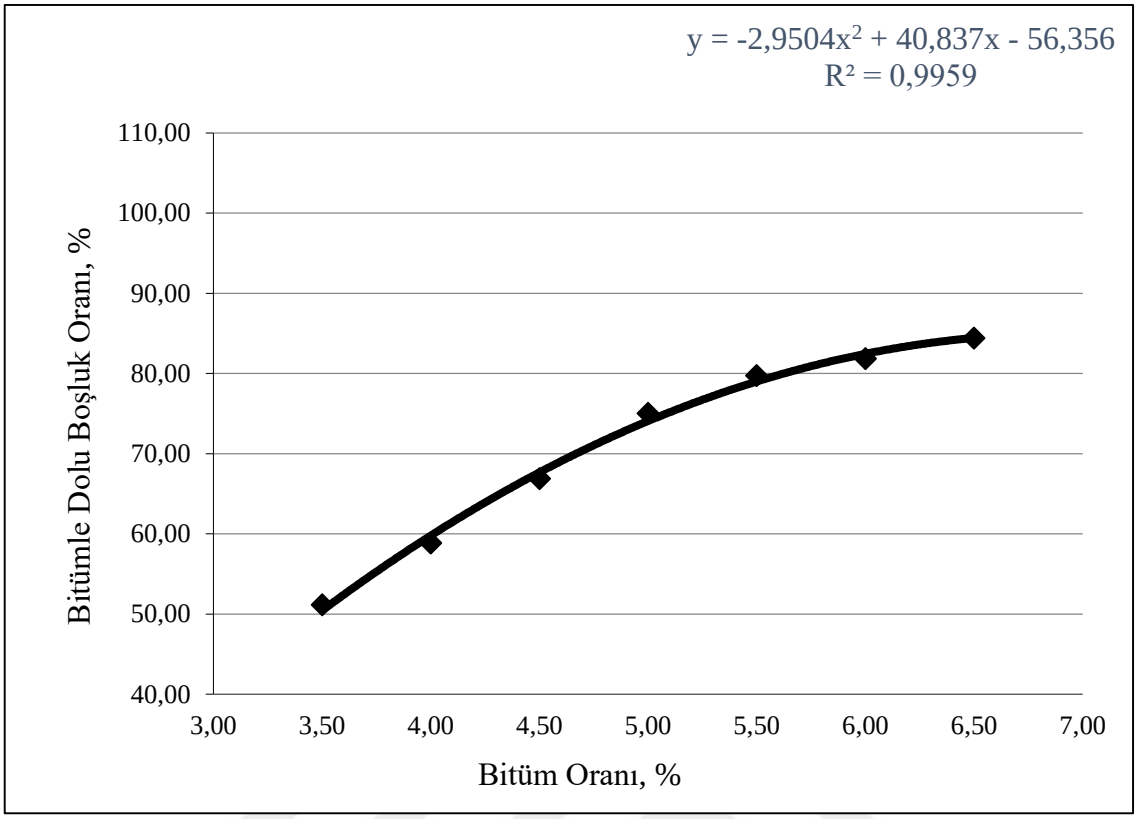
| **%30 Atık 50/70** | **Bitüm Oranı (%)** | **Pratik Özgül Ağırlık (g/cm3)** | **Boşluk Oranı (%)** | **Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%)** | **Marshall Stabilite (kg)** | **Akma (mm)** | **MQ** | **VMA (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 3,5 | 2,386 | 9,110 | 51,160 | 2295,970 | 2,909 | 798,860 | 15,780 |
| **2** | 4 | 2,403 | 7,770 | 58,830 | 2302,990 | 2,894 | 818,550 | 15,280 |
| **3** | 4,5 | 2,418 | 6,680 | 66,860 | 2189,070 | 2,898 | 748,410 | 15,150 |
| **4** | 5 | 2,433 | 5,240 | 75,010 | 1912,810 | 3,886 | 482,500 | 15,030 |
| **5** | 5,5 | 2,432 | 4,680 | 79,740 | 1531,140 | 4,520 | 323,500 | 15,470 |
| **6** | 6 | 2,420 | 4,420 | 81,830 | 1308,770 | 5,158 | 239,010 | 16,280 |
| **7** | 6,5 | 2,412 | 4,170 | 84,420 | 1158,230 | 6,269 | 170,480 | 16,960 |



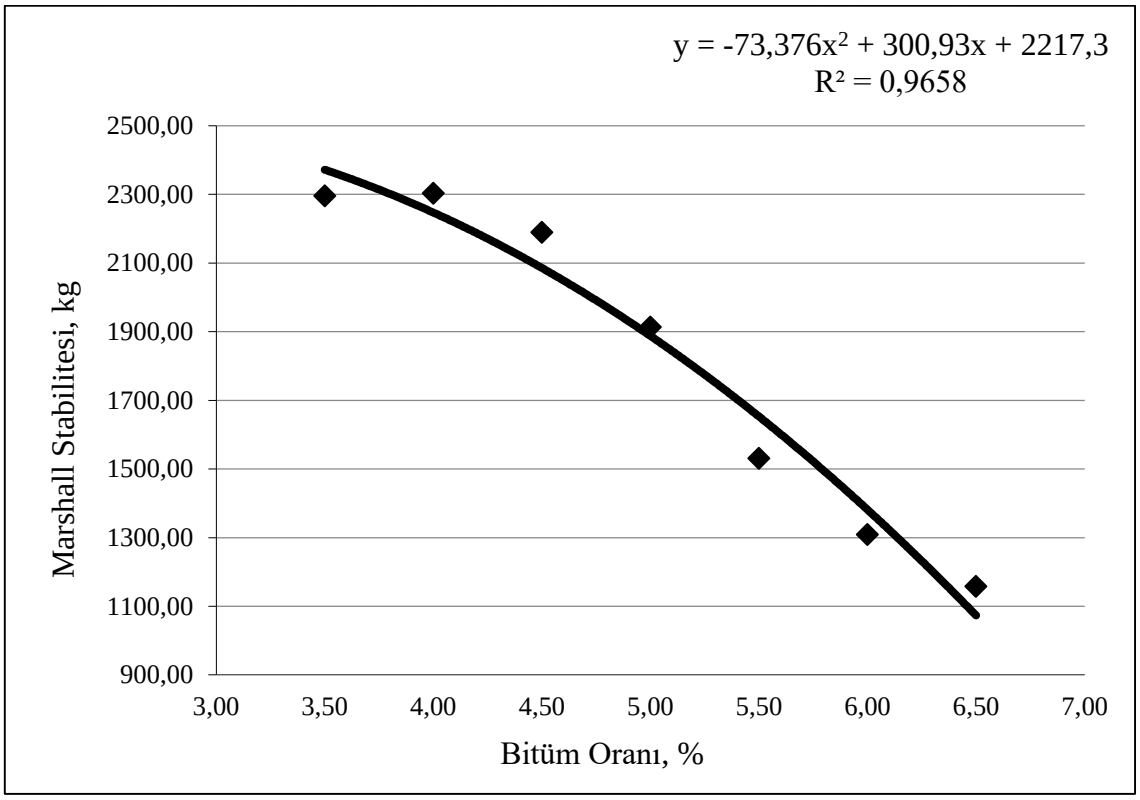

**Şekil 5.49.** Bitüm oranı- pratik özgül ağırlık (%30 yer seramik atık)



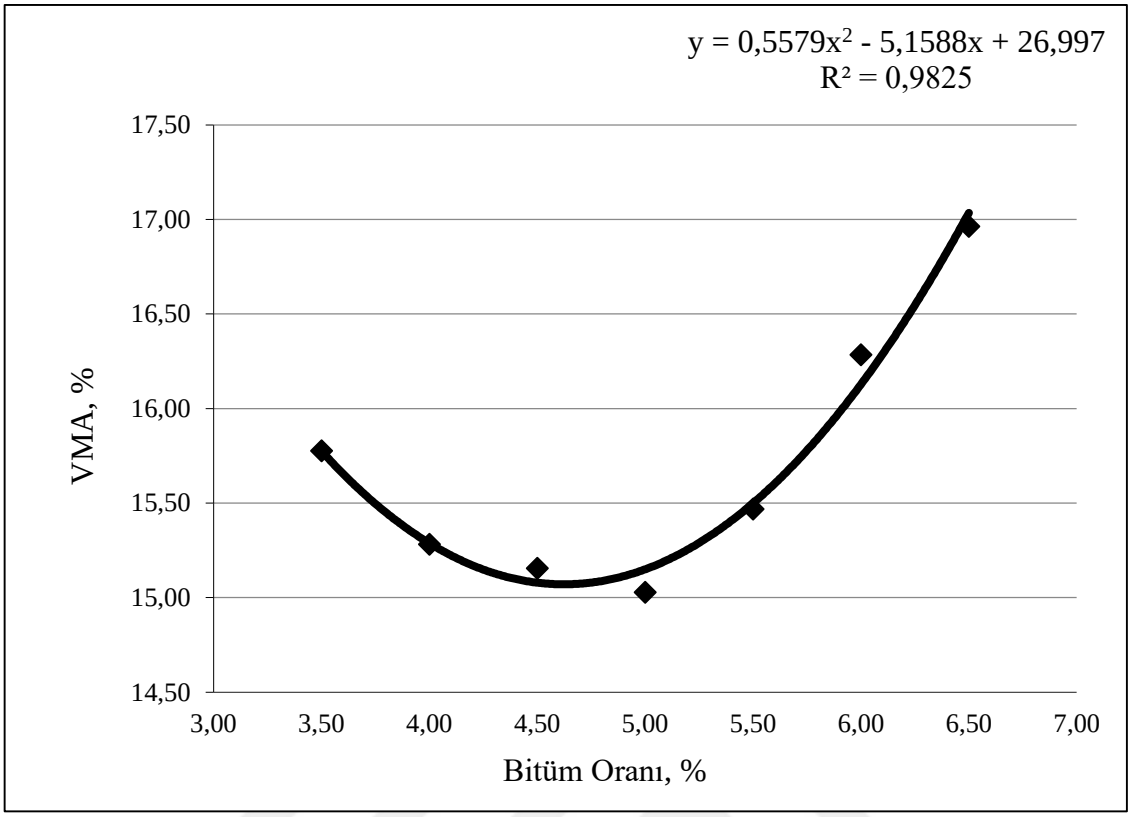

**Şekil 5.50.** Bitüm oranı- boşluk oranı (%30 yer seramik atık)



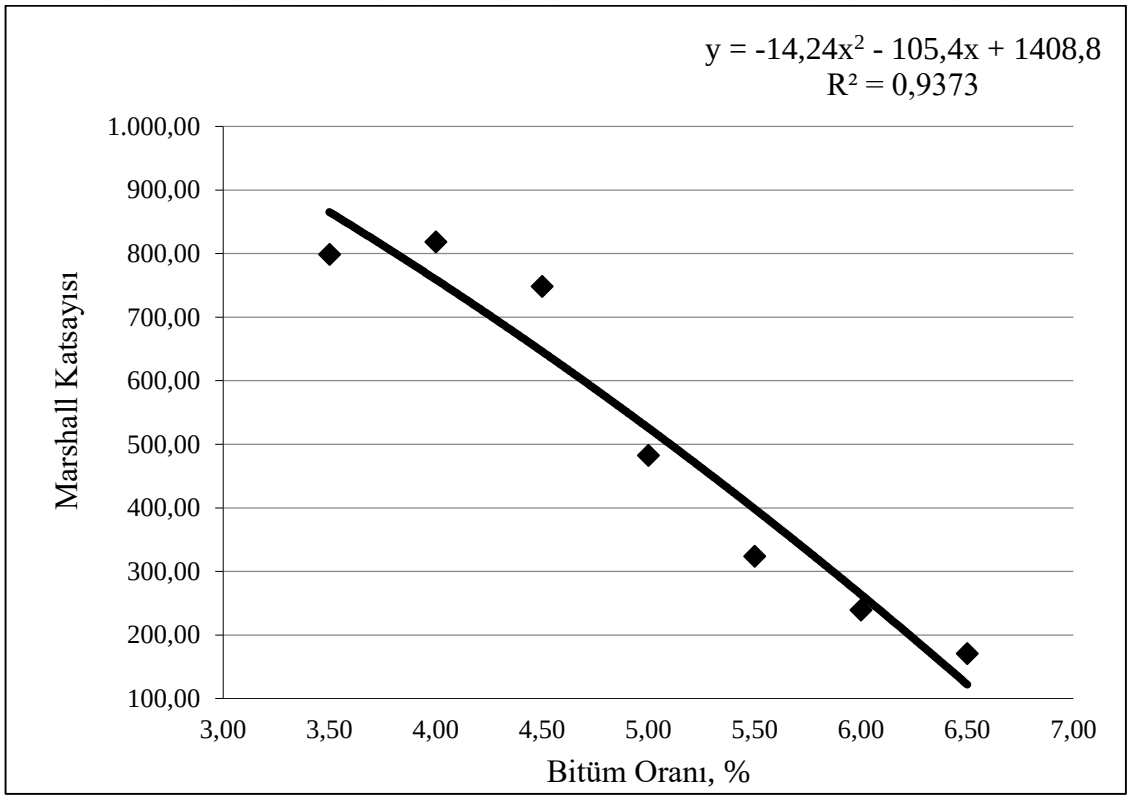

**Şekil 5.51.** Bitüm oranı- Bitümle dolu boşluk oranı (%30 yer seramik atık)



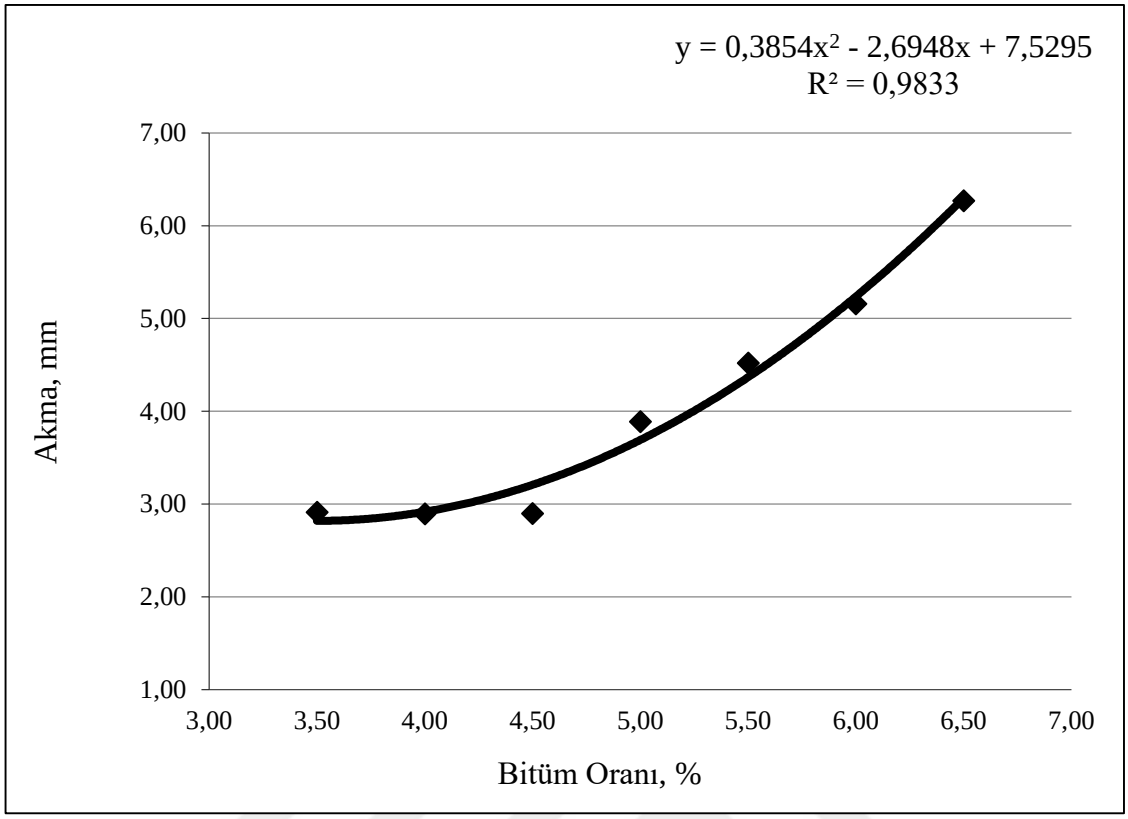

**Şekil 5.52.** Bitüm oranı- Marshall stabilitesi (%30 yer seramik atık)




**Şekil 5.53.** Bitüm oranı- VMA (%30 yer seramik atık)




**Şekil 5.54.** Bitüm oranı- Marshall katsayısı (%30 yer seramik atık)




**Şekil 5.55.** Bitüm oranı- akma değeri (%30 yer seramik atık)

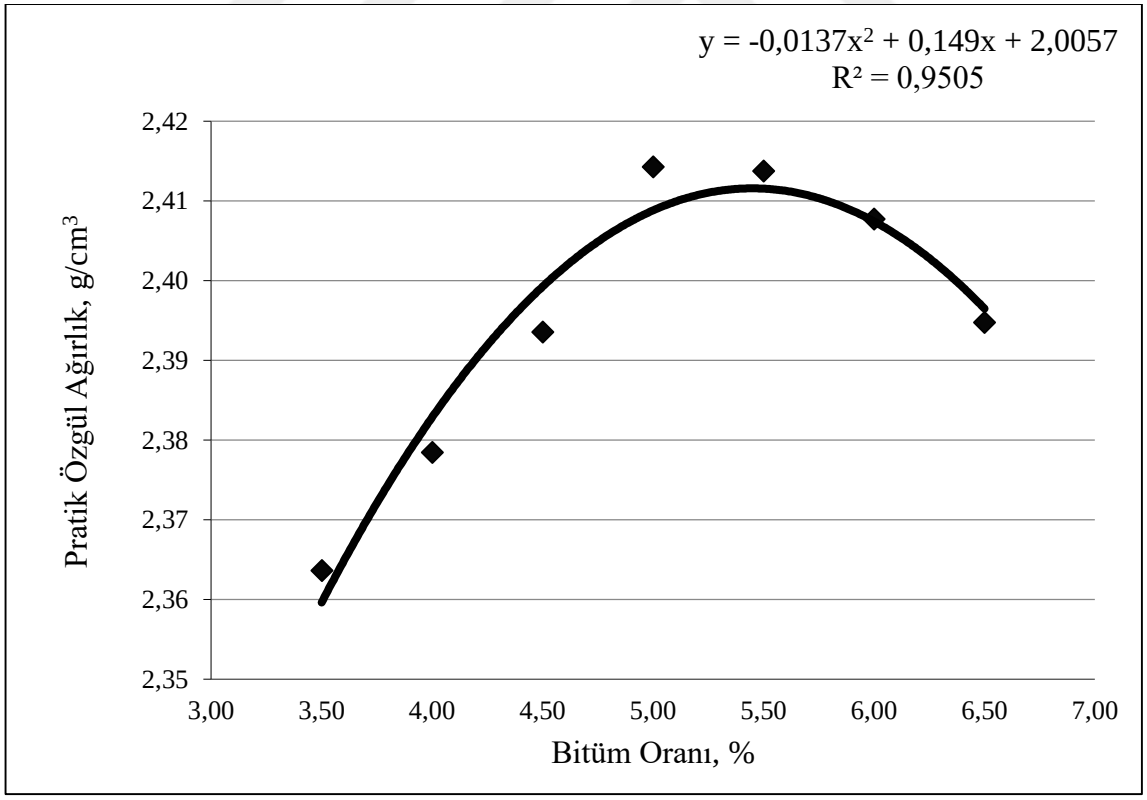
**Çizelge 5.26.** %30 yer seramik atığı içeren karışım için optimum bitüm oranı tayini

| Optimum Bitüm Oranı | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Değişken | Standart | Bitüm Oranı | Bitüm Oranının Denklem Değeri | Optimum Bitüm Oranı Değeri |
| Pratik Özgül Ağırlık | maks | 5,33 | 2,43 | 2,43 |
| Boşluk Oranı | 4 | 6,56 | 4,00 | 5,33 |
| Bitümle Dolu Boşluk Oranı | 70 | 4,67 | 70,00 | 75,03 |
| Marshall Stabilitesi | maks | 3,79 | 2302,98 | 1849,30 |
| Akma | 2-4 | - | - | 3,79 |
| Agregalar Arası Boşluk Oranı | 14-16 | - | - | 15,19 |
| ORTALAMA | | **5,09** | | |

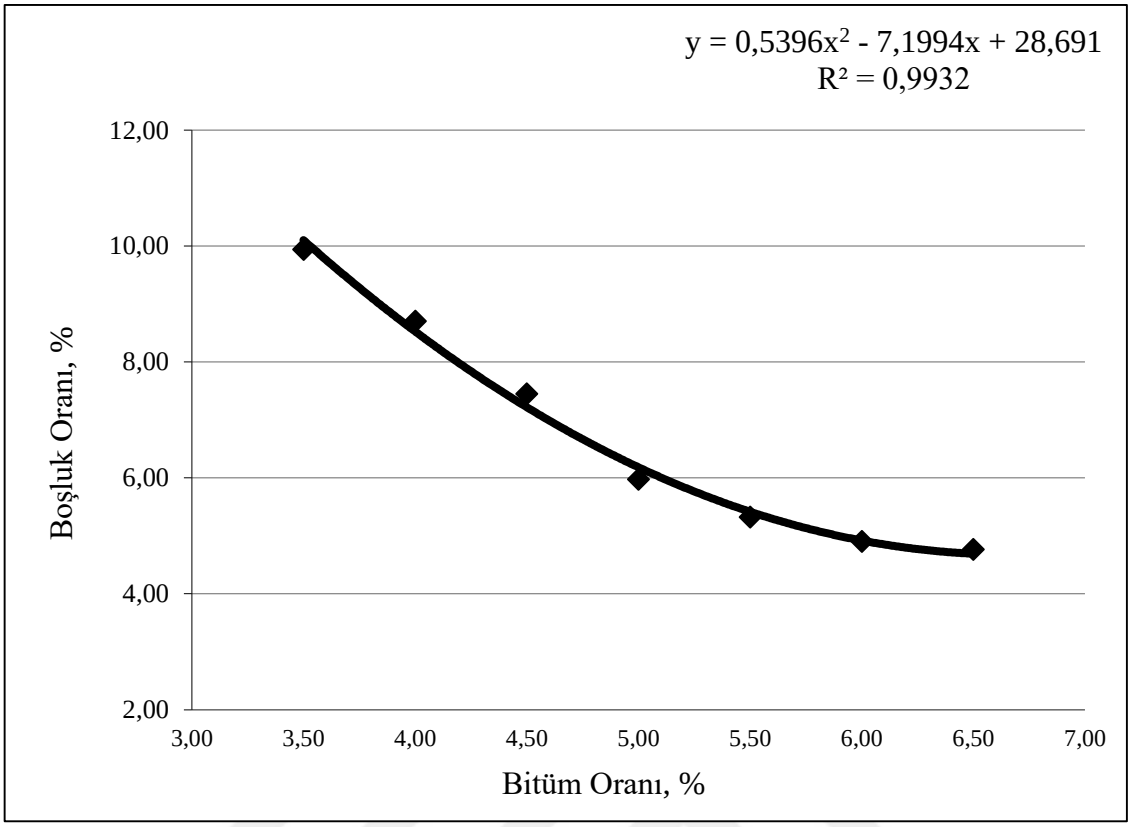
Çizelge 5.26. da %30 oranında yer seramik atığı içeren asfalt betonu numunelerinin optimum bitüm oranı %5,09 olarak bulunmuştur.

**Çizelge 5.27.** %40 yer seramik atığı içeren asfalt betonu deney sonuçları

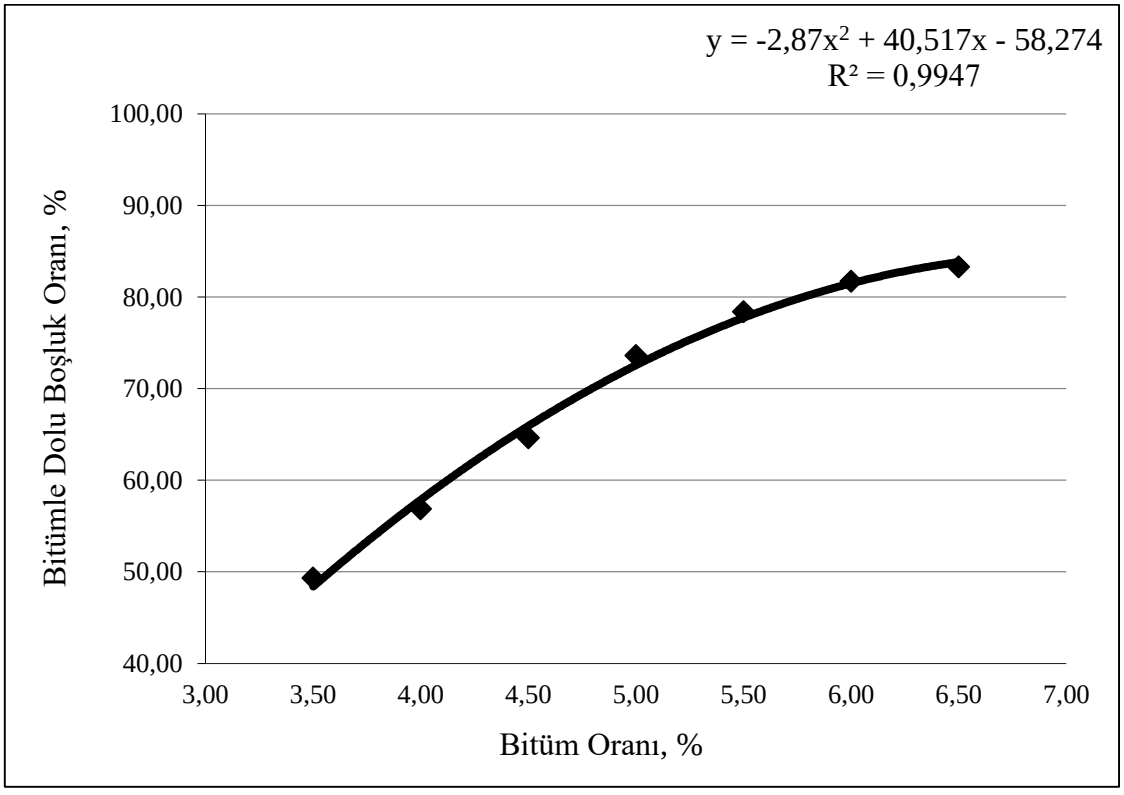
| %40 Atık 50/70 | Bitüm Oranı (%) | Pratik Özgül Ağırlık (gr/cm$^3$) | Boşluk Oranı (%) | Bitümle Dolu Boşluk Oranı (%) | Marshall Stabilite (kg) | Akma (mm) | MQ | VMA (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 3,5 | 2,364 | 9,940 | 49,320 | 2201,730 | 2,753 | 809,630 | 15,950 |
| **2** | 4 | 2,378 | 8,700 | 56,880 | 2225,680 | 2,787 | 812,620 | 15,810 |
| **3** | 4,5 | 2,394 | 7,450 | 64,620 | 2072,210 | 3,191 | 711,800 | 15,520 |
| **4** | 5 | 2,414 | 5,970 | 73,600 | 1890,210 | 3,834 | 502,570 | 15,190 |
| **5** | 5,5 | 2,414 | 5,330 | 78,390 | 1499,910 | 4,543 | 358,520 | 15,620 |
| **6** | 6 | 2,408 | 4,900 | 81,720 | 1235,350 | 5,387 | 246,890 | 16,220 |
| **7** | 6,5 | 2,395 | 4,770 | 83,310 | 1144,110 | 6,464 | 180,410 | 17,070 |



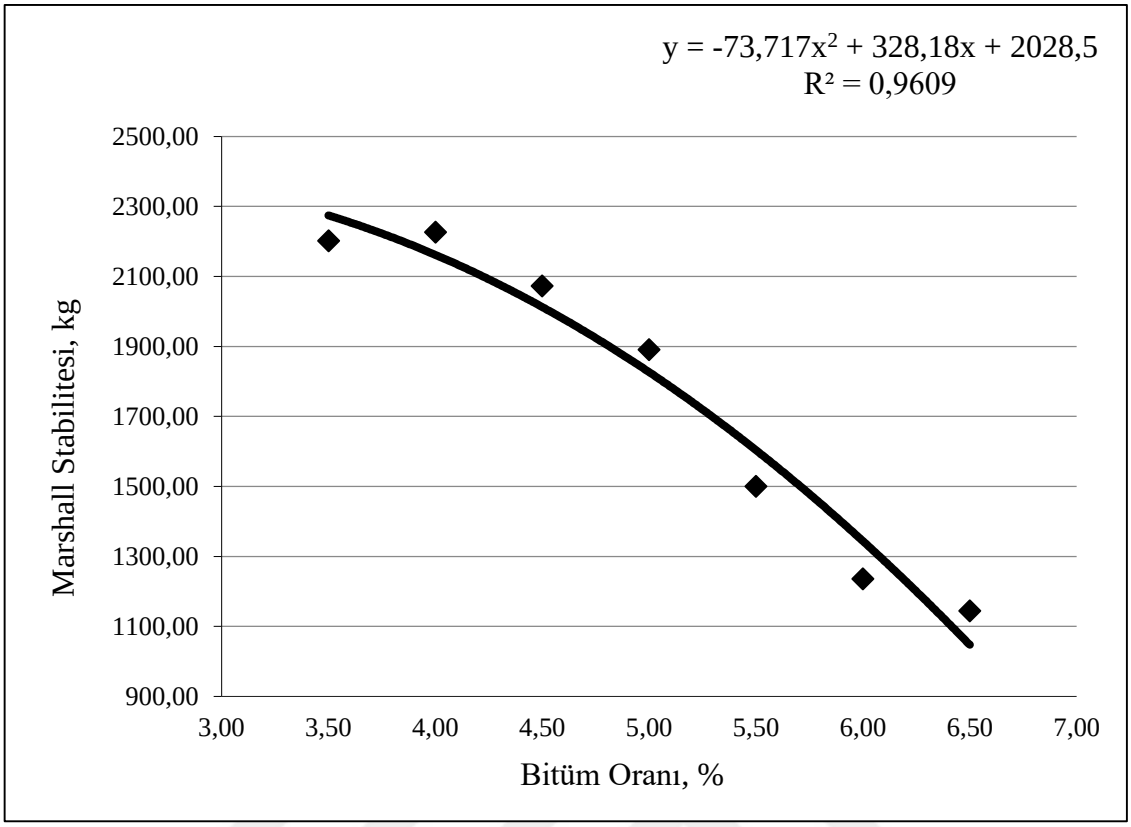

**Şekil 5.56.** Bitüm oranı- pratik özgül ağırlık (%40 yer seramik atık)



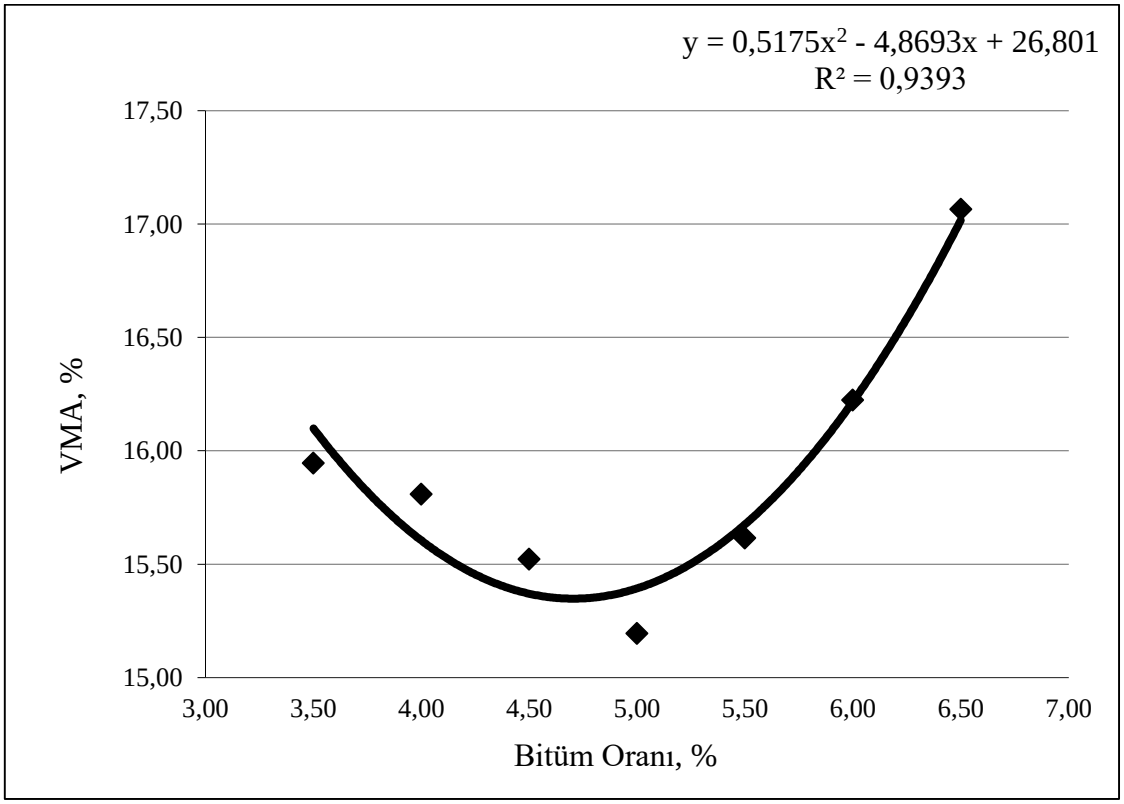

**Şekil 5.57.** Bitüm oranı- boşluk oranı (%40 yer seramik atık)



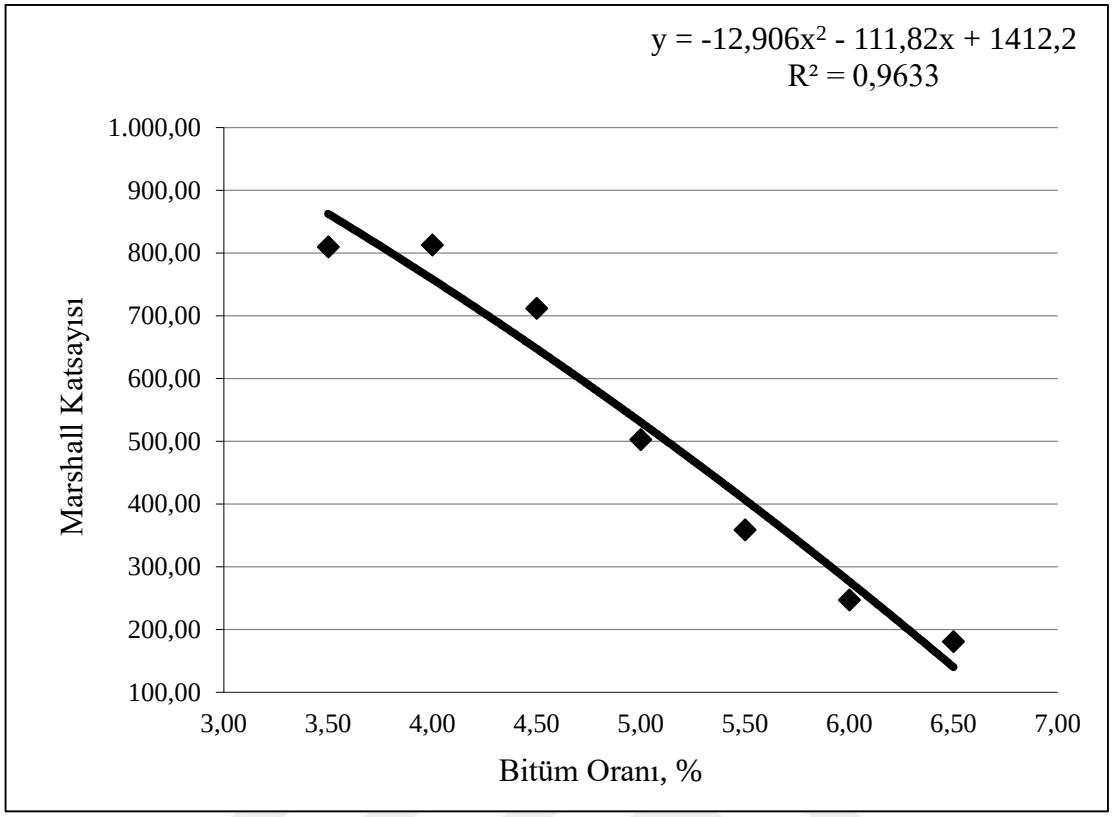

**Şekil 5.58.** Bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı (%40 yer seramik atık)



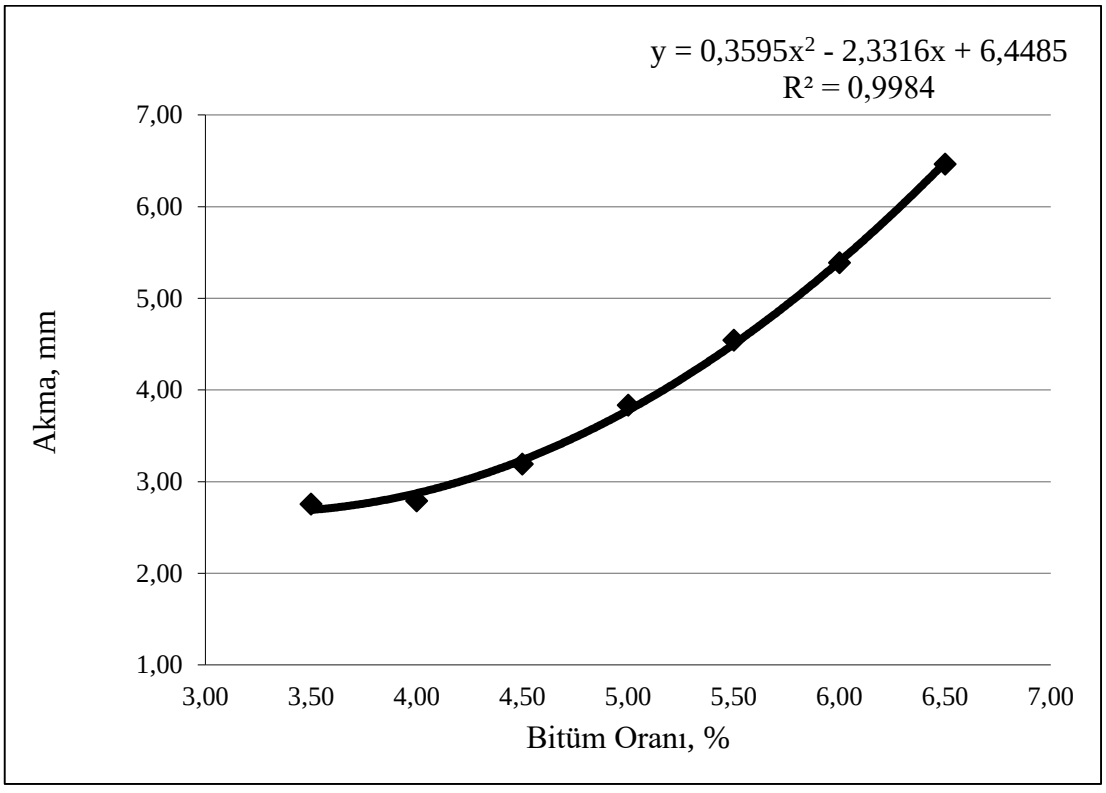

**Şekil 5.59.** Bitüm oranı-Marshall stabilitesi (%40 yer seramik atık)




**Şekil 5.60.** Bitüm oranı- VMA (%40 yer seramik atık)




**Şekil 5.61.** Bitüm oranı- Marshall katsayısı (%40 yer seramik atık)




**Şekil 5.62.** Bitüm oranı- akma değeri (%40 yer seramik atık)

**Çizelge 5.28.** %40 yer seramik atığı içeren karışım için optimum bitüm oranı tayini

| Optimum Bitüm Oranı | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Değişken | Standart | Bitüm Oranı | Bitüm Oranının Denklem Değeri | Optimum Bitüm Oranı Değeri |
| Pratik Özgül Ağırlık | maks | 5,44 | 2,41 | 2,41 |
| Boşluk Oranı | 4 | 6,67 | 5,00 | 5,91 |
| Bitümle Dolu Boşluk Oranı | 70 | 4,79 | 70,00 | 74,37 |
| Marshall Stabilitesi | maks | 3,74 | 2225,68 | 1759,31 |
| Akma | 2-4 | - | - | 3,99 |
| Agregalar Arası Boşluk Oranı | 14-16 | - | - | 15,45 |
| ORTALAMA | | **5,16** | | |

Çizelge 5.28. de %40 oranında yer seramik atığı içeren asfalt betonu numunelerinin optimum bitüm oranı %5,16 olarak bulunmuştur.

### 5.5.2. Statik ve Dinamik Sünme Deneyi

Deney trafik yüklerinin oluşturduğu kalıcı deformasyon ve yorulmalara karşı asfalt betonu özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır (Keskin, 2019).

#### 5.5.2.1. <u>Kulanılan deney aletleri</u>

- **İklimlendirme Kabini:** Deney numunelerine deney sırasında ve öncesinde istenilen sıcaklığın sağlanabilmesi için kullanılan klimatik kabindir. -10℃ ile 70℃ arasında ayarlanabilmektedir.
- **Ara Depolama Kompresörü:** Hava basıncının deney esnasında sürekliliğini sağlayabilmek için kullanılan küçük kompresördür.
- **Veri İşlemci:** Kabin içerisinde bulunan yükleme başlığı ve bilgisayar arasındaki bağlantıyı sağlar. İstenilen sıklıkta veri kaydını alır ve analiz eder.
- **Bilgisayar:** Sünme deneyleri için oluşturulan yazılımları çalıştıran bilgisayar.
- **Kompresör:** Deney için etkili ve gerekli hava basıncının ayarlanmasını sağlayan düzenek.

- **Kesintisiz Güç Kaynağı:** Elektrik kesintisinin yaşanması durumunda deneyin devam edebilmesi için devreye giren kaynak.
- **LVDT (Liner Variable Displacement Transducers):** En az iki tane olmak üzere deney sırasında oluşan düşey deformasyonları ölçmek için kullanılan hassas aletlerdir.
- **Yükleme Başlığı:** En az 14 kN yükleme kapasitesine sahip yükleme başlığı seti.




**Şekil 5.63.** Sünme deneyi iklimlendirme kabini ve deney düzeneği

### 5.5.2.2. Deneyin yapılışı

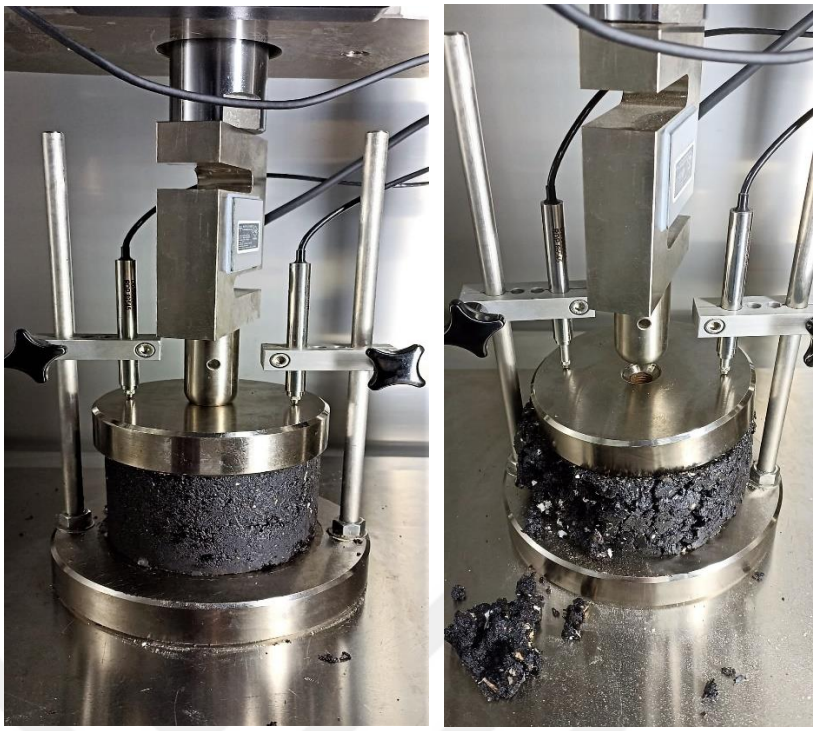
Sünme deneylerine başlanmadan önce üç adet kontrol numunesi, üçer adet atık malzeme içeren karışımlar olmak üzere 15 adet statik sünme deneyi için ve 15 adet dinamik sünme deneyi için Marshall tasarım numunelerinin dökümü yapılır. Numunelerin pürüzlü yüzeyleri temizlenir ve özgül ağırlıkları hesaplanır. Kabin sıcaklığı ayarlanır ve numuneler 24 saat öncesinden iklimlendirme kabinine yerleştirilir.




**Şekil 5.64.** Sünme deneyi için kullanılacak numuneler ve kabin sıcaklık ayarı

Numuneler yerleştirildikten sonra ana kompresör ve yedek depolama kompresörü çalıştırılır, kabin içerisinde 8 atm' lik basıncın oluşması sağlanır. Deney sırasında oluşturulan basınç ve sıcaklığın sabit kalması önemlidir. İstenilen deney şartları sağlandıktan sonra kabin içerisindeki numuneler yükleme başlığı altına yerleştirilir ve LVDT' lerin gereken konumu alması sağlanır. İklimlendirme kabininin kapağı kapatılır. Yazılım çalıştırılır ve net olacak şekilde numuneye ait bilgiler yazılıma girilir. Yazılım üzerinden LVDT değerleri sıfırlanır. Deney türü (statik veya dinamik) seçilerek yükleme başlatılır (Keskin, 2019).

Yol üstyapısı servis ömrü boyunca tekrarlı yüklere maruz kalmakta ve yükler yol tabakasında kademeli olarak artarak kalıcı deformasyona neden olmaktadır. Kaplama tabakasında önce konsolidasyondan dolayı oturma olmakta daha sonra kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir (Karakaş, 2014). Bu deney ile oluşabilecek deformasyonların laboratuvar ortamında saptanması sağlanacaktır.



**Şekil 5.65.** Sünme deney sonucu oluşan deformasyon

### 5.5.2.3. Hesaplama

Sünme deneyine bağlı olarak tekrarlanan yük altında her vuruş sayısı için yük çubuğunun ve LVDT'nin konumu belirlenebilir. Uygulanan yük sonunda birikmiş eksenel gerilme aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_n = \left(\frac{h_0 - h_n}{h_0}\right) \times 100 \ (\mathbf{5.16})$$

Formülde;

$\varepsilon_n$= n yükleme sonucunda numunede oluşan birikmiş eksenel şekil değiştirme (%)

$h_0$= numunenin başlangıçta ölçülen ortalama yüksekliği (cm)

$h_n$= n yükleme sonucunda ölçülen ortalama numune yüksekliği (cm)

$$F_C = \frac{\varepsilon_{n1} - \varepsilon_{n2}}{n_1 - n_2} \ (\mathbf{5.17})$$

Formülde;

$F_C$= sünme hızı (birim şekil değiştirme/ vuruş sayısı)

$\varepsilon_{n1,2}$= $n_1$, $n_2$ yükleme sonunda numunede birikmiş eksenel birim şekil değiştirme (%)

$n_{1,2}$= tekrarlı yük uygulama sayısı

$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_n} \times 100 \ (\mathbf{5.18})$$

Formülde;

$E_n$ = n yükleme sonucu sünme modülü (MPa)

$\sigma$ = yükleme gerilme (kPa)

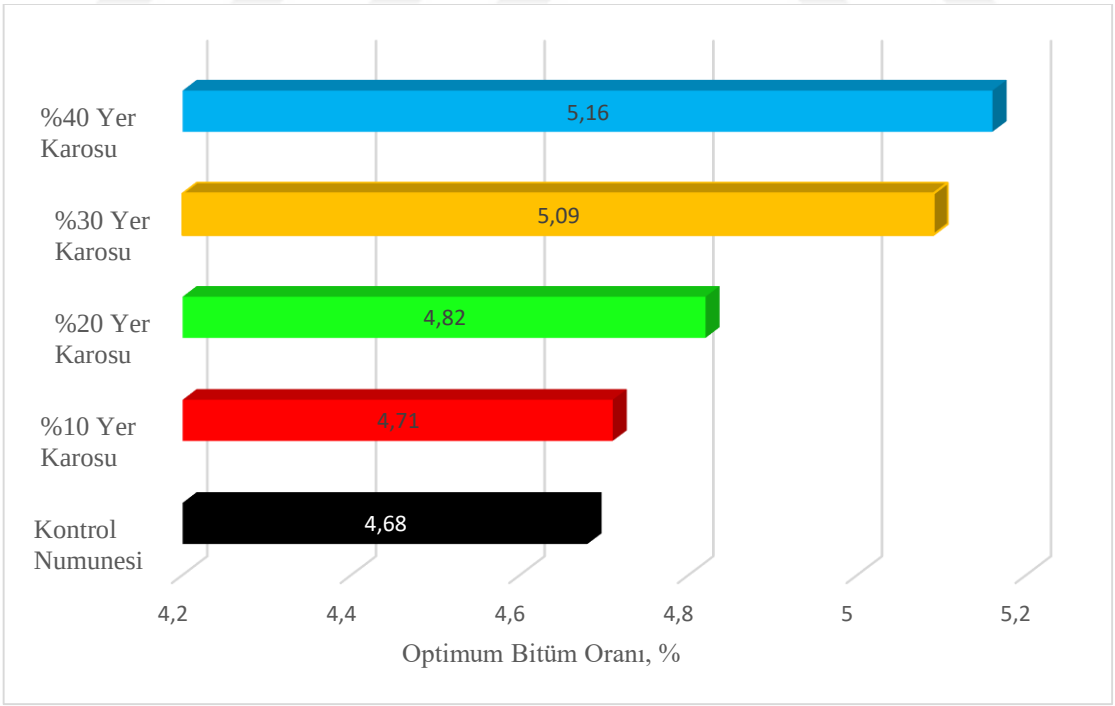
$\varepsilon_n$= n yükleme sonucunda numunede oluşan birikmiş eksenel şekil değiştirme (%)

Statik ve dinamik sünme deneylerinden elde edilen veriler Excel üzerinde işlenerek yukarıda verilen formüller yardımı ile vuruş sayısı; sünme rijitliği ve birikimli deformasyon grafikleri çizilmektedir.

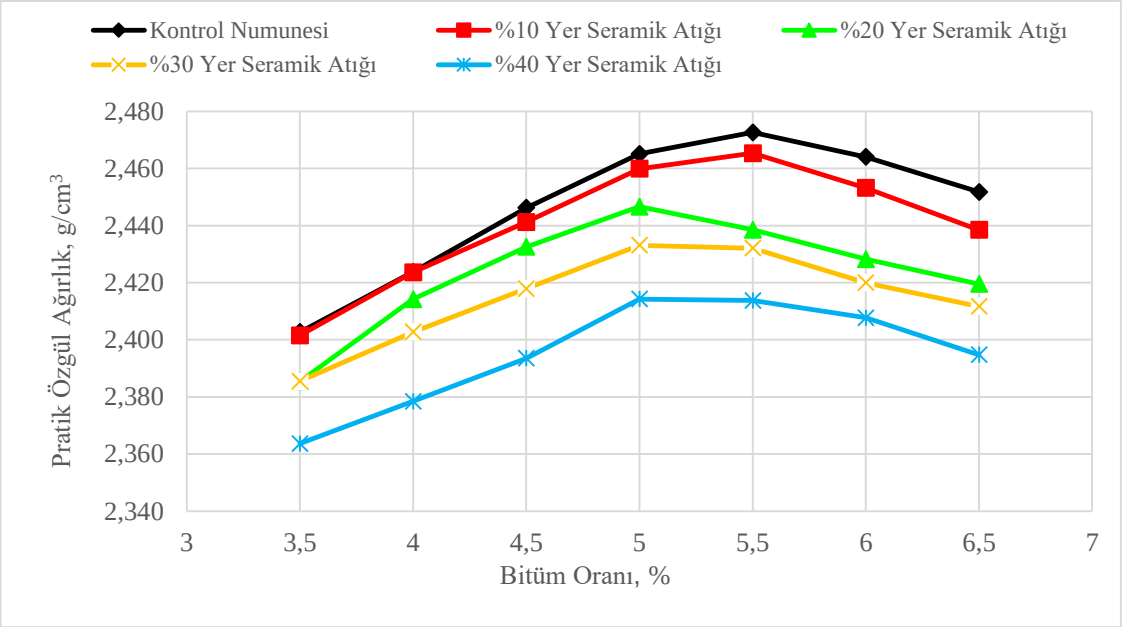
# 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

## 6.1. Marshall Tasarım Deneyi Karşılaştırma Grafikleri ve Sonuçlar

Yer seramik atık miktarına göre belirlenen optimum bitüm oranlarının karşılaştırması şekil 6.1. de gösterilmiştir. Optimum bitüm oranı max Marshall stabilitesi, max birim ağırlık, şartname hava boşluğu sınır değerleri ve şartnamede belirtilen bitümle dolu boşluk oranı için ayrı ayrı 2. derece polinom fonksiyon grafiği oluşturularak ve bu değerlerin ortalaması alınarak bulunmaktadır. Tez içeriğinde yer seramik atık miktarı arttıkça karışım için gereken bitüm miktarının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum yer seramik atıklarının fiziksel yapısı nedeniyle daha önceden öngörülebilen bir sonuçtur. Ekonomik olarak kullanılan atık malzeme maliyetinin, atık malzemenin depolanması için gereken maliyetlerin ve bitüm maliyetinin karşılaştırılarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

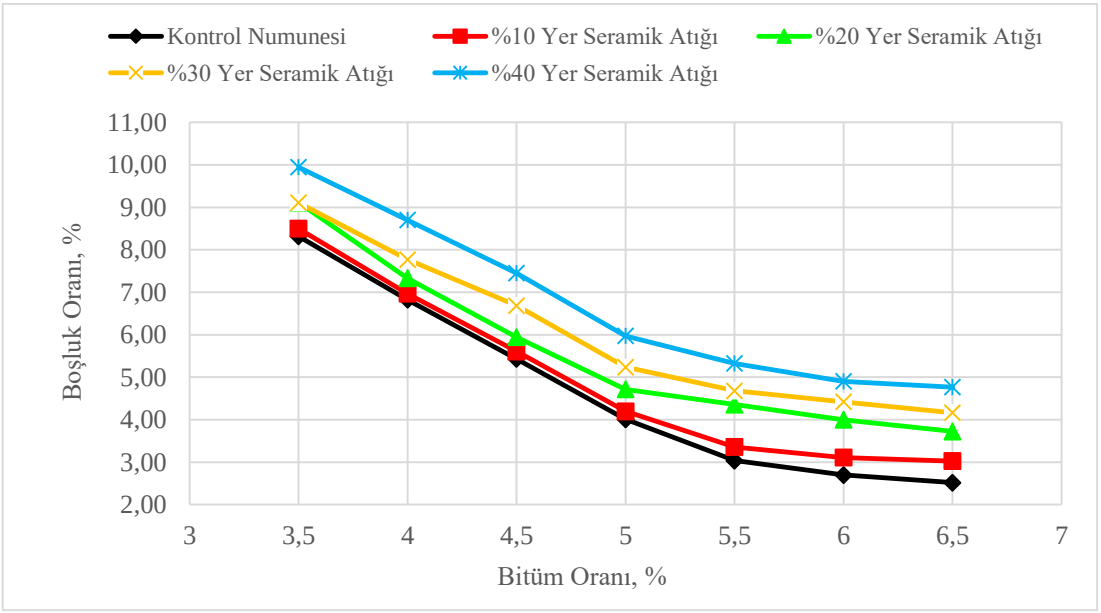



**Şekil 6.1.** Optimum bitüm oranı – yer seramik atığı miktarı



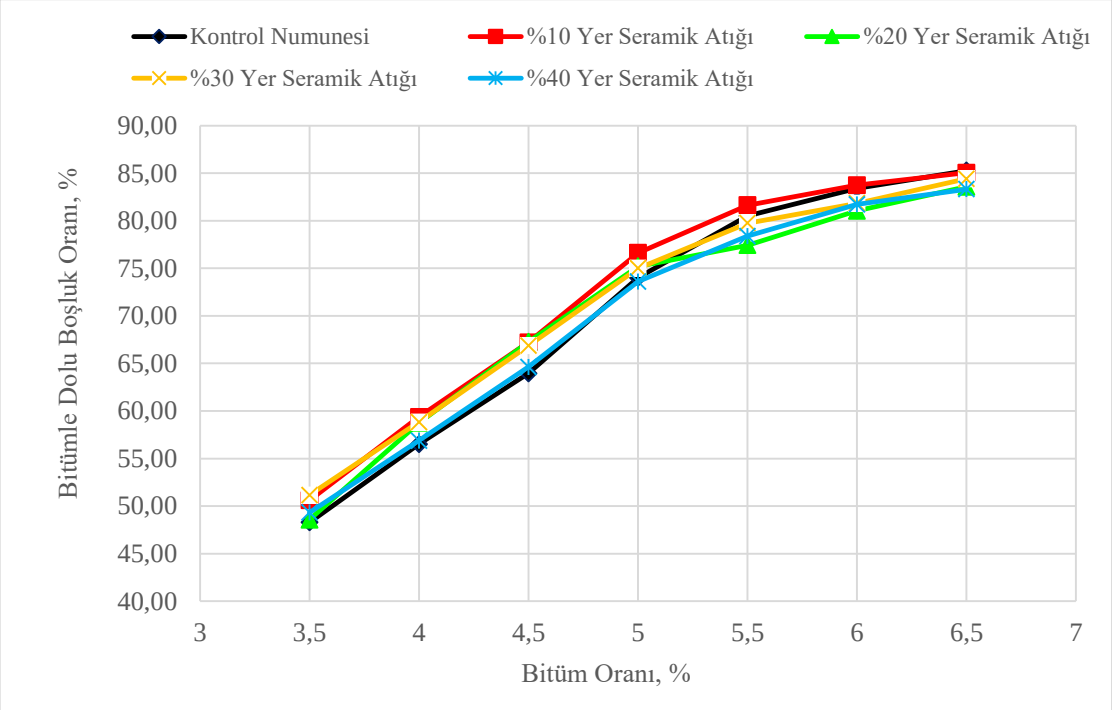

**Şekil 6.2.** Bitüm oranı- pratik özgül ağırlık karşılaştırma grafiği

Yer seramikleri içerisindeki boşluk miktarı doğal agregalara oranla daha fazladır. Bu nedenle atık seramikler asfalt betonunda kullanıldığında asfalt betonunda bulunan boşluk oranını arttıracaktır. Boşluk oranında oluşan artış pratik özgül ağırlık değerinin azalmasına neden olacaktır. Buna bağlı olarak asfalt betonu karışımında kullanılan yer seramik atık miktarı arttıkça pratik özgül ağırlık değerlerinin azaldığı şekil 6.2.de de gösterilmiştir.



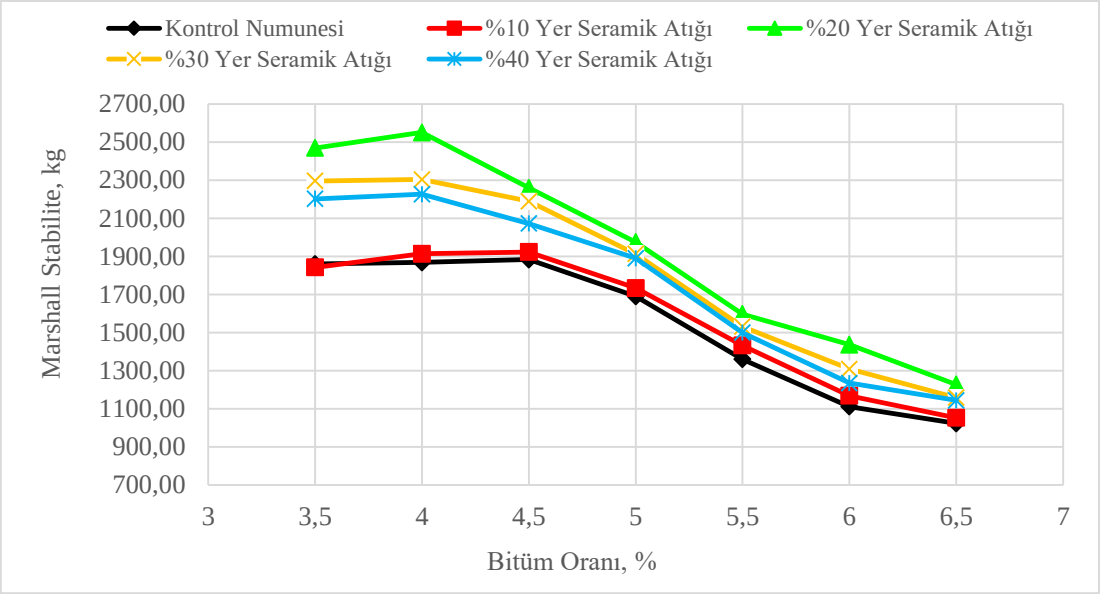

**Şekil 6.3.** Bitüm oranı- boşluk oranı karşılaştırma grafiği

Yer seramikleri içerisindeki boşluk miktarının fazla olması ve seramiklerin keskin yüzeylerinin tanelerin birbirine yaklaşmasını engellemesi nedeniyle kullanılan atık miktarındaki artış karışımın boşluk oranında artışa neden olmaktadır. Ancak şekil 6.3.te de görüldüğü üzere bitüm miktarının artmasıyla boşluk oranında azalma oluşmakta ve boşluk oranı minimum düzeye inmektedir.



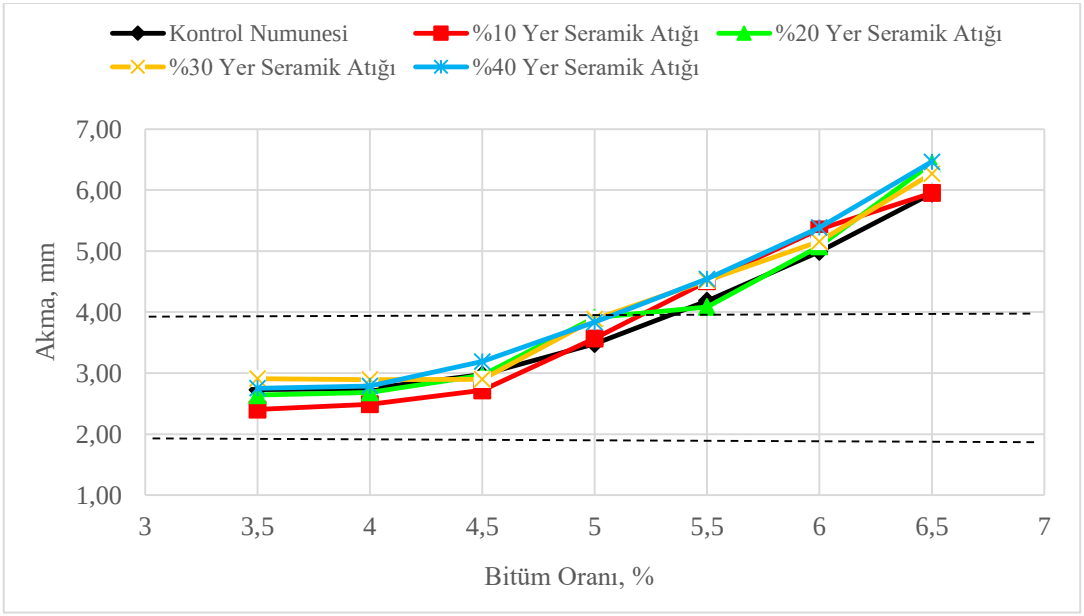

**Şekil 6.4.** Bitüm oranı- bitümle dolu boşluk oranı karşılaştırma grafiği

Bitümle dolu boşluk oranında oluşan artış karışım içerisinde kullanılan bitüm yüzdesinin artmasının doğal sonucudur. Ayrıca atık yer seramiklerinin daha önceki deneylerde fiziksel olarak doğal agregalar ile benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir bu nedenle bütün numunelerde bitümle dolu boşluk oranı değerlerinde aynı sonuçlara ulaşılmıştır.



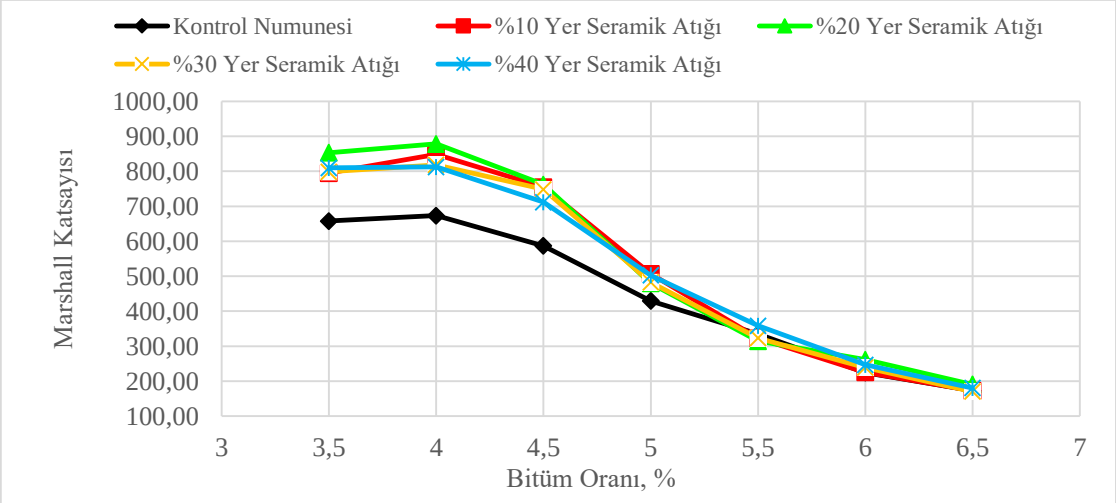

**Şekil 6.5.** Bitüm oranı- Marshall stabilite değerleri karşılaştırma grafiği

Marshall stabilite değeri karışımda kullanılan yer seramik atık oranı %20 iken max noktaya ulaşmıştır. Atık miktarı arttıkça kontrol numunesine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Atık yer seramikleri yüksek dayanıma sahip malzemelerdir. Daha önce yapılan aşınma kaybı deneyinde doğal agregalar ile aynı aşınma sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle asfalt betonunda %10 oranında atık yer seramiği kullanılması kontrol numunesi ile aynı değerlerin elde edilmesine yol açmıştır.



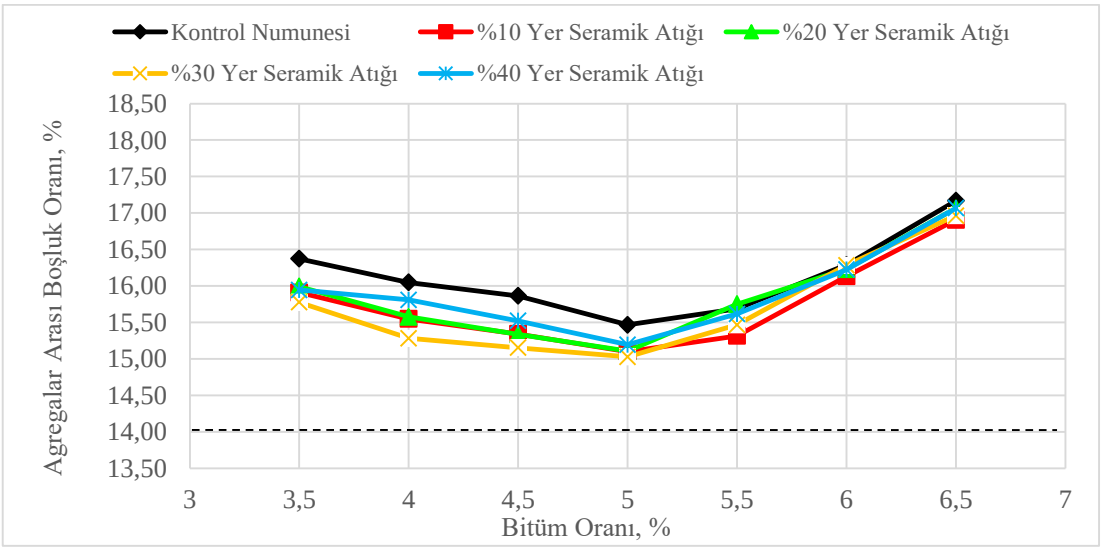

**Şekil 6.6.** Bitüm oranı- akma miktarı karşılaştırma grafiği

İçerisinde yer seramik atığı bulunan karışımların tamamı kontrol numunesi ile benzer davranışlar göstermiş ve akma miktarı bitüm oranı arttıkça artmıştır. Bitüm oranı arttıkça agrega ve yer seramik atıkları arasında bulunan boşluklarda bitüm film kalınlığı artmış böylece daneler arası kayma gerilmesinde azalma meydana gelmiştir.




**Şekil 6.7.** Bitüm oranı- Marshall katsayısı karşılaştırma grafiği

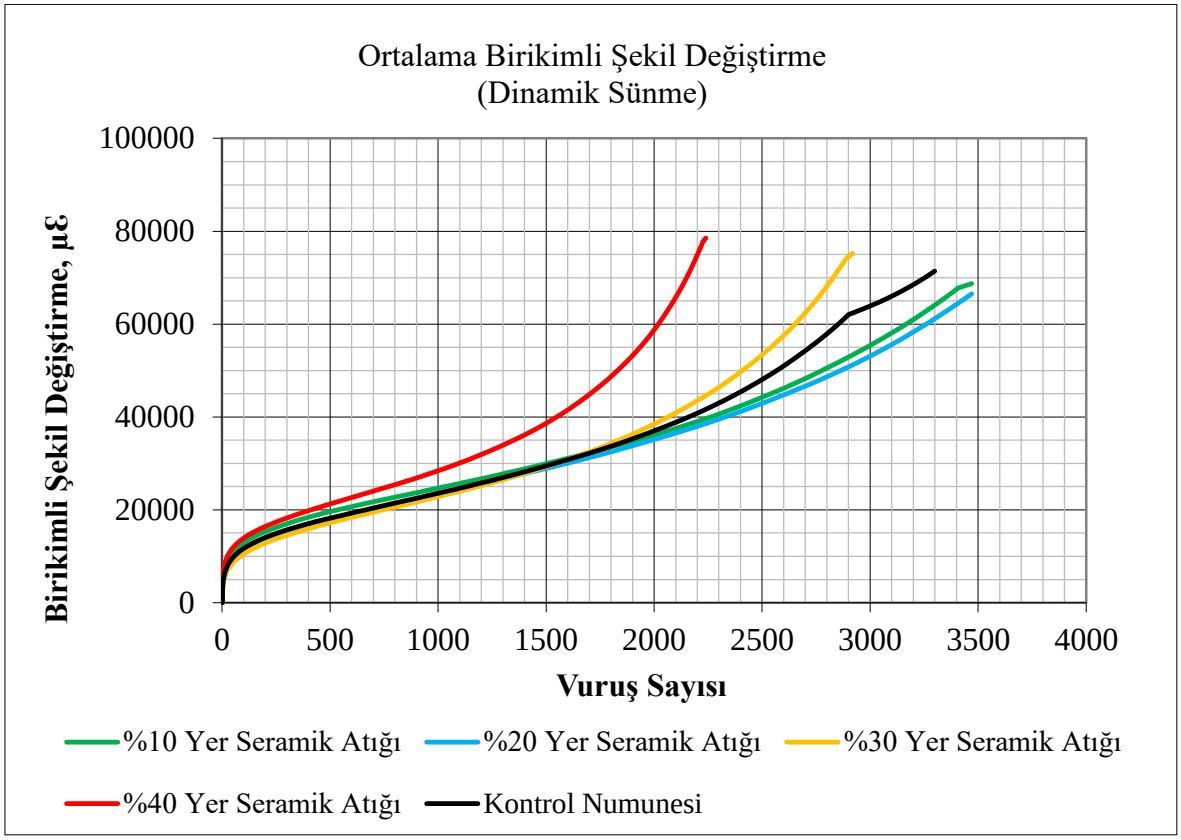
Marshall katsayısı karışım numunelerinin rijitliğinin bir ölçüsüdür. Marshall katsayısı Marshall stabilitesi ile doğru orantılı iken akma değeri ile ters orantılıdır. Bu nedenle stabilite değerlerinde olduğu gibi yer seramik atığı kullanılan numunelerin Marshall katsayısı değerleri kontrol numunesine göre daha yüksek çıkmıştır.




**Şekil 6.8.** Bitüm oranı- agregalar arası boşluk oranı karşılaştırma grafiği

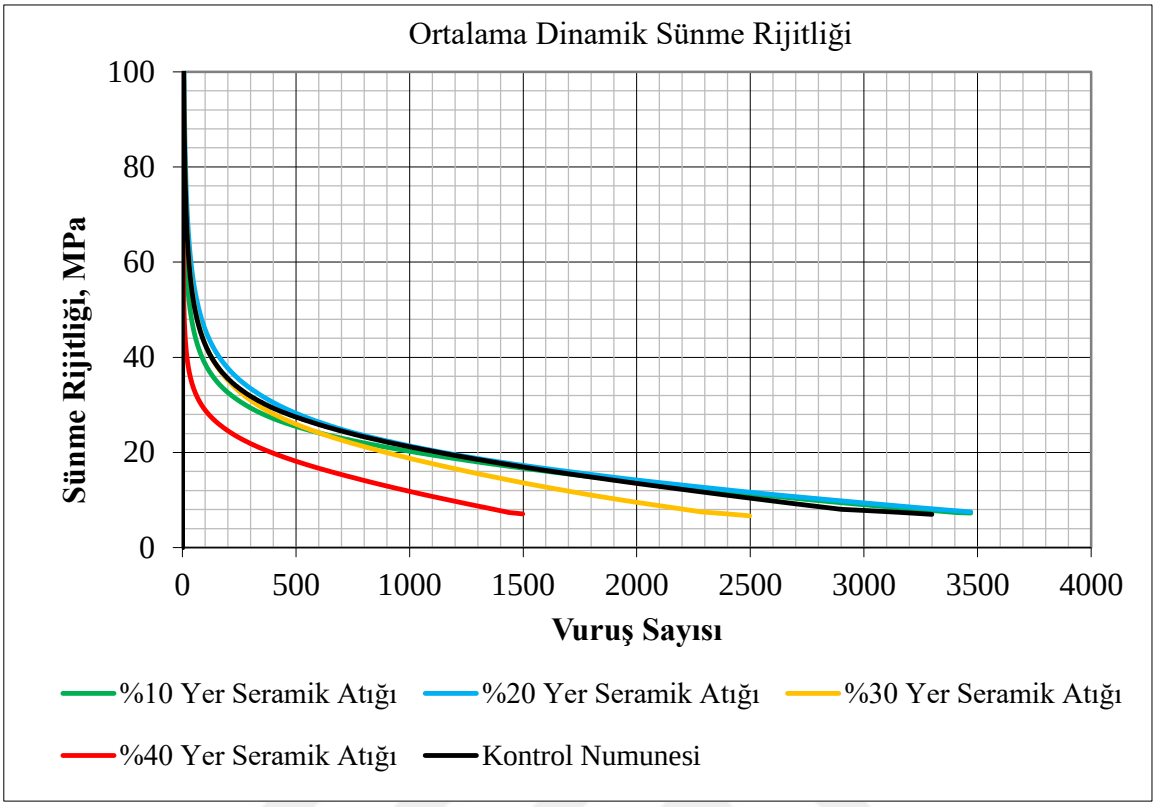
Şekil 6.8.de bulunan sonuçlara bakıldığında bütün değerler KTŞ' de verilen agregalar arası boşluk oranı sınır değeri olan %14 oranını sağlamıştır.

## 6.2. Sünme Deneyleri Karşılaştırma Grafikleri ve Sonuçlar




**Şekil 6.9.** Dinamik sünme vuruş sayısı- ortalama birikimli şekil değiştirme karşılaştırma grafiği

Şekil 6.9. da verilen vuruş sayısı ve birikimli şekil değiştirme ilişkisi incelendiğinde ilk yüklemelerde kontrol numunesi ve atık kullanılan numunelerde deformasyon değerlerinin aynı olduğu görülmektedir. Vuruş sayısı arttıkça en yüksek deformasyon değerine %40 oranında yer seramik atığı içeren numuneler ulaşmıştır. %10 ve %20 oranında yer seramik atığı içeren numunelerin kontrol numunesi deformasyon değerine paralel olarak ilerlediği ve en az deformasyonun %20 yer seramik atığı içeren numunelerde oluştuğu ve daha uzun ömürlü olduğu gözlemlenmiştir.

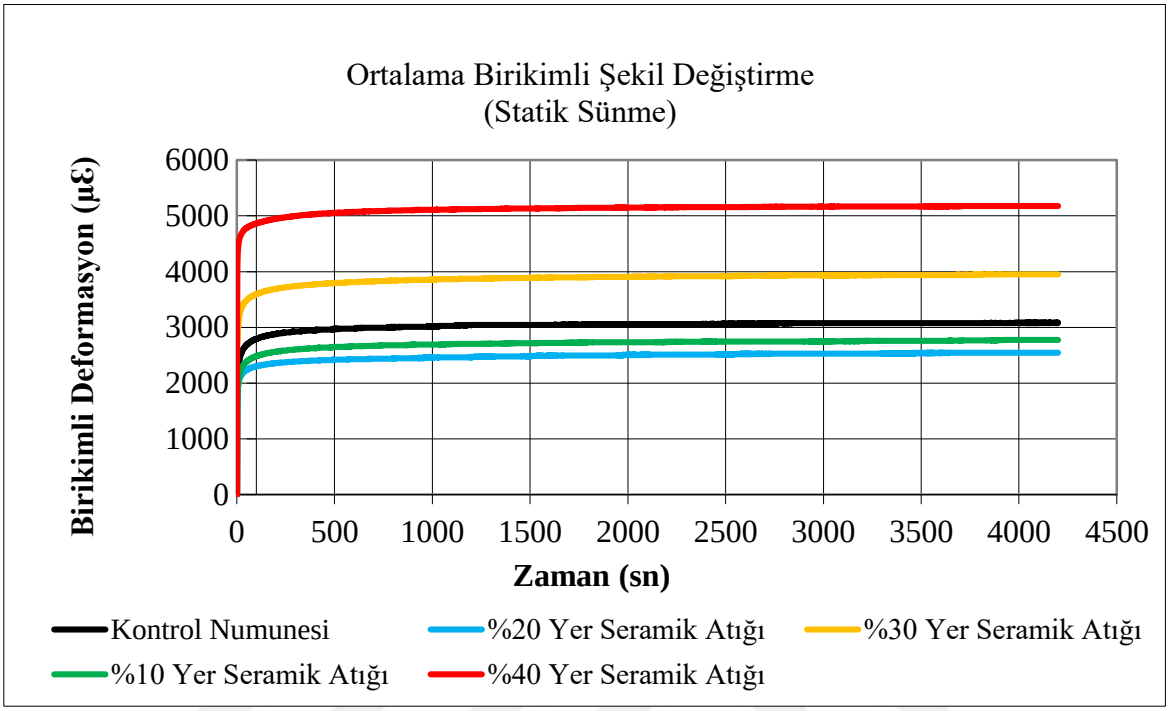



**Şekil 6.10.** Dinamik sünme rijitliği- vuruş sayısı karşılaştırma grafiği

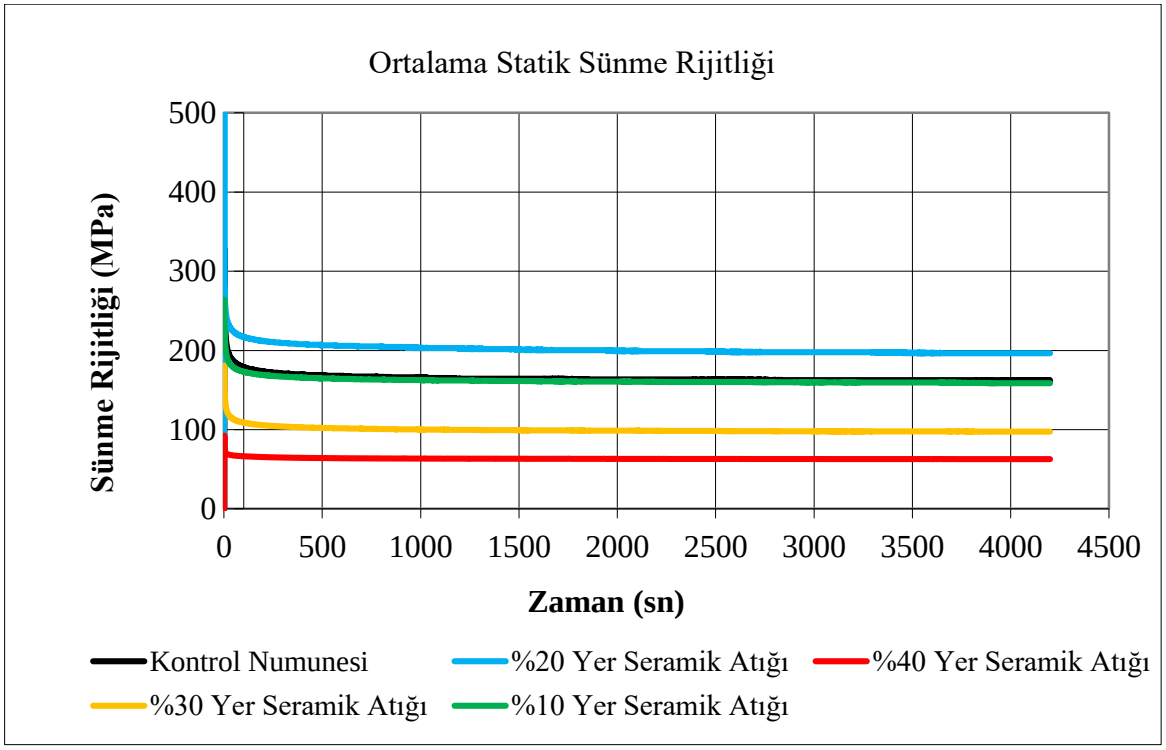
Şekil 6.10. da dinamik sünme rijitliğinin vuruş sayısına bağlı olarak değişimi verilmiştir. İlk yüklemelerde rijitlik modülünün kontrol numunesinde, %10, %20, ve %30 atık oranına sahip numunelerde birbirine yakın değerlere ulaştığı görülmektedir. Vuruş sayısı arttıkça rijitlik değerleri azalmaktadır. 1500 vuruş sonucunda rijitlik değerleri bütün numuneler için 6 MPa değerinin altına düşmemiştir. Kontrol numunesi 3300 vuruş sonucunda ömrünü tamamlarken kontrol numunesine en yakın değere sahip olan %20 yer seramik atığı içeren karışım 3470 vuruş sonucunda ömrünü tamamlamıştır. Vuruş sayılarına ve rijitlik değerlerine bakıldığında atık kullanılan karışımların sünme modülünün olumsuz olarak etkilenmediği ve %20 oranında atık kullanılmasının asfalt betonu servis ömrünü uzatacağı sonucuna varılmaktadır.

Yer seramik atığı kullanılarak hazırlanan numunelerin statik yükleme etkisi altında göstermiş olduğu davranışların zamana bağlı değişimi Şekil 6.11. ve 6.12. de gösterilmiştir. En yüksek deformasyon %40 oranında atık malzeme içeren numunelerde oluşurken %10 ve %20 oranında atık malzeme içeren numunelerin deformasyon değerinin kontrol numunesine

göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.12.de %20 oranında kullanılan atık malzemenin karışımın sünekliğini artırdığı görülmektedir.




**Şekil 6.11.** Statik sünme ortalama birikimli şekil değiştirme- zaman karşılaştırma grafiği




**Şekil 6.12.** Statik sünme rijitliği- zaman karşılaştırma grafiği

## 6.3. Ekonomik Analiz

Yer seramik atığının asfalt betonunda kullanılmasının ekonomik avantajlarının belirlenmesi adına 10 km uzunluğunda, 10 m genişliğinde ve 15 cm kalınlığında yol için maliyet analizi yapılmıştır. 10 km yol için hacim 15000 m3 ve asfalt betonu özgül ağırlığı 2,5 ton/m3 kabul edilmiştir.

**Çizelge 6.1.** 10 km yol için hesaplanan ekonomik analiz değerleri

| Ekonomik Analiz | Katkısız (OBO:%4,68) | | | %10 S. Atık (OBO:%4,71) | | | %20 S. Atık (OBO:%4,82) | | | %30 S. Atık(OBO:%5,09) | | | %40 S. Atık (OBO:%5,16) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 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 | 35823,5 | 205 | 7343817,5 | 34201,4 | 205 | 7011287 | 32555,8 | 205 | 6673939 | 30866,4 | 205 | 6327612 | 29241,2 | 205 | 5994446 |
| Bitüm | 1676,5 | 13000 | 21794500 | 1687 | 13000 | 21931000 | 1724,4 | 13000 | 22417200 | 1816,3 | 13000 | 23611900 | 1840 | 13000 | 23920000 |
| Seramik Atığı | 0 | 10 | | 1611,6 | 10 | 16116 | 3219,8 | 10 | 32198 | 4817,3 | 10 | 48173 | 6418,79 | 10 | 64187,9 |
| Toplam | 37500 | | 29138318 | 37500 | | 28958403 | 37500 | | 29123337 | 37500 | | 29987685 | 37500 | | 29978633,9 |
| Maliyet Artışı (%) | | 0 | | | -0,6 | | | -0,1 | | | 2,9 | | | 2,9 | |

Yer seramik atıklarının %10 ve %20 oranında kullanılması Çizelge 6.1. de belirtildiği gibi asfalt betonu maliyetini %-0,6 ve %-0,1 oranında azaltacaktır. Ancak seramik atıklarının asfalt betonunda daha yüksek oranda kullanılması asfalt betonu maliyetinde artışa neden olacaktır.

# 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Ulaştırma Laboratuvarında yaklaşık bir yıl süren çalışmalar sonucunda 105 tanesi Marshall tasarım deneyi, 30 tanesi sünme deneyleri için olmak üzere 135 adet asfalt betonu numunesinin dökümü yapılmıştır. Yer seramik atığının asfalt betonu performansını iyileştirebilirliği üzerine çalışmalar yapılmıştır. Seramik sektörü katma değeri ve üretimi en yüksek sektörler arasında yer almaktadır bu duruma paralel olarak atık miktarı da yüksek orandadır. Çalışmada bu atıkların çevreye olan zararlarını azaltmak ve asfalt betonu dayanımını artırabilmek hedeflenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında karşılaştırma yapabilmek adına 50/70 penetrasyona sahip bitüm kullanılarak standart asfalt betonu kontrol numunelerinin dökümü gerçekleştirilmiştir. Daha sonra karışım içeriğinde 9,5 mm ve 4,75 mm elek üstü agregalar için %10, %20, %30 ve %40 oranında yer seramik atığı ikamesi uygulanmıştır. Marshall tasarım deneyi değerlendirme parametrelerine bakıldığında pratik özgül ağırlık değerlerinin atık miktarındaki artışla birlikte azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Çünkü seramikler boşluk miktarı fazla olan malzemelerdir. Doğal agregaya göre daha gözenekli bir yapıya sahiptir. Boşluk oranları da bu nedenle kullanım oranı arttıkça artmaktadır. BDBO değerinin artışı kontrol numunesi ile aynı oranda olmuş ve kullanılan bitüm yüzdesi artıkça artmıştır. ABO değeri ise tüm numuneler için KTŞ (2013)'te belirtilen %14 sınırının üzerinde kalmış ve şartname değerlerini sağlamıştır.

Marshall tasarım deneyi ile elde edilen Marshall stabilite değerleri atık malzeme kullanılan numunelerin tamamında kontrol numunesinden elde edilen değerlerin üzerinde kalmıştır. Daha önce Los Angeles deneyinde doğal agregaların LA aşınma sınıfı ile yer seramik atıklarının LA aşınma sınıfının aynı olduğu görülmüştür. Bu nedenle %10 oranında kullanılan atıkların stabilite değerleri kontrol numunesi ile hemen hemen aynıdır. %20 oranında atık kullanıldığında ise stabilite değeri maksimum noktayı görmüş ve kullanılması gereken optimum seramik oranının %20 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yer seramik karoları yük taşıma kapasitesi ve dayanımları yüksek malzemelerdir. %30 ve %40 oranında yer seramik atığı kullanılan numunelerin stabilite değerleri de kontrol numunesinin üzerinde kalmış oran arttıkça stabilite değerleri kontrol numunesine yaklaşmıştır.

KTŞ (2013)'te asfalt betonu için akma değerinin 2-4 mm olması istenmektedir. Bütün numunelerde akma miktarı birkaç sapma değeri dışında aynı miktarda olmuştur. Asfalt betonu kompozit bir malzeme olduğu için sapmalar önem arz etmemektedir. Ayrıca Bitüm oranı arttıkça akma değerinin arttığı ve %5 bitüm oranından sonra şartname sınırlarının dışında kaldığı sonucuna ulaşılmaktadır. Optimum bitüm oranı atık miktarı arttıkça artmaktadır ancak %30 ve %40 yer seramik atığı kullanılan numunelerde bitüm oranı sırasıyla %5,09 ve %5,16 çıkmaktadır. Bu oranlar akma değerinde artışa neden olacağı için yer seramik atığının %20 oranında kullanılması uygun görülmüştür.

Her atık miktarı için ayrı ayrı belirlenen optimum bitüm oranı kullanılarak hazırlanan numunelere statik ve dinamik sünme deneyleri yapılmıştır. Statik sünme deney sonuçları incelendiğinde en yüksek deformasyon değerine %40 yer seramik atığı içeren asfalt betonu numunesinin ulaştığı gözlemlenmiştir. 4200 s boyunca ve 500 kPa yükleme sonucunda en yüksek dayanımı %20 oranında yer seramik atığı içeren numuneler göstermiştir.

Tekrarlı yük etkisinde dinamik sünme deneyi yapılarak bütün asfalt betonu numunelerinin dayanabildikleri vuruş sayısı ve deformasyon miktarı değerlendirilmiştir. En yüksek deformasyona en az vuruş sayısı ile %40 oranında yer seramik atığı içeren asfalt betonu numuneleri ulaşmıştır. En az deformasyonlar ise %20 yer seramik atığı içeren numunelerde meydana gelmiş ve dayanım ömrünün diğerlerine göre daha uzun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tekrarlı yük etkisinde sünme deney sonuçlarının statik sünme deney sonuçlarına göre daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.

Yer seramik atıklarının asfalt betonu maliyetine etkisi incelendiğinde %10 ve %20 oranında kullanılması asfalt betonu maliyetini azalttığı ancak atık miktarı arttırıldığında asfalt betonu maliyetinin arttığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak karışım içeriğinde %20 oranında yer seramik atığı kullanılması asfalt betonunun performans özelliklerini iyileştirecek aynı zamanda çevresel atık birikimini ve depolanma için gerekli maliyeti azaltacaktır. Sürdürülebilirlik için seramik malzemeleri gibi büyük bir sektörün yer seramik karosu atıklarının yol yapımında değerlendirilmesinin büyük avantaj sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır.

# KAYNAKLAR DİZİNİ


Akkurt F., Kalender E., Yörükoğlu A., 2019, Üstün özelliklere sahip ileri teknoloji seramiği: Titanyum diborür, Bor Dergisi, Boron 4 (4), 203 – 208.

AL-ALİ F. S., 2016, Geri kazanılmış asfalt betonu malzemesinin aşınma tabakasında kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

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.

Ardahanlı M., 2020, Atık seramik, çinko cürufu ve obsidiyen kullanılarak üretilen betonların mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Atheer M. A., Tariq A. M., 2021, Investigation of asphalt binder performance modified with ceramic waste powder. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1090(1), 012055.

Atheer M. A., 2022, Laboratory evaluatıon of the mechanıcal performance of hot mıx asphalt modıfied wıth ceramıc waste powder as fıller. Journal of Engineering Science and Technology, 17(4), 2861-2876.

Baraldi L., 2022, World pruduction and consumption of ceramic tiles, Ceramic World Review, ISSN 1121-0796, 36-51.

Ecevit, O., 2007, Karayollarında rijit üstyapı uygulamaları ve tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Er A., 2011, Özel öğütülmüş lastik atığı içeren asfalt betonunun performans özelliklerinin belirlenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ertaş, M. A., 2019, Asfalt betonu aşınma tabakalarında kazınmış asfalt kaplama malzemelerinin yeniden kullanım etkinliğinin ve performansının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

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.

Feng, D., Yi, J., Wang, D., 2013, Performance and thermal evaluation of incorporating waste ceramic aggregates in wearing layer of asphalt pavement. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(7), 857–863.

# KAYNAKLAR DİZİNİ

Fındık, F.S., 2005, Karayolu esnek üstyapıları alttemel tabakasının stabilizasyonunda hafif agregaların kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Haritonovs, V., Zaumanis, M., Brencis, G., Smirnovs, J., 2013, Asphalt concrete performance with conventional and waste aggregates. International Journal of Pavement Research and Technology, 6(5), 505–510.

Ilıcalı, M., 1988, Karayolu üstyapısında erdemir cürufunun kullanılabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K., 2001, Asfalt ve uygulamaları, İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul.

Jegatheesan, N., Rengarasu, T., Bandara, W. M. K. R. T. W., 2017, Investıgatıon into the suıtabılıty of waste materıals ın asphalt concrete, Cıvıl and Envıronmental Engıneerıng Socıety 57-78.

Kara, Ç., 2012, Fayans atıkların bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kara, Ç., Karacasu, M., 2017, Investigation of waste ceramic tile additive in hot mix asphalt using fuzzy logic approach. Construction and Building Materials, 141, 598–607.

Karabel, Ü. B., 2017, Atık döküm kumunun bitümlü sıcak karışımlarda kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karacasu, M., Bilgiç, Ş., 2009, Atık lastik katkısının sıcak asfalt özelliklerine etkisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(2), 46-64.

Karacasu, M., 2016, Yol üstyapı deneyleri ders notları. Sözkesen Matbaacılık Tic. Ltd. Şti. Ankara.

Karakaş, A. S., 2014, Bitümlü sıcak karışımların trafik etkisi altında mekanik özelliklerinin incelenmesi, Doktora tezi, Fırat Üniversite Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kayacı, B., 2006, Proses ham atığının seramik karo bünyelerde kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Keskin M., 2019, Bor kaynaklı çevresel atıkların bitümlü sıcak karışımların performansına etkisi ve modellenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

# KAYNAKLAR DİZİNİ

KGM, 2013, Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, 2013.

Kilerci, D. K., 2002, Aşınma direnci yüksek yer karosu sırlarının üretim imkanlarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kuloğlu, N., Kök, B. V., Öndaş, M. (2004). Sathi kaplamalarda kusma olayına etki eden faktörler. 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 141-148.

Kumar, A. M., Chand, K. S., 2022, Study on effect of ceramic waste as a filler in bituminous concrete mix, International Journal For Advanced Research In Science & Technology, 12(6), 264-274.

Lim, M. B., Mortera R. I. M., Pangılınan, D. J. C. B., Macarıo, V. S. P., 2019, Pulverized ceramic tile waste as potential mineral filler in hot mix asphalt, Conference: 13th Conference of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Colomba, Sri Lanka.

Lokesh, Y., 2018, Study on the effect of stone, dust, ceramic dust and brick dust as fillers on the strength, physical and durability properties of bituminous concrete (BC-II) mix, International Journal of Applied Engineering Research, 13(7), 203-208.

Modarres, A., Rahmanzadeh, M., 2014, Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt, Construction and Building Materials, 66, 476–483.

Muniandy, R., Ismail, D. H., Hassim, S., 2019, Performance of Recycled Ceramic Waste as Aggregates in Asphalt Mixtures, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 7(6).

Nouman, M., Maqbool, Z., Ali, S., Saleem, A., 2022. Performance evaluation of wearing course asphalt mixes based on resilient modulus, ındirect tensile strength and marshall stability, International Journal of Pavement Research and Technology, 15(1), 63-72.

Ogundipe, O. M., Nnochiri, E. S., 2020, Evaluation of the effects of waste glass in asphalt concrete using the Marshall test. Engineering Review, 40(2), 24–33.

Orhan F., 2012, KGM, Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.

Oyedepo, O. J., 2019, Utilization of Industrial Waste Products in the Production of Asphalt Concrete for Road Construction, Slovak Journal of Civil Engineering, 27(4), 11–17.

Öksüz, B., 2011, Asfalt betonu kaplamalarda volkanik cüruf ve cam atıklarının filler olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

# KAYNAKLAR DİZİNİ

Önal, A., Kahramangil, M., 1993, Bitümlü karışımlar laboratuar el kitabı, K.G.M Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Öner J., 2020, Seramik atıklarıyla hazırlanan asfalt karışımların soyulmaya karşı dayanımının belirlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20 (2020) 035602 (498-505).

Özey, İ., 1992, Rijit üstyapı ve rijit üstyapı ile esnek üstyapının karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Öztürk T., Komut M., 2021, KGM, Bitümlü sıcak karışım kaplamalar çatlak kapama rehberi, Araştırma ve geliştirme dairesi başkanlığı üstyapı geliştirme şubesi müdürlüğü, Ankara.

Rambaldi, E., Valeriani, L., Grandi, L., Beneventi, C., Bignozzi, M. C., 2018, Hıgh-recyclıng content porcelaın stoneware tıles: from ındustrıal productıon to product certıfıcatıon, In Qualicer 2018 "XV Congr. Mund. La Calid. Del Azulejo Y Del Paviment Ceramico" Spain, 1-10.

Rashid, G. M. H., Mamun, A. A., Epu, I. E., 2019, Partial Replacement of Ceramic Tile Dust in Bituminous Mix, In Architecture and Civil Engineering.

Sargın Ş., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., Terzi, S., 2013, Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete, Construction and Building Materials, 48, 390–397.

Savaş F., 2022, 1980'den günümüze Türk seramik karo endüstrisinde duvar ve yer karosu tasarımlarının incelenmesi, International Journal of Humanities and Art Researches, Cilt 7, Sayı 3, 241-255.

Saygı, M., 2019, Seramik atıklarının asfalt endüstrisinde kullanımı, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Selçuk, S., 2019, Atık floresan camlarının asfalt betonu kaplamalarında filler olarak kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Seren, I. S., 2015, Elektrik ark fırını cürufunun yapay agrega olarak esnek üstyapılarda çimento bağlayıcılı granüler temel tabakasında kullanılabilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

SGM, 2021, Seramik Sektörü Raporu, Sektörel Raporlar ve Analizler Serisi.

Shamsaei, M., Khafajeh, R., Ghasemzadeh Tehrani, H., Aghayan, I., 2020, Experimental evaluation of ceramic waste as filler in hot mix asphalt. Clean Technologies and Environmental Policy, 22(2), 535–543.

# KAYNAKLAR DİZİNİ

Shuaibu, A. A., Umar, A. M., Otuoze, H. S., Mohammed, A., Abba, A. M., 2020, Optimum portland cement-guinea corn husk ash blend as filler in hot mix asphalt self-healing concrete view project, Covenant Journal of Engineering Technology (CJET), 4(2), 56-66.

Silvestre, R., Medel, E., García, A., Navas, J., 2013, Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses, Construction and Building Materials, 45, 115–122.

STB, 2018, Seramik karo imalatı kaynak verimliliği rehberi, Ankara.

Sugiyanto, G., 2017, Marshall test characterıstıcs of asphalt concrete mıxture wıth scrapped tıre rubber as a fıne aggregate, Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), 79(2), 55-64.

Sung Do, H., Hee Mun, P., Suk keun, R., 2008, A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime. Waste Management, *28*(1), 191–199.

Sümen B., 2022, Serpantinin asfalt betonunda filler olarak kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tagbor, T. A., Mohammed, L., Mohammed, M., Bruce-Mensah, M. M., Tekpetey, S., Armoo, E. A., Adomah, R., Arthur, T. D., Agyenim, F. B., Amoah, J. Y., Laryea, G. N., Serkan Kirghiz, M., 2022, The utilization of palm kernel shells and waste plastics in asphaltic mix for sustainable pavement construction. Scientific African, 16.

Tanyıldızı, M. M., Geçkil, T., 2019, AASHTO Metodunda Rijit ve Esnek Üstyapıların Projelendirilmesinde Kullanılan Parametrelerin İncelenmesi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 31 (1) , 187-194 .

TSF Dergisi, 2022, Seramik Türkiye(62), ISSN 1304 – 6578.

TSF, 2022, Çimento, Cam, Seramik ve Toprak Ürünleri İhracatçıları Birliği, 9. Seramik Sektör Buluşması, Seramik Sektörü Dünya ve Türkiye Verileri.

Tunç, A., 2004, Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara.

Tunç, A., 2007, Yol malzemeleri ve uygulamaları, Nobel Yayın Dağıtım 2.Baskı, Ankara.

Tutan, S. N., Komut M., 2020, Sathi Kaplama Dizayn Rehberi, Araştırma ve geliştirme dairesi başkanlığı üstyapı geliştirme şubesi müdürlüğü, Ankara.

Umar, F., Ağar, E., 1991, Yol Üstyapısı, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

# KAYNAKLAR DİZİNİ

Üstünkol, F.N.E., 2006, Endüstriyel atıkların esnek yol üstyapısında kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Varol, H., 2019, Geri kazanılmış asfalt betonunun bitümlü temel tabakasında kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Wafaie, Z., 2022, Seramik kek atığının asfalt betonunda değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Wibowo, D. E., Fariza, N., Pramudiyanto, Mahardi, P., Prayuda, H., 2021, The Effect of Pulp Cane Ash Filler and Concrete Waste as Replacement of Coarse Aggregate to the Marshall Characteristic on Asphalt Concrete Mixtures. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 832(1).

Yayla N., 2004, Karayolu Mühendisliği, Biresen Yayınevi, İstanbul.

Yelken, F., 2009, Belen-Topboğazı (Hatay) arası yol yapım çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yıldırım, Z. B., Karacasu, M., Okur, V., 2020, Optimisation of marshall design criteria with central composite design in asphalt concrete. International Journal of Pavement Engineering, 21(5), 666-676.

Yılmaz D., 2019, Kentsel dönüşüm sürecinde yıkılan binalardan dolayı ortaya çıkan beton atıklarının granüler yol tabakasında agrega olarak kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.