T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ASFALT BETONU AŞINMA TABAKALARINDA KAZINMIŞ ASFALT KAPLAMA MALZEMELERİNİN YENİDEN KULLANIM ETKİNLİĞİNİN VE PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Akif ERTAŞ

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Salih BEKTAŞ

AKSARAY, 2019

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **132303001** numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **Mehmet Akif ERTAŞ** tarafından hazırlanan **"ASFALT BETONU AŞINMA TABAKALARINDAN KAZINMIŞ ASFALT KAPLAMA MALZEMELERİNİN YENİDEN KULLANIM ETKİNLİĞİNİN ve PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI"** adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / ~~OY ÇOKLUĞU~~ ile İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Salih BEKTAŞ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~. .

Üye: Prof. Dr. Ali Payidar AKGÜNGÖR

Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.

Üye: Doç.Dr. Ömer KÖSE

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.

Tez Savunma Tarihi: 26/04/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Doç. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Mehmet Akif ERTAŞ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde bana her türlü desteği veren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Salih BEKTAŞ 'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresince beni sürekli azimlendiren, her türlü desteği veren mesai arkadaşım Kimya Yüksek Mühendisi Kübra VENEDİK 'e, bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim İnşaat Yüksek Mühendisi S. Nedim TUTAN 'a, deney çalışmalarında bana yardımcı olan Araştırma ve Geliştirme Başmühendisliği Laboratuvar teknisyeni arkadaşlarıma ve literatür konusunda çok değerli yardımlarını gördüğüm İnşaat Mühendisi Ali ÖZKARA 'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yaşamım boyunca bana maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemeyen annem Hatice ERTAŞ ve babam İbrahim ERTAŞ 'a, tez çalışmaları sırasında ihmal ettiğim kıymetli eşim Zeynep ERTAŞ 'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezimi kızım Hatice Kübra ERTAŞ 'a ve oğlum Muhammed Talha ERTAŞ 'a armağan ediyorum.

Mehmet Akif ERTAŞ

AKSARAY, 2019

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET iiv
ABSTRACT v
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
ÇİZELGELER DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR ix
1. GİRİŞ 1
1.1 Çalışmanın Amacı 1
1.2 Genel Bilgiler 2
1.2.1 Bitümlü bağlayıcılar 2
1.2.2 Bitüme uygulanan deneyler 5
1.2.2.1 Penetrasyon deneyi 6
1.2.2.2 Yumuşama noktası deneyi 7
1.2.2.3 Parlama noktası deneyi 8
1.2.2.4 Çözünürlük deneyi 8
1.2.2.5 Düktilite ve elastik geri dönme deneyi 9
1.2.2.6 Özgül ağırlık deneyi 10
1.2.2.7 Döner viskozimetre 11
1.2.2.8 Dönmeli ince film etüvü (RTFOT) 11
1.2.2.9 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) 12
1.2.2.10 Kiriş eğilme reometresi (BBR) 13
1.2.2.11 Dinamik kesme reometresi (DSR) 14
1.2.3 Bitümlü karışım agregaları 14
1.2.3.1 Agregalara yapılan deneyler 14
1.3 Yol Üst Yapısı 23
1.3.1 Rijit üstyapılar 24
1.3.2 Yarı rijit üstyapılar 25
1.3.3 Esnek üstyapılar 25
1.3.3.1 Sathi kaplamalar 26
1.3.3.2 Bitümlü sıcak karışımlar 27
1.3.4 Bitümlü sıcak karışım kaplamalı esnek üstyapılardaki yüzey bozuklukları 29
1.3.4.1 Timsah sırtı çatlaklar 30
1.3.4.2 Kenar çatlakları 32
1.3.4.3 Enine çatlaklar 33
1.3.4.4 Boyuna çatlaklar 34
1.3.4.5 Blok (Harita) çatlaklar 34
1.3.4.6 Tekerlek izinde oturmalar 35
1.3.4.7 Ondülasyon, ötelenme ve yoğrulmalar 37
1.3.4.8 Lokal oturmalar 37
1.3.4.9 Çukurlar 38
1.3.4.10 Segregasyon, soyulma ve sökülmeler 38
2. BOZULMUŞ ASFALT KAPLAMALARININ GERİ DÖNÜŞÜMÜ 40
2.1 Geri Dönüşüm Önemi 40
2.2 Geri Dönüşüm Yöntemleri 42
2.2.1 Soğuk düzeltme (CP) 44
2.2.2 Sıcak geri dönüşüm (HR) 46
2.2.3 Yerinde sıcak geri dönüşüm (HIR) 48

2.2.4 Soğuk geri dönüşüm (CR) ... 53
2.2.5 Tam derinlikli geri dönüşüm (FDR) ... 57
3. LİTERATÜR ÖZETİ ... 60
4. MALZEME VE YÖNTEM ... 65
4.1 Malzeme ... 65
4.1.1 Cihazlar ... 69
4.2 Yöntem ... 69
4.2.1 RAP malzemesinin agrega ve bitüm özelliklerinin belirlenmesi ... 70
4.2.1.1 RAP agregalarının gradasyonunun belirlenmesi ... 71
4.2.1.2 RAP malzemesinin bitüm içeriği ve özelliklerinin belirlenmesi ... 71
4.2.2 Çalışmalarda kullanılacak yeni agrega özelliklerinin belirlenmesi ... 72
4.2.3 Çalışmalarda kullanılacak bitümlerin özelliklerinin belirlenmesi ... 72
4.2.4 Marshall dizaynları ... 73
4.2.4.1 Karışım gradasyonu ... 74
4.2.4.2 Dizayn agregalarının özgül ağırlık ve absorbsiyonlarının belirlenmesi ... 74
4.2.4.3 Dizaynda kullanılacak bitümlerin özgül ağırlıklarının belirlenmesi ... 77
4.2.4.4 Marshall briketlerinin hazırlanması ve parametrelerin hesaplanması ... 78
4.2.4.5 Karışımların optimum bitümünün belirlenmesi ... 82
4.2.5 Karışımların indirek çekme mukavemeti oranlarının (ITS) belirlenmesi ... 82
4.2.6 Karışımların tekerlek izinde oturmalarının belirlenmesi ... 84
5. BULGULAR ... 88
5.1 Bitümlerin Fiziksel Özelliklerine Ait Bulgular ... 88
5.1.1 Penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri ... 88
5.1.2 BBR ve DSR deneyi bulguları ... 90
5.1.3 Agregaların özelliklerine ait bulgular ... 91
5.2 Marshall Dizaynı Bulguları ... 92
5.2.1 Gradasyon bulguları ... 92
5.2.2 Özgül ağırlık bulguları ... 95
5.2.3 Marshall dizaynı parametreleri bulguları ... 97
5.2.3.1 Yeni materyal karışıma ait bulgular ... 97
5.2.3.2 %15 RAP karışımına ait bulguları ... 100
5.2.3.3 %25 RAP karışımına ait bulguları ... 102
5.2.3.4 %30 RAP karışımına ait bulguları ... 104
5.2.3.5 Karışımlara Ait Marshall Parametrelerinin Kıyaslanması ... 106
5.3 İndirek Çekme Mukavemeti Deneyi Bulguları ... 109
5.4 Tekerlek İzinde Oturma Deneyi Bulguları ... 110
6. SONUÇLAR ... 114
KAYNAKLAR ... 116
ÖZGEÇMİŞ ... 121

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ASFALT BETONU AŞINMA TABAKALARINDA KAZINMIŞ ASFALT KAPLAMA MALZEMELERİNİN YENİDEN KULLANIM ETKİNLİĞİNİN VE PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Mehmet Akif ERTAŞ

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Salih BEKTAŞ

ÖZET

Mevcut yolun iyileştirilmesi sırasında kaldırılan kaplamanın atık olarak değerlendirilmesi bir takım sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Bu sebeple bozulmuş aşınma tabakasının yenilenmesi işlemi sırasında yoldan kazılan asfalt tabakasının tekrar aşınma tabakasında yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması için bu çalışma yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında yoldan geri kazanılan asfalt kaplamalarından kazanılan bitüm çeşitli oranlarda yeni bitümle karıştırılarak bitüm numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, RTFOT, PAV, DSR ve BBR deneyleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deney sonucu şartname limitini sağlamayan karışıma, deney sonuçlarına göre geri kazanılan bitüm oranın içeriğinin yüzde %3'ü kadar VIATOP® plus RC gençleştirici katkı ilave edilmiştir. Yeni agrega ve bitüme belirli oranlarda RAP malzemesi karıştırılarak hazırlanan karışımlar, şartnamede istenen testlere tabi tutulmuş ve karışımların deney sonuçlarının şartnameye uygunluğu tespit edilmiş ayrıca sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Her karışım, Marshall parametreleri ve ITS oranları açısından şartname kriterlerini sağlamış ancak yapılan TİO deneyi sonucunda %0 RAP'lı karışım hariç RAP malzemeli karışımlar şartname kriterini sağlamamıştır. Buna rağmen RAP malzemeli karışımların şartname limitine çok yakın oldukları görülmüştür. Ancak yapılacak önemli birkaç değişiklikle RAP malzemeli karışımların tekerlek izi performansının iyileştirilerek RAP malzemesinin aşınma tabakasında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Aşınma tabakasının geri dönüşümü, RAP, Marshall dizaynı, İndirekt çekme deneyi, Tekerlek izinde oturma deneyi.

Mayıs, 2019; 121 sayfa

M.Sc. THESIS

RESEARCH OF USAGE AND PERFORMANCE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT AS A ASPHALT CONCRETE WEARING COURSE

Mehmet Akif ERTAŞ

Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor : Assist. Prof. Salih BEKTAŞ

ABSTRACT

In the improvement of the existing road, the removal of the raised coating as a waste creates a number of problems. For this reason, this study was conducted to investigate the re-use of the asphalt layer that was excavated from the road during the renewal of the wear course.

In this study, bitumen samples were prepared by mixing the bitumen with new bitumen in various ratios from the asphalt pavements recovered from the road. These samples penetration, softening point, RTFOT, PAV DSR andBBR test was conducted and the results were compared. According to the results of the test, the VIATOP® plus RC according to the test results . Mixtures prepared by mixing new aggregate and bitumen RAP material in certain proportions have been subjected to the tests required in the specification and the results of the experiment were determined of suitability of according to the specifications and the results were compared. (New aggregate and bitumen in specific proportions to the RAP material specifications with stirring and subjected to desired test requirement was compliance test condition of the test results were also evaluated.)

Each mixture was allows specification by the terms of parameters and Marshall ITS rate but also a result of the rutting test mixture excluding 0% RAP RAP-material mixtures were supply specification criteria. In spite of this, it is seen that the mixtures with RAP materials are very close to the specification limit. However, with a number of important changes to be made, it was concluded that the rays of RAP material can be used in the abrasion layer of Rap material by improving the wheel trace performance.

Keywords: Recycling of wearing course, RAP, Marshall design, Indirect tensile test, Rutting test.

May, 2019; 121 Pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Asfaltın içeriğindeki maddeler 3
Şekil 1.2. Bitüm üretimi şematik diyagramı 4
Şekil 1.3. Penetrasyon deneyi yapım aşamaları 6
Şekil 1.4. Yumuşama deneyi yapım aşamaları 7
Şekil 1.5. Parlama noktası deneyi yapım aşamaları 8
Şekil 1.6. Çözünürlük deneyi 9
Şekil 1.7. Düktilite ve elastik geri dönme deneyi 10
Şekil 1.8. Özgül ağırlık deneyi 11
Şekil 1.9. Döner viskozimetre deneyi 11
Şekil 1.10. Dönmeli ince film etüvü (RTFOT) deneyi yapım aşamaları 12
Şekil 1.11. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi yapım aşamaları 13
Şekil 1.12. Kiriş eğilme reometresi (BBR) deneyi yapım aşamaları 13
Şekil 1.13. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi yapım aşamaları 14
Şekil 1.14. Elek analizi 15
Şekil 1.15. Los angeles cihazı 16
Şekil 1.16. Mikro deval cihazı 17
Şekil 1.17. Yassılık indeksi şablon çeşitleri 19
Şekil 1.18. Soyulma mukavemeti deneyi 20
Şekil 1.19. Metilen mavisi deneyi 22
Şekil 1.20. Üstyapıyı oluşturan tabakalar ve tabaka türleri 24
Şekil 1.21. Yol üstyapısı tip enkesiti (KTŞ, 2013) 25
Şekil 1.22. Bitümlü sıcak karışım tabakaları 28
Şekil 1.23. Köşeli agrega (1) ve yuvarlak agrega (2) 28
Şekil 1.24. Timsah sırtı (yorulma) çatlak 31
Şekil 1.25. Kenar çatlakları 32
Şekil 1.26. Enine çatlak 34
Şekil 1.27. Boyuna çatlak 34
Şekil 1.28. Blok (Harita) çatlak 35
Şekil 1.29. Zayıf alt tabakadan kaynaklanan tekerlek izinde oturma 35
Şekil 1.30. Zayıf karışımdan kaynaklanan tekerlek izinde oturma 36
Şekil 1.31. Ondülasyon, ötelenme ve yoğrulma 37
Şekil 1.32. Lokal oturma 38
Şekil 1.33. Çukur 38
Şekil 1.34. Segregasyon, soyulma, sökülme 39
Şekil 2.1. Geri dönüşüm yöntemlerinin sınıflandırılması 43
Şekil 2.2. Tipik ön yüklemeli freze makinesi 44
Şekil 2.3. Yarım şerit soğuk düzeltme makinesi 44
Şekil 2.4. Sıcak geri dönüşüm için RAP beslemeli Batch Tipi plent 47
Şekil 2.5. Sıcak geri dönüşüm için RAP beslemeli Drum-mix Tipi plent 47
Şekil 2.6. Yüzeysel geri dönüşüm ısıtma üniteleri 49
Şekil 2.7. Yüzeysel geri dönüşüm kazıma dişleri 49
Şekil 2.8. Geri dönüşüm karışımın serilmesi 50
Şekil 2.9. Yerinde sıcak geri dönüşüm karıştırma treni 50
Şekil 2.10. Tek aşamalı karıştırma treni 51
Şekil 2.11. Çok aşamalı karıştırma treni ile kazılıp öbeklenen kaplama 51
Şekil 2.12. Çok geçişli yeniden yapım uygulaması 52

Şekil 2.13. Tek geçişli yeniden yapım uygulaması 53
Şekil 2.14. Yerinde soğuk geri dönüşüm uygulaması 55
Şekil 2.15. Soğuk geri dönüşüm plenti 56
Şekil 2.16. CCPR Karışımının serilmesi 56
Şekil 2.17. Tam derinlikli geri dönüşüm uygulaması 58
Şekil 4.1. RAP Malzemesi 70
Şekil 4.2. İnfiratest marka asfalt analizatörü 70
Şekil 4.3. Elek analizi 71
Şekil 4.4. Heidolph marka evaporatör cihazı 72
Şekil 4.5. Bitümlere yapılan deneyler 73
Şekil 4.6. Özgül ağırlık deneyleri 74
Şekil 4.7. Marshall briketlerinin hazırlanması 79
Şekil 4.8. Marshall briketlerinin Dp'lerinin tespiti 80
Şekil 4.9. Marshall stabilitesi deneyi 82
Şekil 4.10. ITS deneyi 83
Şekil 4.11. T.İ.O numunesi karıştırma mikseri 85
Şekil 4.12. T.İ.O kompaktörü ile numunelerin sıkıştırılması 85
Şekil 4.13. Numunelerin alçılanması 86
Şekil 4.14. Tekerlek izinde oturma deneyi 87
Şekil 5.1. Dizayn gradasyonu ve şartname limitleri grafiği 94
Şekil 5.2. Marshall dizaynı grafikleri (%0 RAP) 99
Şekil 5.3. Marshall dizaynı grafikleri (%15 RAP) 101
Şekil 5.4. Marshall dizaynı grafikleri (%25 RAP) 103
Şekil 5.5. Marshall dizaynı grafikleri (%30 RAP) 105
Şekil 5.6. Her karışıma ait marshal dizaynı Dp değerleri 106
Şekil 5.7. Her karışıma ait marshall dizaynı VFA değerleri 107
Şekil 5.8. Her karışıma ait marshall dizaynı VMA değerleri 107
Şekil 5.9. Her karışıma ait marshal dizaynı stabilite değerleri 108
Şekil 5.10. Her karışıma ait marshal dizaynı akma değerleri 108
Şekil 5.11. Her karışıma ait ITS değerleri 109
Şekil 5.12. Yeni materyal karışımı tekerlek izi grafiği 110
Şekil 5.13. %15 RAP karışımı tekerlek izi grafiği 111
Şekil 5.14. %25 RAP karışımı tekerlek izi grafiği 112
Şekil 5.15. %30 RAP karışımı tekerlek izi grafiği 113
Şekil 5.16. Karışımlara ait 20000 teker geçişinde oluşan tekerlek izi derinlikleri .. 113

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Elek analizinde kullanılacak elek açıklıkları 15
Çizelge 1.2. Fraksiyonlara göre alınacak minimum malzeme miktarı 19
Çizelge 1.3. Piknometre deneyi için numune miktarları..... 23
Çizelge 2.1. Bozulma türüne göre kullanılan geri dönüşüm yöntemi seçimi 43
Çizelge 4.1. KTŞ Tip-1 aşınma tabakası için gradasyon limitleri 65
Çizelge 4.2. KTŞ-2013 kaba agreganın mekanik ve fiziksel özellikleri..... 66
Çizelge 4.3. KTŞ-2013 ince agreganın özellikleri..... 66
Çizelge 4.4. KTŞ-2013 mineral fillerin gradasyom limit.leri..... 67
Çizelge 4.5. KTŞ-2013 50/70 Penetrasyon sınıfı bitüm özellikleri..... 67
Çizelge 4.6. Mevcut aşınma tabakasındaki agrega ve bitümün özellikleri..... 68
Çizelge 4.7. VIATOP® plus RC maddesinin granül özellikleri ……..…...69
Çizelge 5.1. Bitüm penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri 89
Çizelge 5.2. Katkı oranlarına göre penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri..... 89
Çizelge 5.3. RTFO deneyi sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçları 90
Çizelge 5.4. Bitümlerin RTFO+PAV sonrası BBR deneyi sonuçları..... 91
Çizelge 5.5. Bitümlerin RTFO+PAV sonrası DSR deneyi sonuçları 91
Çizelge 5.6. Yeni agreganın deney sonuçları..... 92
Çizelge 5.7. RAP malzemesinin agrega gradasyonu 92
Çizelge 5.8. Yeni materyalle (%0 RAP) yapılacak dizaynın agrega gradasyonu..... 93
Çizelge 5.9. %15 RAP'lı yapılacak dizaynın agrega gradasyonu 93
Çizelge 5.10. %25 RAP'lı yapılacak dizaynın agrega gradasyonu 93
Çizelge 5.11. %30 RAP'lı yapılacak dizaynın agrega gradasyonu 94
Çizelge 5.12. Kaba agrega özgül ağırlık ve absorbsiyonları 95
Çizelge 5.13. İnce agrega özgül ağırlık ve absorbsiyonları 95
Çizelge 5.14. Fillerin zahiri özgül ağırlıkları..... 95
Çizelge 5.15. Karışımların teorik ve efektif özgül ağırlığı 96
Çizelge 5.16. Karışımların hacim, zahiri ve efektif özgül ağırlıkları 96
Çizelge 5.17. Bitüm özgül ağırlıkları..... 96
Çizelge 5.18. Yeni materyal karışımının marshall dizayn verileri 98
Çizelge 5.19. Dizayn sonuçları 98
Çizelge 5.20. %15 RAP'lı karışımın marshall dizayn verileri..... 100
Çizelge 5.21. Dizayn sonuçları 100
Çizelge 5.22. %25 RAP'lı karışımın marshall dizayn verileri..... 102
Çizelge 5.23. Dizayn sonuçları 102
Çizelge 5.24. %30 RAP'lı karışımın marshall dizayn verileri..... 104
Çizelge 5.25. Dizayn sonuçları 104
Çizelge 5.26. Karışımlara ait ITS sonuçları..... 109
Çizelge 5.27. Yeni materyal karışımına ait tekerlek izi deneyi sonuçları 110
Çizelge 5.28. %15 RAP'lı karışıma ait tekerlek izi deneyi sonuçları..... 111
Çizelge 5.29. %25 RAP'lı karışıma ait tekerlek izi deneyi sonuçları..... 112
Çizelge 5.30. %30 RAP'lı karışıma ait tekerlek izi deneyi sonuçları..... 112

SİMGELER VE KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Asfalt Betonu
ASTM	Amerikan Society for Testing and Materials / Amerikan Deney ve Malzeme Kurumu
BBR	Kiriş Eğilme Reometresi
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
cm	Santimetre
CP	Soğuk Düzeltme
CR	Soğuk Geri Dönüşüm
D_p	Pratik özgül ağırlık (g/cm^3)
DSR	Dinamik Kesme Reometresi
D_t	Teorik özgül ağırlık (g/cm^3)
FDR	Tam Derinlikli Geri Dönüşüm
G^*	Kompleks kesme modülü
gr	Gram
HIR	Yerinde Sıcak Geri Dönüşüm
HMA	Sıcak Karışım Asfalt
HR	Sıcak Geri Dönüşüm
ITS	İndirek Çekme Mukavemeti
inch	ABD Uzunluk birimi (2,54 cm)
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi
L	Litre
mL	Mililitre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
nm	Nanometre
PAV	Basınçlı Yaşlandırma Kabı
RAP	Geri Kazanılan Asfalt Kaplaması
RTFOT	Dönmeli İnce Film Etüvü
s	Zaman (saniye)
TİO	Tekerlek İzinde Oturma
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
V	Hacim (m^3)
VFA	Voids Fillet With Asphalt / Asfalt Dolu Boşluk
V_h	Briketteki hava boşluğu, %,
VMA	Voids in Mineral Aggregate / Agregalar Arası Boşluk
δ	Faz açısı
°C	Sıcaklık birimi (Celsius)

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Karayollarında kullanılan esnek üstyapılar, hizmet verdiği trafiğin tekrarlı yükleri ve çevrenin olumsuz etkisi altında zamanla bozulmaya başlarlar. Bu yükler altındaki esnek üstyapı, üzerine gelen yükleri şekil değiştirerek sönümlerler. Ancak esnek üstyapı tabakalarının elastik davranışı sürekli bu gerilim-gerinim sarmalı ve çevreninin olumsuz etkileri ile zaman içerisinde plastik deformasyona dönüşür. Plastik deformasyon, esnek üstyapı davranışının Hooke Kanunu bölgesinden çıktığı, esnek üstyapının maruz kaldığı yükler sonucu yaptığı şekil değişikliğinin üzerine gelen bu yüklerin kaldırılmasıyla artık eski formuna dönememe halidir. Plastik deformasyon esnek üstyapı kaplamalarında, çatlaklar, tekerlek izinde oturmalar, yoğrulmalar vb. şekilde görülmektedir.

Plastik deformasyonlar sonucu servis ömrü dolan kaplamaların kazılıp kaldırılması gerekmektedir. Kaldırılan kaplamalar, bir şekilde tekrar kullanılmaması halinde iki tür olumsuzlukla karşılaşılmaktadır. Bunlardan birincisi kazıma sonucu elde edilen atık maddelerin yarattığı çevre kirliliği, diğer ise kaldırılan kaplamaların yerine teşkil edilecek yeni kaplamanın imal edilmesi sonucu olarak doğal kaynakların tahribi ve gereksiz enerji sarfiyatı.

Deformasyonların en yoğun olduğu esnek üstyapı tabakası, esnek üstyapıların en üst tabakasını oluşturan aşınma tabakasıdır. Çünkü aşınma tabakası trafik yüklerine ilk maruz kalan ve açıkta olması nedeniyle çevrenin olumsuz etkilerinden en çok etkilenen esnek üstyapı tabakasıdır. Böylece üstyapı yenileme işlemlerinin hepsinde aşınma tabakası kaldırılarak yenilenmektedir. Bu da gösteriyor ki, kaldırılan aşınma tabakasının tekrar aynı tabakanın imalatında kullanılması büyük önem arz etmektedir.

Bu sebeple yolun bozulmuş aşınma tabakasından kazılan asfalt malzemesinin belirli oranlarda yeni materyal ile karıştırarak Marshall yöntemine göre asfalt betonu aşınma dizaynları ile bu dizayn sonuçlarına göre oluşturulan karışımlara indirekt çekme mukavemeti, tekerlek izinde oturma deneyleri yapılmış ve geri kazanılan asfalt malzemesinin aşınma tabakasında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca geri kazanılan bitüm ve yeni bitüm karışımlarına penetrasyon, yumuşama noktası

deneyleri yapılmış ve bu deneylere göre muhtelif oranlardaki geri kazanılan bitüm ihtiva eden karışımların hangisine gençleştirici katkı maddesinin hangi oranda katılacağı tespit edilmiştir. Bu işlemden sonra muhtelif oranlardaki geri kazanılan bitüm ile yeni bitüm karışımları dönmeli ince film halinde ısıtma etüvünde daha sonra da basınçlı yaşlandırma kabında koşullandırılmış, ardından bu karışımlara kiriş eğme reometresi, dinamik kesme reometresi deneyleri yapılmıştır. Böylece bitüm karışımlarının performansları karşılaştırılmıştır.

1.2 Genel Bilgiler

1.2.1 Bitümlü bağlayıcılar

Bitüm Sanskritçe, Asfalt ise Akadça kökenli bir kelimedir. Sert, kırılmaz-parçalanmaz anlamında kullanılmıştır. Geçmiş çağlardan bu yana doğal göl ve kaya asfaltının (reçine halinde) yol ve yüzey kaplamalarında uygulandığına dair arkeolojik bulgulara rastlanmaktadır. Arkeik dillerde değişik anlam ve söyleniş biçimlerinden sonra, 'bitüm' kelimesi Avrupa Ülkelerinde, 'asfalt' kelimesi ise ABD'deki şartnamelerde yaygın kullanılmaktadır. Türk Şartnameleri genelde ABD'den alındığı için KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) uygulamalarında da yol üstyapılarında kullanılan rafineri kökenli bağlayıcılara 'asfalt çimentoları' denilmiştir (Acar, 2011).

Genel tanımıyla bitüm; yapısında hidrokarbon ve türevlerini barındıran, uçucu özelliği taşımayan, ısıtma işlemi ile yumuşayabilen ve yalnızca trikloretilen içerisinde çözünebilen viskoz bir sıvı ve/veya katı organik bir maddedir. Bitüm, petrolün damıtılması (rafineri işlemi) sonucunda elde edilebildiği gibi doğal bir birikinti (Trinidad Gölü) veya içerisinde mineral maddelerle birlikte doğal bir şekilde ortaya çıkmış asfaltın bir bileşiği olarak da bulunabilmektedir (Lav ve Lav, 2004).

Bitümlerin ortak özellikleri şöylece sıralanabilir (Yiğiter, 2011):

- Sıcaklık derecesine bağlı olarak katı, yarı katı veya akıcı kıvamda olabilirler.
- Siyah veya koyu renklerdedirler.
- Yüksek moleküler ağırlıkları vardır.
- Bağlayıcı (adhesif) özellikleri vardır.
- Çatlama ve ayrılma olmaksızın geçirimsiz ve plastik filmler meydana getirerek şekil değiştirme özelliğine (kohezyon) sahiptirler.

- Bitümlü malzemelerin yapışma ve düktilite özellikleri, karayolu ve kaplama işlerinde bu malzemeleri cazip kılmaktadır. Bitümlü malzemelerin; petrol kökenli olanları asfalt, kömür kökenli olanları katran adını alırlar. Katranın kalıntısı ise zifttir.
- ASTM'ye (Amerikan Deney ve Malzeme Kurumu) göre asfalt; "Rengi siyahtan koyu kahverengiye kadar değişebilen, kıvamı katı ya da yarı katı olan, ısıtıldığı zaman yavaş yavaş yumuşayan, bileşimindeki esas madde bitüm olan ve doğada katı ya da yarı katı halde bulunabilen veya ham petrolün distilasyonu ile elde edilen veya değişik orijinli bitümlerin karışımından oluşan bağlayıcı malzeme" olarak tanımlanır. Asfaltın kimyasal yapısı hidrokarbonların kompleks bir karışımıdır.
- İçinde yaklaşık oranlarda şu elementler bulunur:

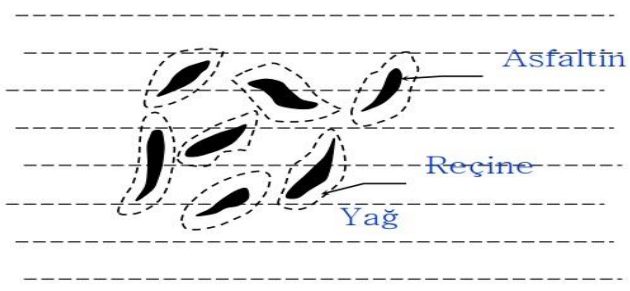
  Karbon %70-85

  Hidrojen %7-12

  Nitrojen %0-1

  Sülfür %1-7

  Oksijen %0-5
- Metaller çok az miktarda (oksit, tuz veya metal içeren organik bileşikler halinde) C/H oranı asfaltın davranış ve özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Bu oran düştükçe asfaltın moleküler ağırlığı ve viskozitesi de düşer. Kolloidal bir yapıda bulunan asfaltın yapısal elemanlarının Şekil 1.1.' de görüldüğü gibi aşağıdaki öğelerden oluştuğu varsayılır.



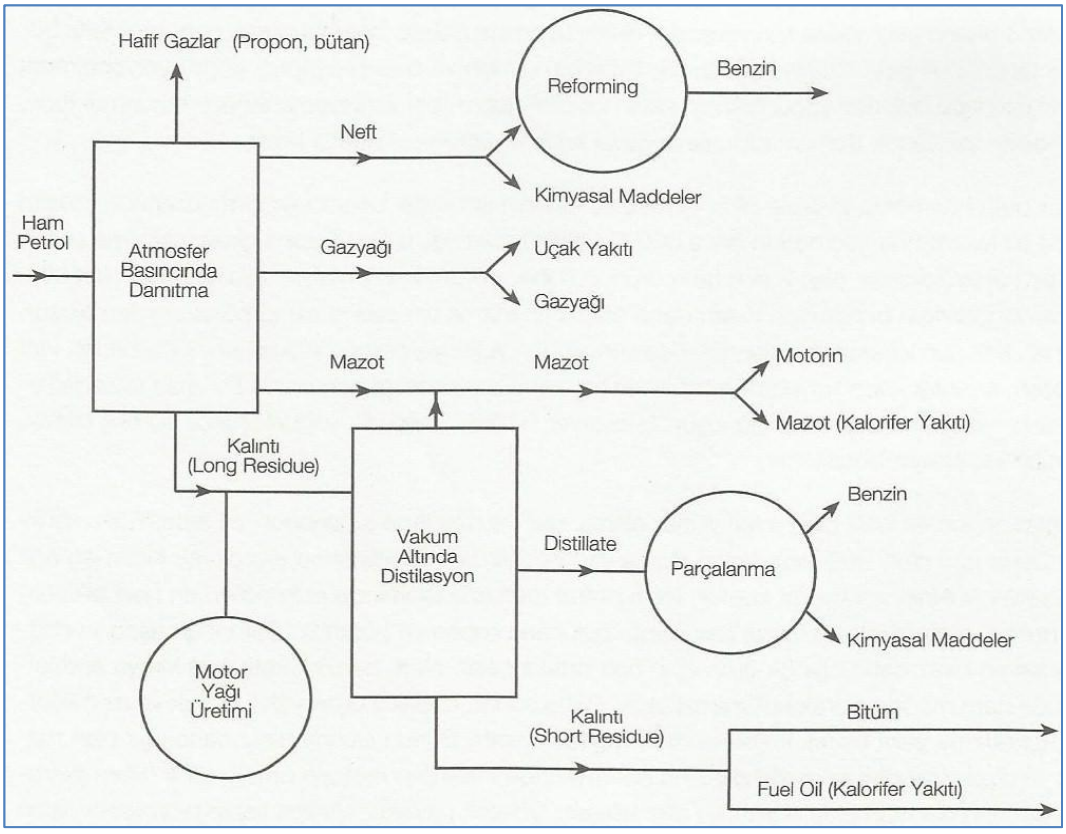
Şekil 1.1. Asfaltın içeriğindeki maddeler.

Asfaltlı yol inşaatının geçmişi yaklaşık 100 yıl öncesine dayanmaktadır, o zamanlarda asfalt, bağlayıcı kullanılmadan yapılan yüzey tabakası üzerinde seyreden araçların kaldırdığı tozu önlemek amacıyla kullanılmıştır. İlk asfalt karışım tesisi 1920 ve 1930 yılları arasında işletmeye alınmıştır (Irving, 1998).

Asfalt çimentoları ise penetrasyon değerlerine göre sınıflandırılmakta ve kullanılmaktadır. TS-1081 EN 12591 standardında belirtilen asfalt çimentoları içerisinde en çok tercih edilen sınıflar; B 50/70, B 70/100, B 100/150 ve B 160/120 bitümlerdir

Türkiye'de yol esnek üstyapılarında genellikle bitümlü bağlayıcı olarak; asfalt çimentoları, katbek asfaltlar, asfalt emülsiyonları ve katranlar kullanılmaktadır. Katbek asfaltlar; asfalt çimentosuna benzin gazyağı ve madeni yağlar ilave edilmesi ile elde edilen bitümlü bağlayıcılardır. Asfalt emülsiyonları; asfalt çimentosunun tanecik boyutuna (0,1-0,5 nm) getirilerek su içerisinde koloidal şekilde dağılması sonucunda akıcı hale getirilerek elde edilir. Asfalt emülsiyonları, su ile asfalt çimentosu küreciklerinden oluştuğu için heterojen fazda bulunan bir malzemedir. Bitüm üretimine ait şema Şekil 1.2.'de sunulmaktadır.

Katran; kömür ve odunun kapalı bir ortamda kuru olarak damıtılması ile elde edilir ve bu şekilde elde edilen katrana ham katran denir. Yol kaplamalarında bağlayıcı olarak katranın kömür kökenli olmasına özen gösterilir (Yiğiter, 2011).



Şekil 1.2. Bitüm üretimi şematik diyagramı.

Asfaltlar; Türkiye'de ilk asfalt uygulamaları Osmanlı döneminde başlamış ve makadam kaplamaların yapımında Fransızlardan destek alınmıştır. Cumhuriyet döneminde, 1929'da başlayan asfalt kaplama yapımı, 1948'de ABD'den sağlanan Marshall Teknik yardımı ile yaygınlaştırılmış ve 1950'de Karayolları Genel Müdürlüğü'nün kurulması ile sürekli gelişim dönemi başlamıştır (URL-1, 2018).
Asfaltlar, doğal ve yapay asfaltlar olmak üzere iki gruba ayrılır. Doğal asfaltlar, mineral maddelerle karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltlarıdır. Doğal kaynaklar içerisinde genellikle ince mineral maddeyle karışmış olarak bulunan, oda sıcaklığında katı halde fakat 175 °C'de yüksek viskoziteli bir akışkan olan, nispeten sert bitüm diye tanımlanır. Yapay asfaltlar ise ham petrolün damıtılmasından elde edilir ve bitüm olarak adlandırılır (Ilıcalı vd., 2001).

Asfalt karışımları çoğunlukla iki ayrı hammaddeden oluşur. Bunlardan biri agrega, diğeri ise bitümdür. Bitüm, rafinerilerde petrolün damıtılması ile elde edilirken agrega ise taş ocaklarında kırım sonucu elde edilmektedir. Asfalt üretimi öncesinde bu iki hammaddenin çok iyi kontrol edilmesi ve teknik şartname limitleri çerçevesinde temin edilmesi gerekmektedir. Şartname limitleri çerçevesinde üretilmeyen asfalt kısa zaman içerisinde uygun malzeme seçiminden kaynaklanmayan nedenlerden dolayı bozulacaktır (Irving, 1998).

Esnek üstyapının en üst tabaka olan aşınma tabakası, genellikle 4-5 cm kalınlığında asfalt betonu ya da taş mastik asfalt karışımı ile yapılır. Aşınma tabakasında yüksek mukavemetli, kaymaya karşı dirençli, yüzey drenajı iyi gürültü seviyesi düşük asfalt tabakası tercih edilir. Bitümlü temel üzerine uygulanan binder tabakası, trafiğe bağlı olarak genellikle 6-10 cm kalınlıklarda asfalt betonu şeklindedir. Trafiğe bağlı olarak 8-18 cm kalınlıklarında uygulanan bitümlü temel tabakası, genellikle bağlayıcısız granüler temel üzerine yoğun gradasyonlu bitümlü sıcak karışımın tabakasıdır (Güngör vd., 2013).

1.2.2 Bitüme uygulanan deneyler

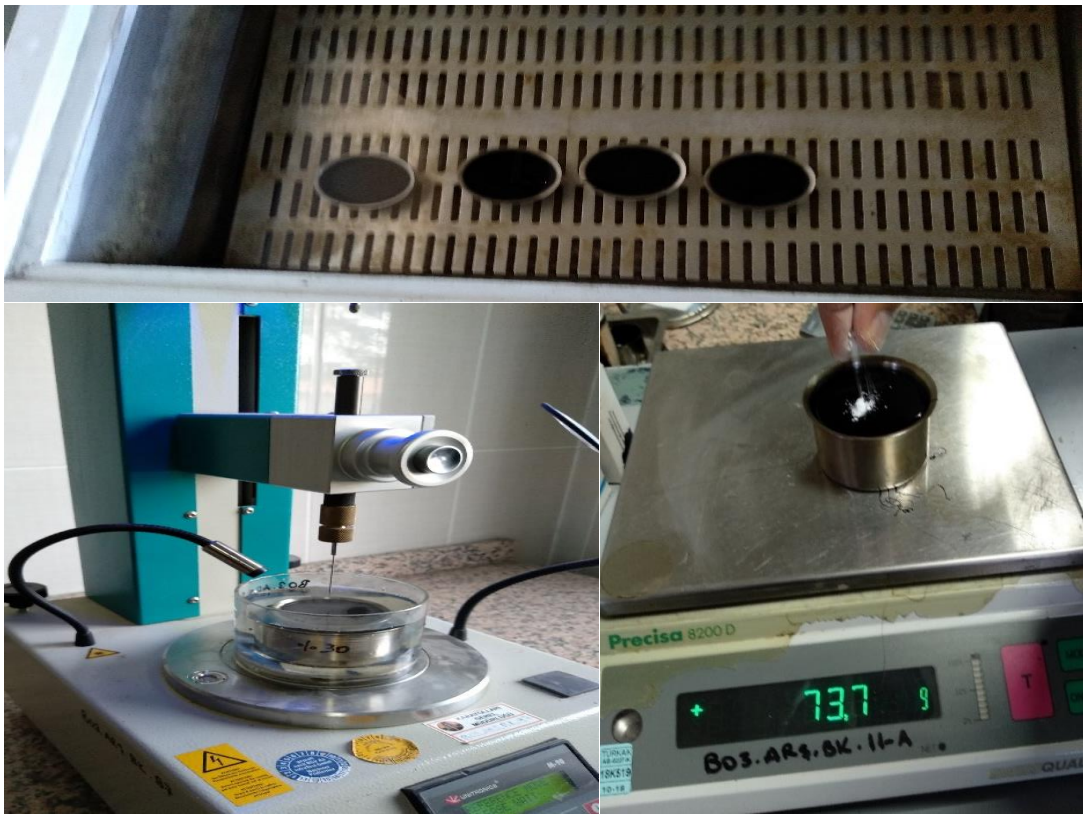
Esnek üstyapı karışımının yapılacağı bölgenin iklim koşulları ve yolun trafiği dikkate alınarak, kaplamanın iyileştirilmek istenilen özelliklerine uygun normal bitüm veya modifiye bitüm tipi seçilir. Modifiye bitümler, normal bitüme (asfalt çimentosuna)

kimyasal katkılar eklenerek, bitümün kimyasal yapısının ve/veya fiziksel ve mekanik özelliklerinin değiştirilmesi ile hazırlanırlar.

Bitümün kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla normal bitüm ve modifiye bitüme birtakım deneyler uygulanır. Bu bağlamda yapılan deneyler sonucunda, yapılacak yolun iklim özelliğine göre bitüm, normal veya modifiye bitüm olarak tercih edilir (Orhan, 2012b).

1.2.2.1 Penetrasyon deneyi

Penetrasyon; bitümün sertlik veya kıvamlılığını belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. Bitümün kıvamlılığı arttıkça bağlayıcılığı da artar.
Deney, standart bir iğnenin belirli bir yük (100g) altında belirli bir süre (5s) asfalt çimentosu içine dikey olarak battığı mesafenin 0,1 mm cinsinden bulunur. Penetrasyon değeri kıvamlılıkla ters orantılıdır. Penetrasyon yükseldikçe bitüm yumuşar. Kıvamlılık artıkça bitüm sertleşir. Penetrasyon birimi santimetrenin yüzde biridir. C göstergesindeki her bir bölüm 0.1 mm'yi gösterir (Şekil 1.3.) (TS EN 1426, 2015).

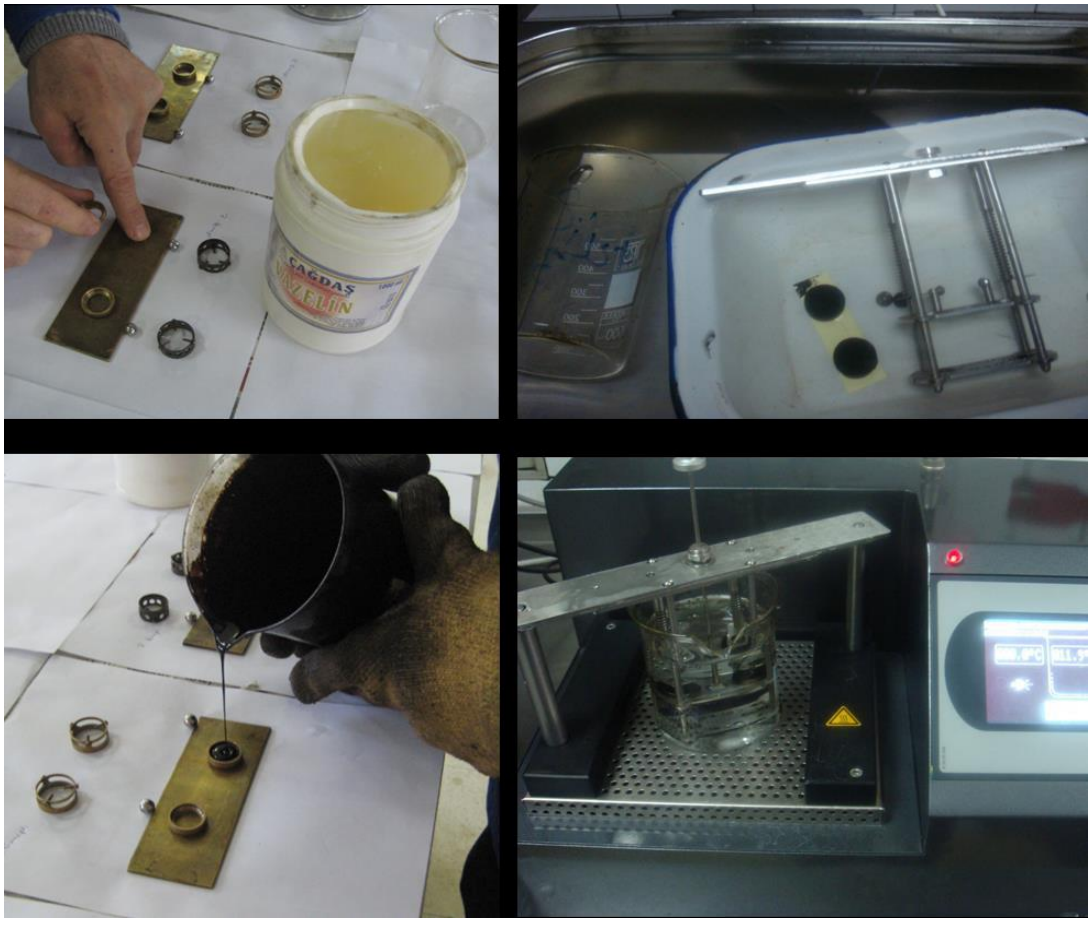


Şekil 1.3. Penetrasyon deneyi yapım aşamaları.

1.2.2.2 Yumuşama noktası deneyi

Yumuşama noktası bitüm numunesinin tespit edilmiş deney şartları altında özel bir yumuşaklık değerine eriştiği andaki sıcaklıktır.

Deney, bir su banyosu içine yerleştirilmiş, üzerinde standart bir bilye bulunan, standart bir halka içerisindeki bitüm numunesinin sabit bir hızla ısıtılarak (1 dakikada 5°C artacak şekilde) yapılır. Isı transferi sonucunda yumuşayan bitüm numunesinin tabana değdiği andaki sıcaklık yumuşama noktası olarak kaydedilir. Birimi santigrat "°C" dır (Şekil 1.4.). Bu deney yöntemi, bitümün sıcaklık değişimlerine karşı olan hassasiyetini ölçmek için, genellikle Avrupa kıtasında kullanılır. Amerika'da ise sadece çatı kaplamalarında kullanılan bitüm için uygulanır (TS EN 1427, 2015).

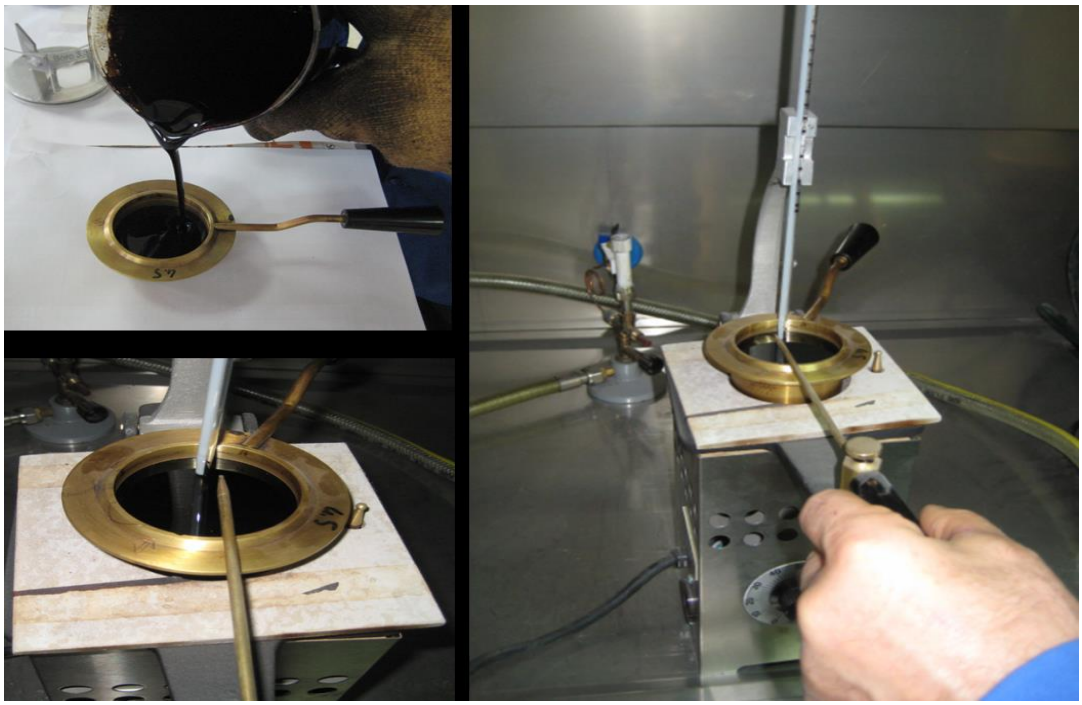


Şekil 1.4. Yumuşama deneyi yapım aşamaları.

1.2.2.3 Parlama noktası deneyi

Bir malzemenin parlama noktasının bilinmesi, o malzemenin uygulanması sırasında ısıtılırken meydana gelebilecek herhangi bir tutuşma ve yangın tehlikesinin önlenmesi bakımından önemlidir.

Parlama noktası, bir maddenin buharının alev temasında geçici olarak parladığı, fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklıktır. Cihaz, hava akımı olmayan ve kuvvetli ışık gelmeyen bir yere kurulur. Parlama noktasına yaklaşık 170 °C yaklaşıldığı anda, cihazı sarsmamaya ve solunumla yanıcı buharların yok edilmemesine dikkat edilmelidir. Termometre ucu kabın dibinden 6,5 mm yukarıda ve kabın yarıçapının ortasına gelecek şekilde dik olarak asılmalıdır (Şekil 1.5.) (TS EN ISO 2592, 2017).



Şekil 1.5. Parlama noktası deneyi yapım aşamaları.

1.2.2.4 Çözünürlük deneyi

Deney, içerisinde mineral madde bulunmayan ya da çok az bulunan bitümlü bağlayıcının organik çözücüler (trikloretilen, karbon sülfür, benzen gibi) yardımıyla çözünürlüğünü belirlemek için yapılır. Bu amaçla 2 g bitüm tartılır üzerine 70 ml trikloretilen dökülür, bir süre karıştırdıktan sonra 30 ml daha trikloretilen eklenir ve bitüm tamamen çözünene kadar karıştırılır. Daha önceden kurutulmuş ve tartılmış

(m_1) filtreli cam krozeden geçirilir. Trikloretilende çözülmüş bitümün tamamı cam krozeden geçtikten sonra kroze, çözücünün kaynama noktası sıcaklığına ayarlanmış etüvde kurutulur ve laboratuvar sıcaklığına inince cam kroze tartılır (m_2) (Şekil 1.6.). Bitüm içerisinde çözünmeyen madde oranı (S) aşağıdaki bağlantıya göre hesaplanır. Kroze üzerinde kalan madde bitümün safsızlığını belirtir. Çözünürlük deneyinde bitümün saflığına bakılır (TS EN 12592, 2015).

$$S=(1-\frac{m_2-m_1}{2})x100 \quad (1.1)$$



Şekil 1.6. Çözünürlük deneyi.

1.2.2.5 Düktilite ve elastik geri dönme deneyi

Düktilitenin kelime anlamı uzama veya çekebilme demektir. Bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklıkta (25ºC, 13ºC, 7ºC gibi) kohezyondan oluşan (Cohesive) dayanımı düktilite ile belirlenir. Belirlenen sıcaklıktaki su banyosu içerisinde 50 mm/dk hız ile bitüm numunesi çekilerek bitümün kopma anındaki uzama miktarı bulunur.

Elastik geri dönme deneyinde ise bitüm numunesi, 25 ºC'de 50 mm/dk hızla 200 mm olana kadar çekilir daha sonra ortasında kesilerek 30 dakika laboratuvar ortamında bekletilir (Şekil 1.7.). Bu süre sonunda liflerin arasındaki fark ölçülerek aşağıdaki bağlantıya göre geri dönmesi hesaplanır. RE; yüzde olarak elastik geri dönme, d; mm olarak lifler arası mesafe ve L; ilk boy (200 mm) olmak üzere.

$$RE=\frac{d}{L}x100 \quad (1.2)$$

Deney, genellikle elastomerik modifiye bitümlere uygulanır, ancak diğer bitümlere de uygulandığından az miktarda geri dönme bulunur (TS EN 13587, 2017).

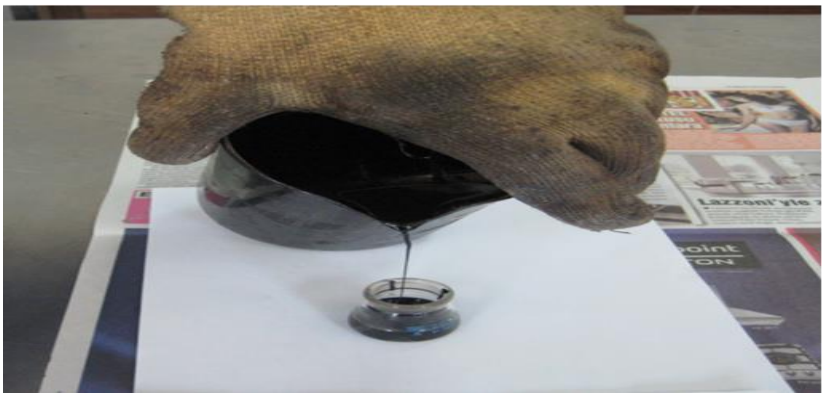


Şekil 1.7. Düktilite ve elastik geri dönme deneyi.

1.2.2.6 Özgül ağırlık deneyi

Yüksek viskoziteli sıvı ve yarı katı bitümlü maddeler ile bitümlü emülsiyonların özgül ağırlığı tespit edilir. Bitümlü malzemenin özgül ağırlığı 25ºC sıcaklıktaki, hacminin havadaki ağırlığının aynı sıcaklık ve aynı hacimdeki havası alınmış saf

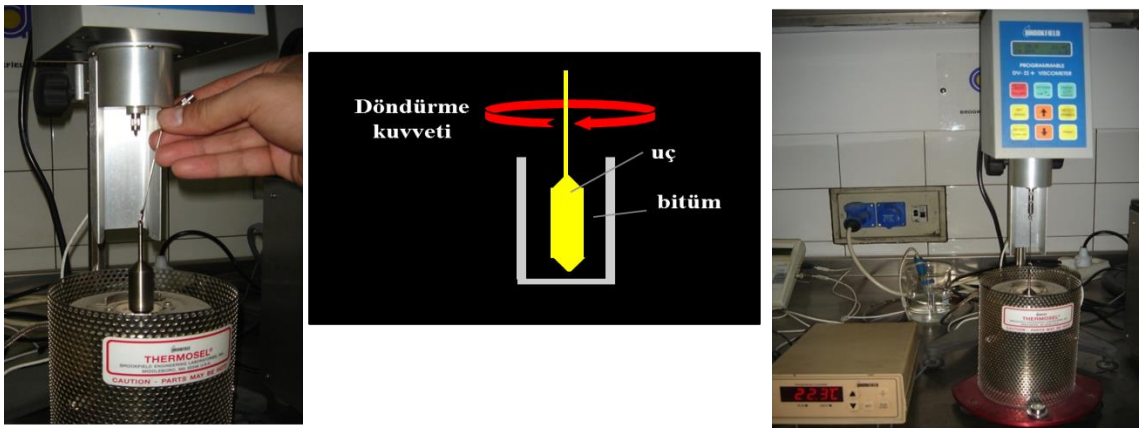
suyun ağırlığına oranıdır (Şekil 1.8.). Genellikle piknometre yöntemi ile özgül ağırlık belirlenir (TS EN 15326, 2010).



Şekil 1.8. Özgül ağırlık deneyi.

1.2.2.7 Döner viskozimetre

Deneyde bitümlü bağlayıcılar pompalama, taşıma ve bitümlü sıcak karışımı (BSK) imalatlarında işlenebilir olmaları için ısıtılırlar. Bu performans özelliğinin temsili için Dönel Viskozimetre deneyi yapılır. Bu deney sonucunda modifiye bitümün 135 °C deki viskozite değeri bulunur (Şekil 1.9.) (AASHTO TP 48, 1997).



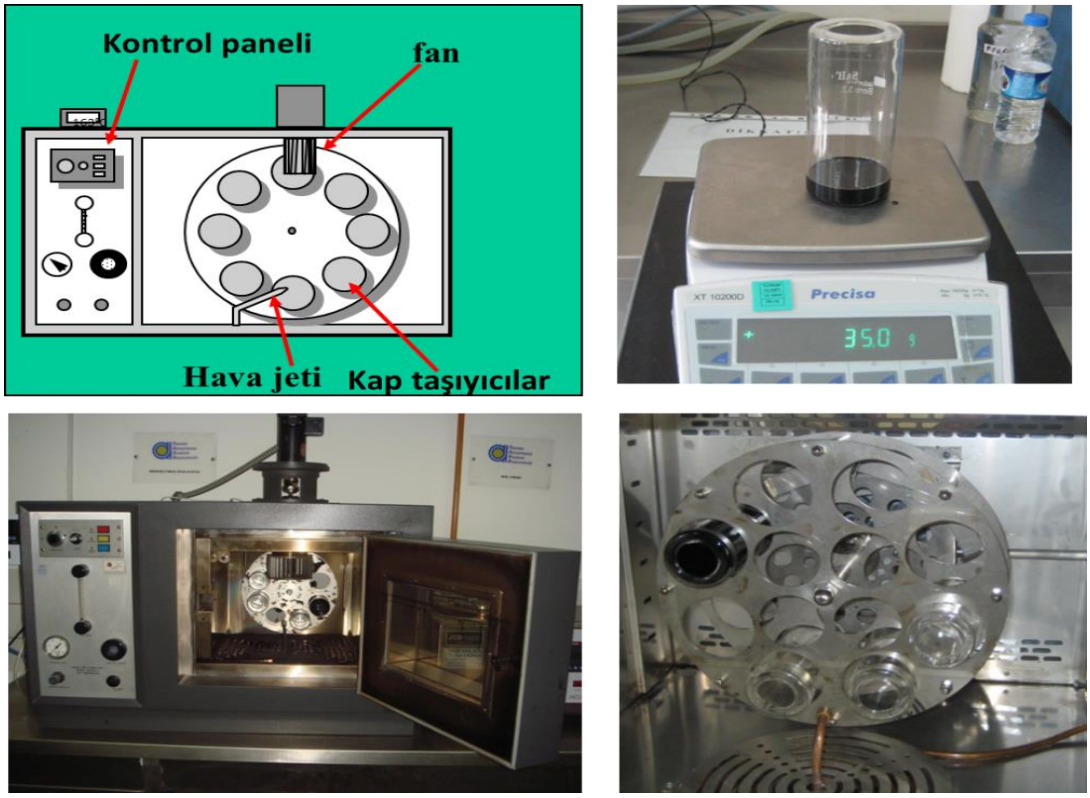
Şekil 1.9. Döner viskozimetre deneyi.

1.2.2.8 Dönmeli ince film etüvü (RTFOT)

Deneyde karışım hazırlama, serme-sıkıştırma sırasında bitümlü bağlayıcıda oluşan yaşlanma örneklenir. Deneyin iki amacı vardır;

- Yaşlanmış bitüm üzerinde fiziksel deneyler yapılır.
- İşlem sırasında asfalta oluşan kütle kaybı belirlenir.

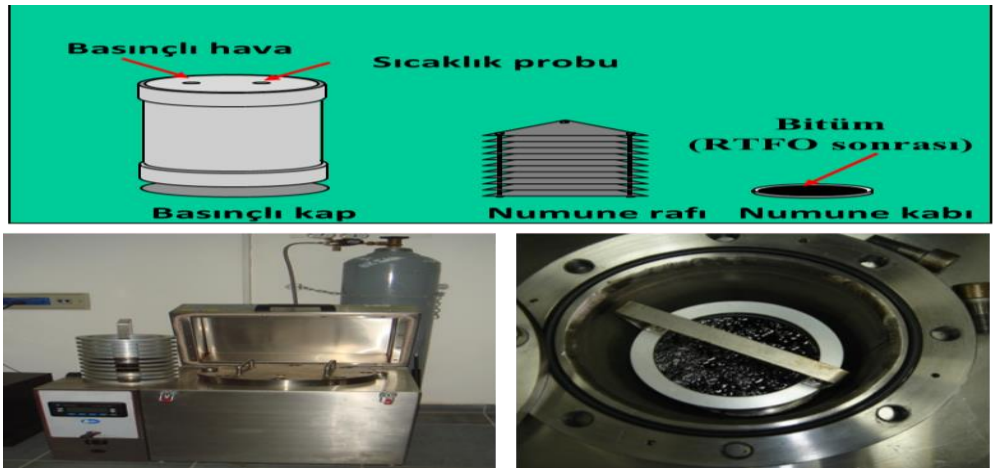
Bitümün yaşlanmasında dolayı bir kütle kaybı oluşur ancak bazı asfaltlarda okside ürünler oluşumundan dolayı bir ağırlık artışında söz konusudur. Dönmeli ince film halinde ısıtma deneyinde 35 g numuneler cam kaplara konularak etüve yerleştirilir. Numuneler 163 ^{o}C de hava ve sıcaklık etkisine maruz bırakılarak döndürülür. Deney sonucu elde edilen numuneler karışımın üretilmesi, serme ve sıkıştırma sırasında yaşlanan bitümü temsil eder. 35 g modifiye bitüm numunesi dakikada 15 tur olacak şekilde 163^{o}C sıcaklıkta 85 dakika döndürülerek yaşlandırılır (Şekil 1.10.) (TS EN 12607-1, 2015).



Şekil 1.10. Dönmeli ince film etüvü (RTFOT) deneyi yapım aşamaları.

1.2.2.9 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV)

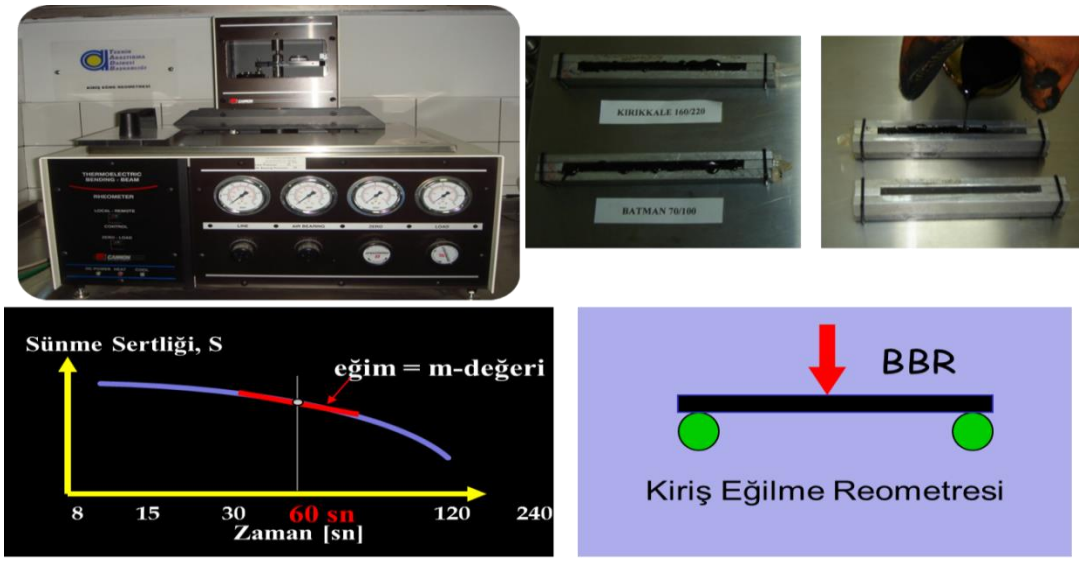
Deneyde RTFOT deneyinden çıkan numuneler her birine 50 gr olacak şekilde numune kaplarına konur. Numune kapları, raflı numune taşıyıcıya yerleştirilir. Sonra basınçlı yaşlandırma kabına alınarak 2,2 MPa basınç altında 100 °C de, 20 saat süre ile yaşlandırılır. Böylece kaplamanın hizmet sırasında karşılaşacağı yaşlanma etkileri yansıtılmış olur. Bu deneyde bitümlü bağlayıcı 20 saat boyunca sıcaklık ve basınca tabi tutulur (Şekil 1.11.). Bitüm cinsine bağlı olarak değişmekle beraber ortalama 7 ile 10 yıl arasında arazideki yaşlanmaya karşılık gelir (TS EN 14769, 2012).



Şekil 1.11. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi yapım aşamaları.

1.2.2.10 Kiriş eğilme reometresi (BBR)

Deney, bitümün düşük sıcaklıklardaki davranışını belirlemek üzere ise kiriş eğilme reometresi geliştirilmiştir. BBR basit olarak bağlayıcının belirli bir sıcaklıkta ve sabit bir yük altında ne miktarda sünme veya defleksiyona maruz kaldığını gösterir. Bu deneyde numunenin yük altındaki sertliğinin tespit edilmesinde kiriş teorisi kullanılır. Kiriş şeklindeki bitüm çubuğuna sabit bir tekil kuvvet uygulanır ve 4 dakikalık deney süresi boyunca çubuğun ortasında oluşan yer değiştirme ölçülür. Böylece bitümlü bağlayıcının sünme sertliği ve sünme oranı hesaplanır (Şekil 1.12.) (TS EN 14771, 2012).

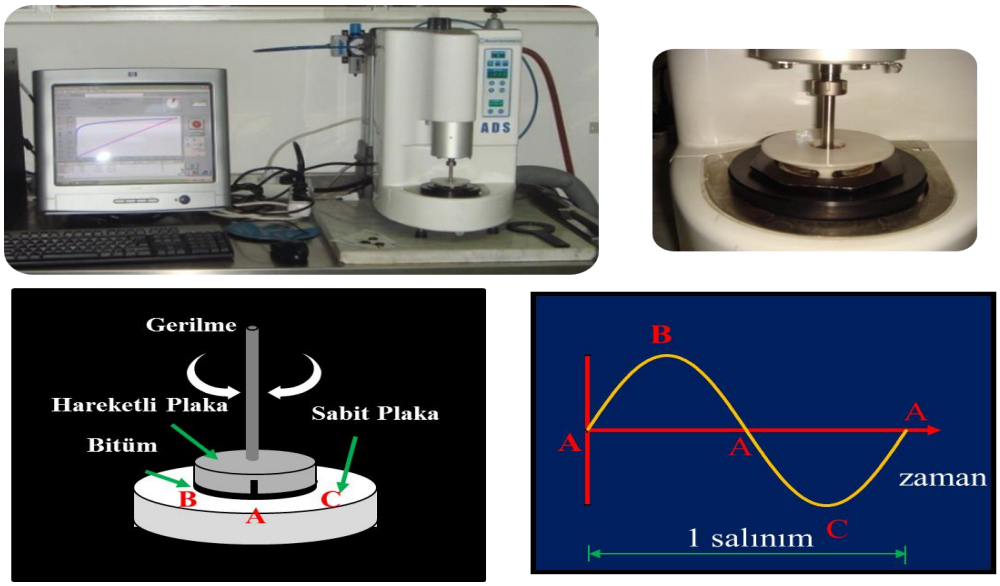


Şekil 1.12. Kiriş eğilme reometresi (BBR) deneyi yapım aşamaları.

1.2.2.11 Dinamik kesme reometresi (DSR)

Deney, bitüm davranışının hem yükleme zamanına hem de sıcaklığa bağlı olduğu için her iki faktörü de içermelidir. Dinamik Kesme Reometresi bitümlü bağlayıcıların zamana bağlı orta ve yüksek sıcaklıklarda reolojik özelliklerini (kompleks kesme modülü ve faz açısı) belirlemektedir.

DSR, bitümün viskoz ve elastik davranışını belirlemek amacıyla kompleks kesme modülü (G*) ve faz açısını (δ) ölçer. G*; malzeme kesme gerilmesine maruz bırakıldığında deformasyona karşı gösterdiği dirençtir (Şekil 1.13.). İki bileşenden oluşur: elastik (geri dönüşümlü) ve viskoz (geri dönüşümsüz). δ ise geri dönüşümlü ve geri dönüşümsüz deformasyonların göreli miktarıdır. G* ve δ değerleri deney sıcaklığına ve yüklemenin frekansına bağlıdır (TS EN 14770, 2012).



Şekil 1.13. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi yapım aşamaları.

1.2.3 Bitümlü karışım agregaları

1.2.3.1 Agregalara yapılan deneyler

Elek analizi deneyi

Bitümlü karışımlarda kullanılacak agreganın dane boyu dağılımının tespiti için elek analizi deneyi yapılır. Bu deney için kullanılan kare açıklıklı elekler Çizelge 1.1.'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Elek analizinde kullanılacak elek açıklıkları.

Elek Açıklığı	
mm	İnch
37,5	11/2
25,0	1
19,1	¾
12,7	½
9,52	3/8
4,75	No.4
2,00	No.10
0,42	No.40
0,177	No.80
0,075	No.200

Agregalara Çizelge 1.1.'de verilen kare açıklıklı eleklerle yapılan elek analizi sonucu tespit edilen gradasyon; sınıflandırmada, gradasyonun şartnameye uygunluğunun kontrolünde ve agrega karışım oranlarının hesabında kullanılır.

Yığını temsilen alınacak agrega numunesi, yığını temsil bakımından bölgeç veya dörtleme yöntemiyle alınır. Alınan bu numune 110±5 ^{0}C kararlılıktaki etüvde sabit ağırlığa ulaşıncaya dek kurutulur. Kurutulan numune No.200 elekten, elek altında berrak su akıncaya kadar yıkanır. Elek üstünde kalan yıkanmış numune 110±5 ^{0}C kararlılıktaki etüvde tekrar sabit ağırlığa gelinceye kadar kurumaya bırakılır. Laboratuvar sıcaklığına soğuyan numune, numunenin %100 geçtiği son elekten itibaren Çizelge 1.1.'de açıklıkları verilen her bir elek takımından elenir. Her bir elek üzerinde kalanlar kümülatif olarak toplanır ve yüzdeler hesap edilir. Daha sonrasında eleklerden yüzde geçenler hesap edilerek elek analizi tamamlanır (Önal ve Kahramangil, 2012). Elek analizinde kullanılan bazı elekler Şekil 1.14.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.14. Elek analizi.

Parçalanma direncinin tayini deneyi: Los Angeles yöntemi

Deney mühendislik yapılarında kaba agregaların darbelere karşı parçalanma mukavemetinin tespiti için yapılır.

Deney; 14 mm elekten geçen ve 10 mm elekten kalan agrega kısmına yapılır. Ancak bu fraksiyon arasına bir de ara elek alınır. 12,5 mm kare açıklıklı elek kullanılması halinde bu elekten geçen ağırlıkça agrega miktarı %60 ile %70 arasında, 11,2 mm'lik elek kullanılması halinde bu elekten geçen ağırlıkça agrega miktarı %30 ile %40 arasında olmalıdır. Bu şekilde hazırlanan 5000 g malzeme tambur içerisine toplam kütleleri 4860 olan 11 adet bilyeyle birlikte atılır. Şekil 1.15.'deki gibi bir tambur dakikada 31-33 devir hız yapacak şekilde toplam 500 devir döndürülür. Deney sonucunda tamburdan çıkarılan agrega numunesi 1,6 elekten yıkanır ve kurutulur. Elek üzerinde kalan malzeme tartılır (m). Kayıp (LA) aşağıdaki bağlantıya göre hesaplanır (Ünsal, 2008).

$$LA=\frac{5000\text{-}m}{5000}x100 \qquad (1.3)$$



Şekil 1.15. Los angeles cihazı.

Aşınma direnci (Micro Deval)

Deney, agregaların sulu ortamlarda yük altındaki aşınmaya karşı direncini ölçmek için yapılır.

Deney, agrega numunesinin 14 mm elekten geçip 10 mm elekte kalan kısmına yapılır. Bu fraksiyon arasına tercihen 12,5 mm veya 11,2 mm'lik eleklerden biri atılır. 12,5 mm'lik elek kullanıldığında bu elekten geçen kısım numunenin %60 ila %70'i arasında, 11,2'lik elek kullanıldığı takdirde yine bu elekten geçen kısım numunenin %30 ile %40 arasında olması gerekir. Bu yönteme göre elde edilen 500 gr agrega numunesi, 10 mm çapındaki çelik bilyelerden oluşan 5000 gr yük, 2,5 L su ile birlikte Şekil 1.16.'da sunulan bir mikro deval aşınma direnci tamburuna doldurulur. Anlamlı bir deney için eş çift tambur deneye alınmalıdır. Tamburlar 100 dv/dk hızla toplam 12000 devir yapacak şekilde deney son bulur. Deney sonucu tamburdan çıkarılan numune 1,6 mm kare açıklıklı elekten yıkanır ve elek üzerinde kalan kısım etüvde sabit kütleye gelene dek 110±5 ^{0}C kararlılıktaki etüvde kurutulur. Laboratuvar sıcaklığına soğuyan numune tartılır (m). Agregaların aşınma kaybı (M_{DE}) aşağıdaki verilen bağlantı ile hesaplanır (TS EN 1097-2, 2010).

$$M_{DE}=\frac{500\text{-}m}{500}x100 \qquad (1.4)$$



Şekil 1.16. Mikro deval cihazı.

Magnezyum sülfat deneyi

Deney, hava tesirleri altındaki agreganın donma-çözünme periyotlarında oluşan içsel çekme gerilmelerine karşı agreganın kütle kaybının yüzde hesabını içerir.

Deney, agrega numunesinin 14 mm elekten geçip 10 mm elekte kalan kısmına yapılır. Bu elekler arasından hazırlanan biri 420 g, diğeri 430 g agreganın (M_1); 1 l

suya 1500 g ağırlığındaki Mg_2SO_4 katılarak oluşturulan 1,292 g/mL yoğunluğunda ve 20 ^{0}C'deki çözeltiye 17 saat daldırılması sonra laboratuvarda 2 saat süzülmeye bırakılması, 110±5 ^{0}C kararlılıktaki etüvde 24 saat boyunca kurutulması ve 5 saat laboratuvarda bekletilmesi 1 döngü olacak şekilde toplamda 5 döngü yapılır. Deney bittikten sonra agrega numunesi 10 mm kare açıklıklı elekten yıkanıp kurutulur ve soğuduktan sonra tartılır (M_2). Agregadaki yüzde kayıp (M_s) aşağıda verilen bağlantı yardımıyla hesaplanır (TS EN 1367-2, 2010).

$$M_S = \frac{M_1 - M_2}{M_1} x100 \quad (1.5)$$

Yassılık indeksi deneyi

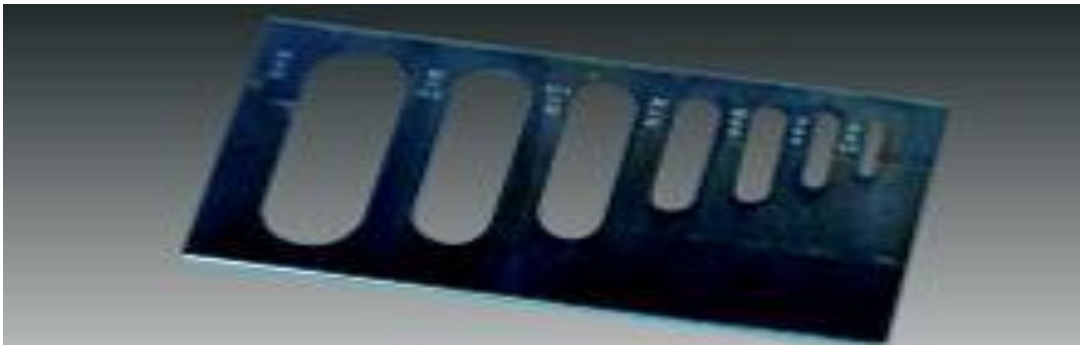
Deney, agregaların yassı olarak sınıflandırıldığı en küçük boyutunun nominal boyutuna oranının %60'dan daha küçük olma durumunun tespiti için yapılır. Fraksiyon diye tabir edilen iki elek arasında tutulan bir agreganın nominal boyutu, geçtiği elek ile kaldığı eleğin, elek açıklıklarının aritmetik ortalamasıdır.

Deney teknik olarak 63 mm elekle 6,3 mm elek arasında kalan agrega numunesine uygulanır. Elek analizi yapılan numune fraksiyonlarına ayrılır ve Çizelge 1.2.'e deneye alınacak malzeme miktarı tespit edilir. Her fraksiyon malzemesini oluşturan her agrega daneleri Şekil 1.17.'deki şablonun ilgili açıklığından geçip geçmediği elle denenir. Geçen agrega daneleri yassı (M_2), kalanlar (M_1) ise kübik geometrik şekillidir. Her franksiyonun yassılık yüzdesi (Yi) aşağıda verilen bağlantıya göre ayrı ayrı hesaplanır. Hesaplanan bu yüzdelik değer her fraksiyonun kendi içerisindeki yassılık değeridir. Agreganın 6,3 mm elekten geçen kısmı deneye alınmadığı için gradasyonun düzeltilmesi gerekir. İlgili fraksiyonun yassılık yüzdesi ile o fraksiyonun düzeltilmiş gradasyon yüzdesi çarpılarak fraksiyonun düzeltilmiş yassılık yüzdesi bulunur. Her fraksiyon için aynı işlem yapılır. Sonunda her fraksiyonun düzeltilmiş yassılık yüzdeleri toplanarak agrega karışımının yassılık indeksi bulunmuş olur (Demirel vd, 1991).

Çizelge 1.2. Fraksiyonlara göre alınacak minimum malzeme miktarı.

Elek Açıklıkları, mm	Her Fraksiyon İçin Deneye Alınması Gereken Minimum Malzeme Miktarı, kg
63,0 - 50,0	25
50,0 - 37,5	18
37,5 - 25,2	8
25,2 – 19,1	2,5
19,1 – 12,7	1
12,7 - 9,5	0,5
9,5 - 6,3	0,250

$$Y_i = \frac{M_2}{M_1} x100 \qquad (1.6)$$



Şekil 1.17. Yassılık indeksi şablon çeşitleri.

Soyulma mukavemeti

Deney, agrega ile bitümlü bağlayıcı arasındaki aderansına suyun etkisinin gözlem yoluyla belirlenmesini içerir.

Deney, agrega numunesinin 10 mm elekten geçip 6,3 mm elekte tutulan kısmına yapılır. Bu fraksiyondan alınan yıkanmış ve kurutulmuş agregadan 150 adeti bir kaba alınır. 150 adet agreganın kütlece %5'i kadar bitüm belirtilen sıcaklıkta ısıtılır ve agrega ile birlikte iyice karıştırılır. Karışım iki petri kabına olabildiğince eşit miktarda bölünür. Daha sonra petri kapları laboratuvar ortamında 1 saat boyunca soğumaya bırakılır. Soğuma işlemi tamamlandıktan sonra petri kapları, su altında kalacak şekilde içi saf suyla dolu bir tepsi içine alınarak 60 ^{0}C'deki etüvde 24 saat bekletilir. 24 saat süresinin sonunda etüvden çıkarılan tepsinin suyu temiz saf suyla

değiştirilir. Cepheden gelen ışık altında gözle irdelen numuneler, kahverengimsi ve saydam kısımlar soyulmamış kabul edilecek şekilde, soyulmamış yüzeylerin tüm yüzeye oranı belirlenir (Şekil 1.18.). Bu oran, küsuratlı ise bir üst %5'e yuvarlanır. Belirlenen agrega-bitüm karışımının soyulmaya karşı direnci olarak kabul edilir (KGM, 2013).



Şekil 1.18. Soyulma mukavemeti deneyi.

Kil topağı ve dağılabilen dane oranı tayini deneyi

Deney, agrega içerisinde bulunan kil ve dağılabilen danelerin tespiti için yapılır. Deney, 4,75 mm elekte kalan malzeme üzerine yapılır.

Agreganın maksimum dane çapına göre 4,75 mm elek üzerinde kalan kısmından alınacak miktar numune, 110±5 ^{0}C kararlılıktaki etüvde 24 saat boyunca kurutulur. Numune sıcaklığı, laboratuvar sıcaklığına inince tartılır (M_1). Daha sonra numune, üzeri tamamen saf su olacak şekilde su dolu tepsiye alınır ve tepsi içerisinde 24 saat bekletilir. Sonrasında tepsi içerisindeki numune agrega karışımının maksimum dane çapı 9,5 mm veya daha küçükse 2,36 mm elekten, 9,5 mm veya daha büyükse 4,75 mm elekten yıkanır. Yıkanan agrega numunesi 110±5 ^{0}C kararlılıktaki etüvde 24 saat boyunca kurutulur, laboratuvar sıcaklığına gelince tartılır (M_2). Kil topağı ve dağılabilen dane oranı (K) aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır (ASTM C-142, 2017).

$$K=\frac{M_1-M_2}{M_1}x100 \qquad (1.7)$$

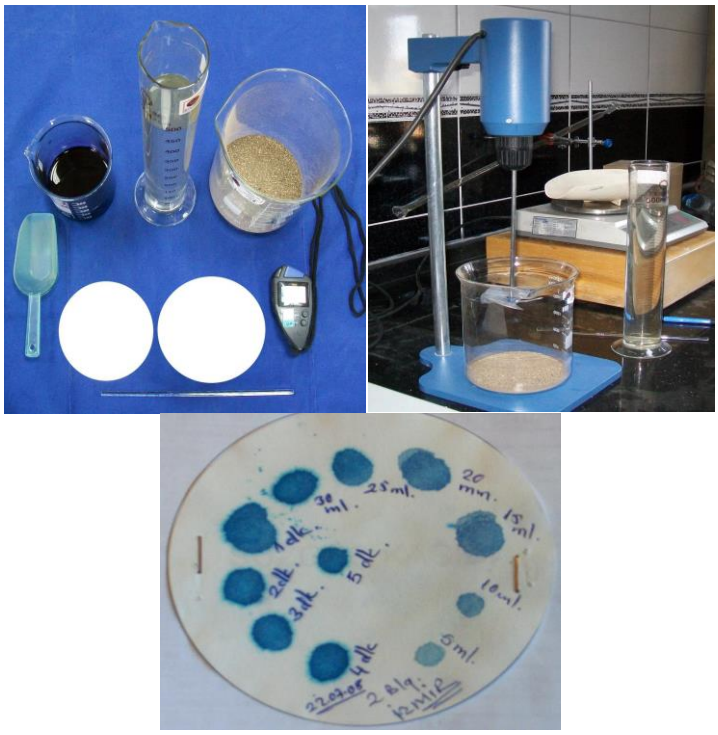
İnce malzeme tayini-metilen mavisi deneyi

Deney, ince agreganın metilen mavisi değerinin tespiti için yapılır. Deney ince agreganın 2,0 mm elekten geçen kısmına yapılır.

500 mL saf su, 60 ^{0}C'de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş, laboratuvar sıcaklığına kadar soğutulmuş 2,0 mm elek altı malzemeden 200 g (M_1) ile birlikte behere alınır. Metilen mavisi mikserinin pervane kısmı, beher tabanından takriben 10 mm yükseklikte olacak şekilde ayarlanır. Daha sonra karıştırıcı dakikada 600 devir yapacak şekilde 5 dakika boyunca çalıştırılır ve ardından ucu beher içine bakan büretten 5 mL metilen mavisi çözeltisi ilave edilir. Bu kez karıştırıcı dakikada 400 devir yapacak şekilde 1 dakika boyunca çalıştırılır ve süzgeç kâğıdı üzerine leke deneyi yapılır. Süzgeç kâğıdı üzerindeki lekede hale belirmezse 5 mL boya çözeltisi daha ilave edilir ve aynı şekilde karıştırıcı dakikada 400 devir yapacak çalıştırılmaya devam edilir. Tekrar leke deneyi yapılır. Hale görülünceye kadar aynı işleme devam edilir. Hale oluşunca, bu kez ilave boya çözeltisi verilmeden 1 dakika arayla leke deneyleri yapılır. Oluşan hale İlk 4 dakika boyunca yapılan leke deneylerin birinde kaybolmuşsa deneye 5 mL boya çözeltisi, 5. dakikadaki leke deneyinde kaybolmuşsa 2 mL boya çözeltisi ilavesi yapılarak deneye aynı şekilde devam edilir. 5 dakika sonunda yapılan tüm leke deneylerinde halenin varlığını sürdürmesi ile deney sonlandırılır. Deney sonunda kullanılan toplam boya çözeltisi (V_1) kaydedilir. Numunenin metilen mavisi (MB) değeri aşağıda verilen bağlantıya göre hesaplanır (TS EN 933-9, 2010).

Metilen mavisi deneyine ait görüntüler Şekil 1.19.'da sunulmuştur.

$$MB=\frac{V_1}{M_1}x10 \qquad (1.8)$$



Şekil 1.19. Metilen mavisi deneyi.

Agregaların tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini-piknometre yöntemi

Deney, agregaların tane yoğunlukları ile absorpsiyon oranının tespiti için yapılır. Deney, piknometre yöntemi ile agregaların 31,5 mm elekten geçip 0,063 mm elekte tutulan kısmına yapılır.

Maksimum dane boyutuna göre Çizelge 1.3.' te uygun miktarda alınan yıkanmış ve kurutulmuş numune kısmı uygun hacimli piknometrede bulunan 22 ^{0}C sıcaklıktaki suya daldırılır ve hapsolan hava eğik konuma getirilen piknometre yuvarlanarak ve/veya hafifçe sallanması suretiyle uzaklaştırılır. Piknometre 22 ^{0}C sıcaklıktaki su havuzunda 24 saat boyunca dik konumda tutulur. Bu sürenin sonunda piknometre havuzdan çıkarılır ve varsa hapsolmuş hava tekrar uzaklaştırılır. Hapsolan hava vakum yapılarak da uzaklaştırılabilir. Piknometreye cam huni takıldıktan sonra cam huninin ortasındaki işarete kadar su ilave edilir ve piknometrenin dış kısmı kurulanarak tartılır (M_2). Piknometrenin içerisindeki su sıcaklığı da kaydedilir. Bu işlem sonunda agrega numuneleri piknometrenin içinden çıkarıldıktan sonra piknometrenin içerisi cam huninin ortasındaki çizgiye kadar tekrar doldurulur ve piknometrenin dış kısmı kurulanarak tartılır (M_3). M_2 ve M_3 tartımları esnasındaki sıcaklık farkı maksimum 2 ^{0}C olabilir. Piknometreden çıkarılan agrega numunesi

temiz, kuru bir beze alınarak agrega yüzeyindeki su filmleri uzaklaştırılır. Yüzey kuru suya doygun bu kısım bir tepsiye alınarak tartılır (M_1). Daha sonra bu agregalar, sabit kütleye gelene dek 110±5 ^{0}C kararlılıktaki etüvde kurutulur ve laboratuvar sıcaklığına gelince tartılır (M_4). Tane yoğunlukları ve su emme oranı aşağıdaki bağlantılardan hesaplanır (TS EN 1097-6, 2013).

Çizelge 1.3. Piknometre deneyi için numune miktarları.

En Büyük Agrega Boyutu, mm	Deney numunesi kısmının kütlesi, en az, kg
31,5	5
16	2
8	1

$$Pa=\frac{M_4}{M_4-(M_2-M_3)} \quad (1.9)$$

$$Prd=\frac{M_4}{M_1-(M_2-M_3)} \quad (1.10)$$

$$Pssd=\frac{M_4}{M_1-(M_2-M_3)} \quad (1.11)$$

$$WA_{24}=\frac{(M_1-M_4)}{M_4} \quad (1.12)$$

Burada;

Pa; Görünür tane yoğunluğu,

Prd; Etüvde kurutulmuş esasta tane yoğunluğu,

Pssd: Doygun ve yüzeyi kurutulmuş esasta tane yoğunluğu,

WA_{24}; Su emme oranı.

1.3 Yol Üst Yapısı

Şüphesiz gelişmiş bir ülkenin yol ağları, ulaşıma katılan tüm trafiği güvenle taşıyacak kadar yaygın ve yeterli kapasitede aynı zamanda sürüş rahatlığı, trafik güvenliği, yol konforu gibi standartları sağlamalıdır.

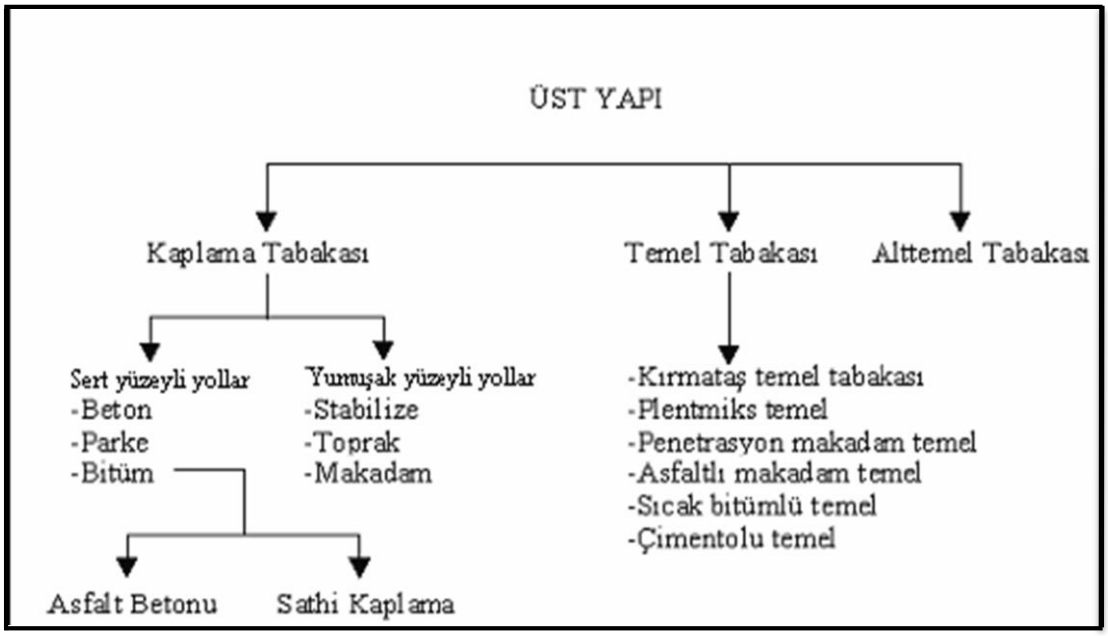
Yol üstyapısı; trafik içi düzgün bir satıh oluşturmak, üzerine gelen trafik yüklerini güvenli bir şekilde yol gövdesinin taşıyabileceği bir değere indirerek altyapıya

iletmek ve çevresel etkilere karşı altyapıyı korumak amacıyla yol gövdesi üzerine teşkil edilen, alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşun yol yapısıdır (Hanlı, 2009). Yol üstyapısına meydana getiren tabaka ve türleri Şekil 1.20.'de gösterilmiştir.

Karayolları üstyapıları, kullanılan malzeme tiplerine bağlı olarak;

- Rijit Üstyapılar
- Yarı Rijit Üstyapılar
- Esnek Üstyapılar

şeklinde sınıflandırılırlar.



Şekil 1.20. Üstyapıyı oluşturan tabakalar ve tabaka türleri.

1.3.1 Rijit üstyapılar

Yol altyapısı üzerine getirilen temel tabakası ve bunun üzerine de getirilen portlant çimentosu, su ve agregadan imal edilmiş beton tabakadan oluşan yol üst yapı çeşididir. Bu tip üstyapılarda yükün büyük bir kısmı beton plak tarafından taşınır ve geri kalan kısmı ise temel aracılığıyla zemine aktarılır (Önal ve Kahramangil, 2012). Beton plağın rijitliğinin çok yüksek olması sebebiyle beton plaktan zemine aktarılan gerilmeler esnek üstyapılara nazaran daha geniş bir alana yayılır (Yılmaz, 2010).

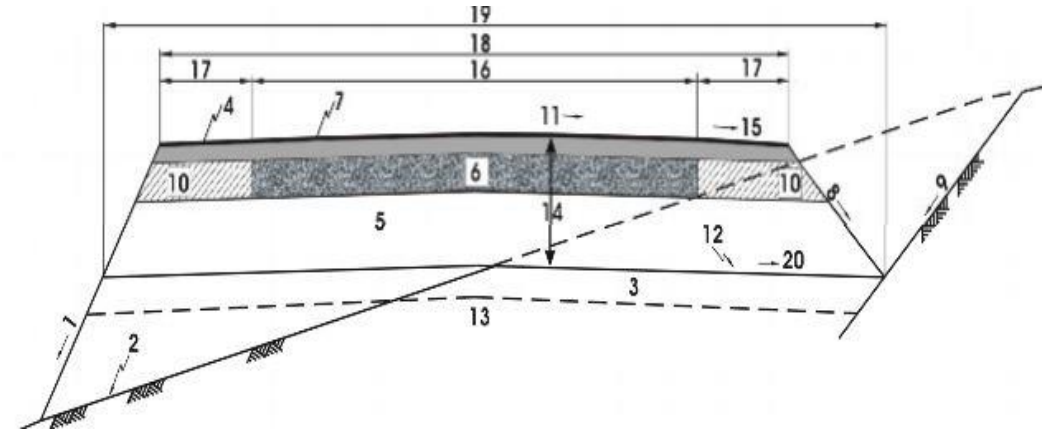
1.3.2 Yarı rijit üstyapılar

Taban zemini üzerine gelen alttemel ve temel yerine çimento ile stabilize edilmiş altemel ve/ veya çimento bağlayıcılı temel ve bunların üzerine ise serilen bitümlü temel, binder ve aşınma tabakalarından oluşan yol üstyapı türüdür. Bunların mekanik kısmının rijit olmasından ötürü yükleri geniş bir tabana yayarak zemine aktarırlar (Önal ve Kahramangil, 2012).

1.3.3 Esnek üstyapılar

Üzerine gelen yüklerin büyük bir kısmını, bitümlü bağlayıcılı ve bağlayıcısız tabakaların taşıyıp geri kalanını taban zeminine aktaran üstyapı türüdür. Taşıyıcılığı veya stabilitesi tabakaları meydana getiren agregaların birbirlerine kenetlenmesine, sürtünmesine ve bitümlü bağlayıcıların sağladığı adezyona bağlıdır (Önal ve Kahramangil, 2012).

Şekil 1.21.'de tip enkesiti verilen, iyi projelendirilmiş esnek bir üstyapıda, üstyapı tabakaları tarafından büyük bir kısmının taşınıp geri kalanının tabana yayılarak aktarılan yük, taban zeminine ulaştığında, zemin tarafından yüksek deformasyonlara maruz kalmadan taşınabilecek bir seviyeye indirilmiş olur (Umar ve Ağar, 1985).



Şekil 1.21. Yol üstyapısı tip enkesiti (KGM, 2013).

1- Dolgu Şevi
2- Doğal Zemin
3- Üstyapı Tabanı
4- Banket Kaplaması
5- Alttemel Tabakası
6- Temel Tabakası
7- Kaplama Tabakası
8- Hendek Şevi
9- Yarma Şevi
10- Banket Temeli

11- Yolun Enine Eğimi
12- Tesviye Yüzeyi
13- Yol Gövdesi Taban Zemini
14- Üstyapı Proje Kalınlığı
15- Banket Eğimi
16- Trafik Şeritleri Genişliği
17- Banket Genişliği
18- Yol (Platform) Genişliği
19- Üstyapı Tabanı Genişliği
20-Taban Yüzeyinin Enine Eğim

Şekil 1.21'de görüleceği gibi bir esnek üstyapı, alttemel, temel ve kaplama kısmından oluşmaktadır. Esnek üstyapılarda kaplama, sathi kaplamalar ve karışım tipi kaplamalar olmak üzere iki çeşittir.

1.3.3.1 Sathi kaplamalar

Sathi kaplamalar, üstyapıyı çevre etkilerine karşı korumak, trafiğin yola tutunabilmesi için sürtünme tabakası sağlamak maksadıyla yapılan ve yük taşıma özelliği olmayan, ekonomik bir kaplama yöntemidir.

Taşıyıcı olmaması sebebiyle trafik yükünün fazla olduğu yerlerde kullanılmamalıdır. Sathi kaplamalar, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberine (KEÜPR) göre yolun proje ömrü boyunca tek yönünde oluşacak toplam standart dingil yükü tekerrür sayısının ($T_{8,2}$) $2x10^6$'dan az olduğu durumlarda kullanılmalıdır.

Sathi kaplamalar plent-miks, granüler, çimento bağlayıcılı temellerin şartnamesine göre hazırlanmış yüzeyleri üzerine bitümlü bağlayıcı ve agrega malzemesinin art arda serilip sonunda agregaların sıkıştırılması ile bir veya birkaç tabaka halinde teşkil edilirler (Arıkan, 2014).

Karayolları Teknik Şartnamesine (KTŞ) göre toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8,2}$) 500.000'den büyük olan yollarda mutlaka çift katlı sathi kaplama yapılmalıdır.

Genel olarak sathi kaplamaların işlevleri şöyle sıralanabilir (Arıkan, 2014);

- Düşük maliyetle kayma direnci yüksek bir satıh oluşturmak,
- Geçirimsiz bir tababaka oluşturarak yüzeye gelen su ve sair akışkanları, temel, alttemel ve taban zemininden geçmesini engellemek
- Trafiğin seyredebileceği düzgün bir satıh oluşturmak
- Deforme olan eski kaplamaların bakım ve onarımını yapmak
- Banketleri kaplamak

1.3.3.2 Bitümlü sıcak karışımlar

Dünyanın değişik yerlerinde asfalt terimi farklı anlamlara sahiptir. Örneğin Avrupa'da asfalt kelimesi, ABD'de sıcak karışım asfalt (HMA) veya asfalt betonu (AC) ile eşanlamda kullanılır (Asphalt Instıtute, 2014). Ülkemizde ise bitümlü sıcak karışım (BSK) olarak adlandırır.

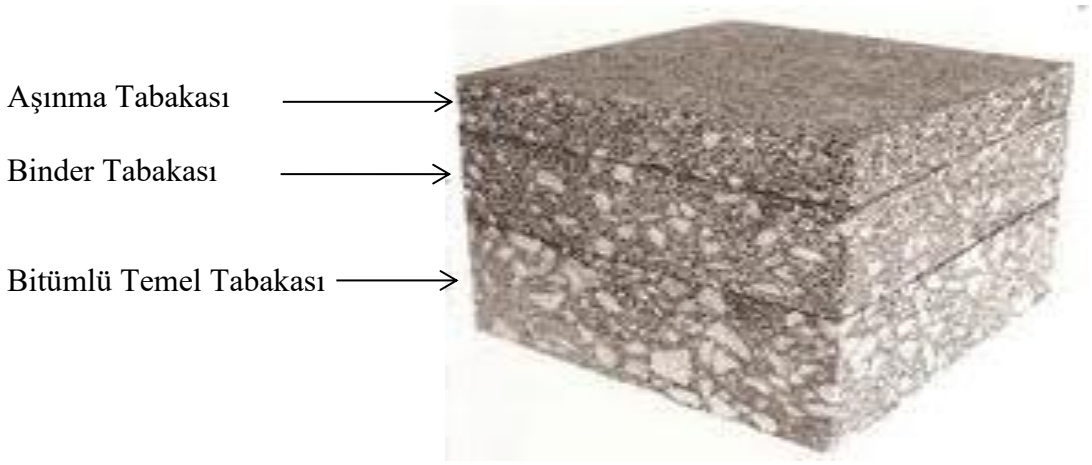
Genellikle asfalt betonu olarak bilinen bitümlü sıcak karışımlar, bitüm ve mineral agreganın belirli oranlarda karışımından müteşekkil, esnek bir tabaka üzerine serilen tabaka tipidir. Bitümlü karışımların, sıcak karışım asfalt, ılık karışım asfalt ve soğuk karışım asfalt olarak üç farklı şekli mevcuttur.

Agrega ve bitümün belirli oranlarda karıştırılmasından oluşan bitümlü karışımlar üç fazlı bir sisteme sahiptir. Katı fazı agrega, sıvı fazı bitümlü bağlayıcı, gaz fazı ise karışım içerisindeki hava boşlukları temsil eder (Kuloğlu, 2000).

Trafik yüklerine karşı mukavemet, karışımın iskeleti durumundaki agregalarca sağlanır (Wallace ve Martin, 1967).

Bitümlü sıcak karışım tabakaları konum itibariyle yolun en üst kısmında yer aldıkları için yol yapısı içinde en fazla trafik yüküne ve çevrenin tahrip edici etkisine maruz kalır. Bu yüzden bitümlü karışımları meydana getiren iki ana bileşen agrega ve bitüm belirli özelliklere sahip olmalıdır (Güngör vd., 2013).

Geleneksel olarak bitümlü sıcak karışım tabakaları Şekil 1.22.'de gösterildiği gibi bitümü temel, asfalt betonu binder ve asfalt betonu aşınma tabakalarından oluşur. Bu tabakalarım kompozisyon ve kalınlıkları ilgili yola ait proje ömrü boyunca oluşması beklenen toplam standart dingil yükü tekerrür sayısına ($T_{8,2}$) göre uygun abaklardan seçilir. Şayet bahsi geçen trafik değeri büyükse asfalt betonu aşınma tabakası yerine taş mastik asfalt seçilebilir (Sağlık ve Güngör, 2015).

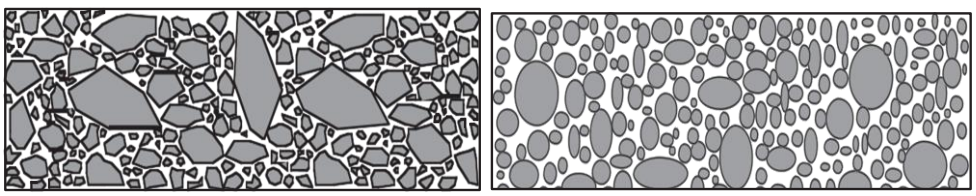


Şekil 1.22. Bitümlü sıcak karışım tabakaları.

Bitümlü karışım kaplamalarında beklenen özellikler şu şekilde sıralanabilir (Umar ve Ağar, 1985):

- Stabilite (Dayanım)
- Durabilite (Dayanıklılık)
- Geçirimsizlik
- İşlenebilirlik
- Esneklik
- Yorulmaya karşı direnç
- Kaymaya karşı direnç

Stabilite veya dayanım; taşıtlardan gelen uzun süreli statik yükler, devamlı dinamik yükler ve bu dinamik yükleri oluşturan hızlanan ve yavaşlayan tekerleklerin oluşturduğu basınç, çekme ve kesme kuvveti ile sökülmeye karşı sıcak karışımın gösterdiği mukavemet olarak tanımlanır. Stabilite daha çok agreganın gradasyonu, dayanımı ve yüzey dokusu, şekli gibi kenetlenebilme özelliği ile bitümün tür ve miktarına bağlıdır (Şekil 1.23.).



(1) (2)

Şekil 1.23. Köşeli agrega (1) ve yuvarlak agrega (2).

Durabilite veya dayanıklılık; kaplamanın, hava ve suyun sıcaklık değişimleri karşısında sebep olduğu etkilere gösterdiği dirençtir. Çevresel etkiler dışında trafik etkileri karşısında da kaplamanın kararlı olabilmesi, o kaplamanın dayanıklılığı ile ilgilidir. Dayanıklılık, karışımı meydana getiren agregaların darbelenme, aşınma, donma ve çözülme, cilalanma gibi etkilere karşı direnci ile bitümün oksidasyona karşı direncine bağlıdır. Oksidayona karşı direnç bitümlü bağlayıcının film kalınlığı ile karışımın boşluk miktarıyla alakalıdır.

Geçirimsizlik; Kaplamanın hava ve su geçişine olan direncini ifade eder. Bu da karışımın hava boşluğu miktarıyla alakalıdır.

İşlenebilirlik; Karışımın hazırlanması, serilmesi ve sıkıştırılması sırasındaki kolaylık olarak tanımlanır. Agreganın boyutu, gradasyonu, şekli, yüzey dokusu, en büyük dane çapı ile bitümün viskozitesi ve karışımdaki içeriği ile ilgilidir. Yüzey dokusu pürüzlü, şekli köşeli olan agregalar stabiliteyi artırırken işlenebilirliği azaltmakta, yüzey dokusu pürüzsüz ve yuvarlak şekilli agregalar işlenebilirliği artırırken stabiliteyi azaltmaktadır.

Esneklik; temel, alttemel ve taban zemininde meydana gelen deformasyonlara karşı kaplamanın çatlama yapmadan uyum sağlamasını ifade eder. Bitümün viskozitesi, karışımdaki içeriği, düktilitesi ve sıcaklığa arşı duyarlılığı ile karışım içerisindeki mineral fillerin oranına bağlıdır.

Yorulmaya karşı direnç; sürekli trafik yükleri altındaki kaplamanın, bu yüklerin sebep olduğu tekrarlanan eğilmeye karşı direncini ifade eder. Bitümün elastik geri dönme miktarına, oranına, yaşlanmaya karşı direncine ve kaplama kalınlığı ile kaplamadaki hava boşluğu miktarına bağlıdır.

Kaymaya karşı direnç; taşıtların her hava koşulunda güvenli ve kabul edilebilir bir mesafede durabilmesi ve hareket edebilmesi için gerekli sürtünme yüzeyine sahip olmasıdır. Kaymaya karşı direnç, agreganın gradasyonu, yüzey dokusu, şekli, cilalanma değeri ile karışımın kusma durumuyla alakalıdır (Arıkan, 2014).

1.3.4 Bitümlü sıcak karışım kaplamalı esnek üstyapılardaki yüzey bozuklukları

Bitümlü sıcak karışım kaplamalı esnek üstyapılar projelendirilirken 20 yıllık bir dönem baz alınır ve her 5 sene de bir kaplamanın ayrıntılı bakım, onarım

hizmetlerinin yapılması gerekir. Kaplama projelendirme süresi boyunca üzerinde oluşacak yüksek hız ve hacimdeki trafiğe güvenli ve konforlu hizmet etme yeteneğine o kaplamanın servis kabiliyeti denir. Bu servis kabiliyeti 0 ile 5 arasında bir değer olarak tanımlanır (Yoder ve Witczak, 1975).

Esnek üstyapılar trafik, zemin, iklim ve çevre koşulları etmenlerinden kaynaklanacak izin verilen hizmet yeteneği kaybına göre projelendirilir. Bu sebeple yolun ilk trafiğe açıldığı andaki servis kabiliyeti ile belirlenen proje ömrü sonundaki servis kabiliyetinin daha projelendirme aşamasında belirlenmesi gerekmektedir. Kaplamanın ilk servis kabiliyeti 4,2 ila 4,5 arası bir değer olarak belirlenirken müsaade edilebilir son servis kabiliyeti il yolları için 2.0, otoyol ve devlet yolları için 2.5 seçilmektedir. Kaplamanın servis kabiliyeti indeksinin son servis kabiliyetine inmesi, kaplamada iyileştirme ve yeniden yapım gerektiğini göstermektedir. Bitümlü sıcak karışım kaplamalı esnek üstyapılardaki yüzey bozuklukları şu şekilde sıralanabilir: (Sağlık ve Güngör, 2015).

- Timsah sırtı (Yorulma) çatlaklar
- Kenar çatlakları
- Enine çatlaklar
- Boyuna çatlaklar
- Blok (Harita) çatlaklar
- Tekerlek izinde oturmalar
- Ondülasyon, ötelenme ve yoğrulmalar
- Lokal oturmalar
- Çukurlar
- Segregasyon, soyulma, sökülmeler

1.3.4.1 Timsah sırtı çatlaklar

Yorulma direnci, tekerlek yükleri altındaki tekrarlanan bükülmeye karşı kaplamanın direncidir. Bir kaplamanın yorulmadan kaynaklanan yorgunluk çatlaması, genellikle timsah sırtı çatlama olarak adlandırılır (Şekil 1.24.). Bu tip çatlama, tekrarlanan yük uygulamalarının kaplamayı limit noktasına kadar gerdiğinde gerçekleşir. Yorulma kırılması öncelikle yetersiz bir kaplama kalınlığına bağlı olmakla birlikte, hava boşlukları ve bitüm özellikleri yorulma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kaplamadaki hava boşluğu yüzdesi, dizayn gereği veya sıkışma eksikliği nedeniyle

arttıkça, kaplamanın yorulma direnci önemli ölçüde azalır. Araştırma ve uygulamalar, BSK karışımında polimer modifiyeli bir bitümün kullanılmasının yorulma direncini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. Kaplamanın kalınlığı ve mukavemet özellikleri ile alt tabakanın desteği de kaplama ömrü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Yorulma veya yük sebebiyle oluşacak kırılmayı önler. Kalın ve iyi desteklenmiş kaplamalar, üzerine gelen trafik yükünü, ince ya da zayıf desteklenmiş kaplamalara göre daha fazla alana yayar. Bu nedenle, daha uzun ömürlüdürler. Yorulma kırılması tipik olarak bir asfalt tabakasının tabanında başlar ve yüzeye doğru ilerler. Bu, BSK katmanının tabanındaki yüksek çekme gerilmesinin bir sonucudur. Son yıllarda, timsah sırtı çatlakların, kaplamanın tepesinden başlayıp ve aşağı doğru ilerlediği gözlenmiştir. Bu durum, BSK yüzeyinde oluşan yüksek çekme gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak ince BSK kaplamalarının BSK' nin tabanından başlayan yorulma çatlağına maruz kaldıkları ve kalın BSK kaplamalarının, yorgunluk kırılmaları öncelikli olarak bu kaplamaların yüke maruz kalan yüzey kısımlarında görüldüğü düşünülmektedir.



Şekil 1.24. Timsah sırtı (yorulma) çatlak.

Yorulma kırılmasının üstesinden gelme yöntemleri şunlardır:

- Tasarım sırasında ağır yüklerin sayısı yeterince hesaba katılmalı;
- Daha kalın kaplama kullanılmalı,
- Yeterli derecede yeraltı drenaj sağlanılmalı,
- Suya ve neme karşı dayanıklı kaplama malzemeleri kullanılmalı,
- Normal sapmalara dayanacak kadar esnek olan BSK kullanılmalı,
- Bağlayıcı olarak modifiye bitüm kullanılmalı.

Malzeme seçimi ve karışım dizaynı sırasında esnek malzemelerin seçimi kesin olarak ele alınmalıdır. BSK, asfalt tabakasının tabanında oluşan çekme gerilmesine

dayanacak kadar yeterli çekme mukavemetine sahip olmalı ve çatlamaksızın tekrarlanan yük uygulamalarına dayanacak kadar da esnek olmalıdır. Bu nedenle BSK, bünyesinde oluşacak yorulma çatlağının üstesinden gelebilmesi için esnek bir malzeme gibi davranacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu, asfalt çimentosunun yani bitümün reolojik özelliklerine bir üst sınır koyarak gerçekleştirilir. Çünkü BSK'nin gerilme altındaki davranışı, daha çok asfalt çimentosuyla ilgilidir. Basitçe söylemek gerekirse, yumuşak asfaltların sert asfaltlardan daha iyi yorulma dayanımları vardır (Asphalt Instıtute, 2014).

1.3.4.2 Kenar çatlakları

Kaplama kenarı ile banket arasında oluşan, kaplama kenarından yaklaşık 30 cm içeride yol eksenine paralel süreksizlikle devam eden, bazen yola doğru dallanan çatlaklardır (Şekil 1.25.) (Salta, 2010).

Kenar çatlakları; kaplamanın kenar kısmının çevre etkisine maruz kalması sonucu donma etkisi; temel, alttemel ve taban zemininde yetersiz sıkışma, yetersiz taşıma gücü, drenaj yetersizliği, zeminde donma ve çözünmeye bağlı deformasyon, zeminin yüksek şişme yüzdesi ve basıncı veya zeminin rutubetini kaybetmesi sonucu büzülme gibi sebeplerden dolayı oluşur. Ayrıca banketlerin yeterli destek sağlamadığı kesimlerde de kenar çatlakları oluşur (Arapoğlu, 2015).



Şekil 1.25. Kenar çatlakları.

Kenar çatlaklarının oluşmasını engellemek için şu yöntemler uygulanır (Umar ve Ağar, 1985)

- Şişme ve büzülme potansiyeli olan malzemeler taban zemininden uzaklaştırılmalı,
- Taban zeminin platform genişliğinden daha geniş bir alanda sıkıştırma yapılmalı,
- Tüm tabakalarda yeteri kadar sıkışma sağlanmalı,
- Yol gövdesindeki suyu çekme potansiyeli olan yol kenarındaki bitki örtüsü temizlenmeli,
- Uygun ve yeterli drenaj yapılmalı,
- Yol gövdesi dayanımı yüksek malzemelerden teşkil edilmeli.

1.3.4.3 Enine çatlaklar

Bu tür bozulmalar trafik etkisinden değil kötü çevre koşullarında kaynaklanmaktadır (Umar ve Ağar, 1985). Düşük sıcaklıkta çatlamaları, Şekil 1.26.'daki gibi, normal olarak, kaplamanın yüzeyindeki sıcaklığın yeterince düşmesinin ardından termal olarak tetiklenir ve BSK kaplamasındaki bitümün maruz kalabileceği azami gerilme kuvvetini aşmasıyla oluşur. Sonuç olarak bu çatlaklar karayolunun merkez çizgisine dik olan ve genellikle eşit aralıklarla oluşan enine çatlaklardır. Bu çatlaklar yüzeyden başlar ve aşağıya doğru ilerlerler. Çatlamanın ciddiyetini etkileyen başlıca faktörler; kaplamanın soğuma hızı, düşük sıcaklık olaylarının frekansı ve asfalt bağlayıcısının sertliğidir. Düşük sıcaklıkta çatlama, karışımdaki yorgunluk türüne neden olacak tek bir olayın veya tekrarlanan soğuk hava döngülerinin sonucu olabilir (Asphalt Instıtute, 2014). Ayrıca bitümün yaşlanması da enine çatlak oluşumlarına sebep olabilmektedır. Bitümün yaşlanmasına sebep ise başta oksidasyon, buharlaşma veya uçucu madde kaybı olmak üzere aktif ışığa bağlı polimerizasyon ile yoğunlaşma ısıya bağlı polimerizasyondur (Şengöz ve Ağar, 2005).

Enine çatlak oluşumlarını önlemek için şu yöntemler uygulanır (Asphalt Instıtute, 2014);

- Doğru bağlayıcı seçilmeli,
- Su emme kapasitesi düşük agrega seçilmeli,
- Karışımda yüksek filler içeriğinden kaçınılmalı.



Şekil 1.26. Enine çatlak.

1.3.4.4 Boyuna çatlaklar

Boyuna çatlaklar kaplama üzerinde trafik akış yönüne paralel uzanan çatlak formdur (Şekil 1.27.). Boyuna çatlaklar, dolguların yetersiz sıkışmasından kaynaklanan oturmalar, yetersiz kalıplaşma sonucu dolgunun yatay hareketi, yetersiz drenaj, olumsuz iklim ve çevre etkileri, yetersiz taşıma gücünden kaynaklı oturmalar, boyuna ek yerlerinin yanlış inşasından dolayı meydana gelirler (Arık, 1998).



Şekil 1.27. Boyuna çatlak.

1.3.4.5 Blok (Harita) çatlaklar

Blok veya harita çatlakları, boyuna ve enine çatlakların birleşerek poligon oluşturduğu çatlak tipidir (Şekil 1.28.). Bu çatlak tiplerine müdahale edilmediği takdirde timsah sırtı çatlaklara dönüşür (California Department of Transportation, 2001). Harita çatlakları, taban zemininde oluşan şişme ve büzülme, don etkisi ve bitümlü bağlayıcının yaşlanmasından dolayı sertleşmesi ve kopması sonucunda

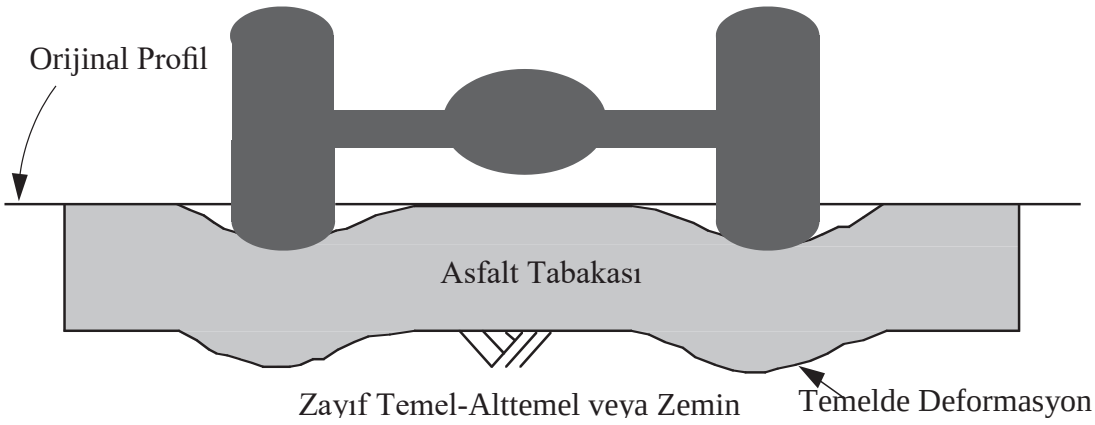
oluşur (Doğan, 2006). Ayrıca sıcaklık değişimleri, ağır trafik yükü ve kaplamanın olağandan çok sıcak serilmesi de bu tip çatlamalara sebep olabilir (Arapoğlu, 2015).



Şekil 1.28. Blok (Harita) çatlak.

1.3.4.6 Tekerlek izinde oturmalar

Tekerlek izinde oturmalar, yolda trafik akış yönüne paralel, taşıt tekerlerinin temas ettiği yüzey boyunca oluşan oluk şeklindeki deformasyonlardır (Şekil 1.29.). Genel olarak ağır taşıt trafiğindeki taşıtların dingil ve tonajlarındaki artış, çift tekerlek yerine tek teker kullanılması ve lastik iç basınçlarının artması ile karışımın yanlış dizaynı ve imalat hatası tekerlek izindeki deformasyon oluşumlarına sebep olarak gösterilebilir (Uluçaylı ve Yavuz, 2002).



Şekil 1.29. Zayıf alt tabakadan kaynaklanan tekerlek izinde oturma.

Aslında tekerlek izinde oturmanın başlıca iki nedeni vardır; zayıf zemin ve karışımın yetersiz stabilitesidir. Şekil 1.29.'da sunulduğu gibi zayıf zeminden kaynaklanan tekerlek izinde oturmalarda, deformasyon asfalt tabakalardan ziyade zemin veya alttemel - temelde oluşabilmektedir. Genellikle bu durum, kaplamanın yapısı ve

yükleme koşulları için gerekli zemin kalitesinin veya koşullarının zayıf olmasından kaynaklanır. Sert kaplama malzemeleri bu tür tekerlek izinde oturmayı azaltabilir ancak alt katmanı veya alttaki tabakayı kararlı hale getirmek daha güvenlidir. Taban malzemelerinin yeterli dayanıma ortam koşulana sahip olduğu ancak asfalt kaplamasında stabilitesi yetersiz bir karışımın kullanıldığı durumlarda deformasyon asfalt tabakasıyla sınırlıdır ve taban malzemesi kararlı olduğundan oluklaşmanın kenarında bir kabarmaya neden olacaktır (Şekil 1.30). Bu durum tekerlek izinde oturmanın bir bitümlü bağlayıcı problemi olduğunu düşündürse de aslında karışımı oluşturan hem bitümlü bağlayıcı, hem de agreganın kendi özellikleri ile birlikte karışım içerisindeki hacimsel oranları ve davranışlarıyla daha irtibatlı olduğudur. Bitümlü karışımının kesilmeye (tekerlek izinde oturmaya) karşı mukavemetini; içsel sürtünme açısı yüksek, köşeli, pürüzlü bir yüzey dokusuna sahip olan ve partikül-partikül teması geliştirmek üzere derecelendirilmiş bir agrega karışımı yükseltir. Karışıma bir yük uygulandığında agrega partikülleri birbirine sıkıca kenetlenir ve daha büyük, tek, elastik bir kütle olarak işlev görür. Agregaların iyileştirilmesi, karışımın kesme mukavemetinde yeterli artışı sağlamazsa, daha sert bir bağlayıcı ve/veya modifiyeli bir bağlayıcı seçilmelidir (Asphalt Instıtute, 2014). Çünkü düşük penetrasyonlu bitümler, diğerlerine göre daha iyi tekerlek izinde oturma performansına sahiptir (Kuloğlu vd., 2008).



Şekil 1.30. Zayıf karışımdan kaynaklanan tekerlek izinde oturma.

1.3.4.7 Ondülasyon, ötelenme ve yoğrulmalar

Ondülasyon, ötelenme ve yoğrulmalar, trafiğin akış yönünü enine gelişen ve aralıklarla devam eden dalgalanma şeklindeki plastik deformasyonlardır (Şekil 1.31.). Ondülasyon, ötelenme ve yoğrulmalar genellikle karışımın yetersiz stabiliteli oluşundan kaynaklanır. Bu tür deformasyonları önlemek için yüksek stabiliteli karışımlar kullanılmalıdır (Salta, 2010).



Şekil 1.31. Ondülasyon, ötelenme ve yoğrulma.

1.3.4.8 Lokal oturmalar

Lokal oturmalar, adından da anlaşılacağı gibi yolun bir bölümünde ve bitümlü sıcak karışımdan kaynaklı olmayan deformasyon şeklidir (Şekil 1.32.). Lokal oturmalara; temel, attemel, taban zemininin yetersiz sıkışması, taban zemininde şişme potansiyeli yüksek kilin şişmesi veya büzülmesi, drenaj yetersizliği sebebiyle bir bölgede su toplanması, taşıma gücü düşük taban malzemesi, sanat yapılarının yaklaşım dolgularında uygun olmayan malzeme kullanımı veya yaklaşım dolgularında yetersiz sıkışma gibi etmenler sebep olmaktadır (US Army Corps of Engineers, 2000). Lokal oturmalara sebep olan bu etmenlerin imalat aşamasında ortadan kaldırılması bu tür deformasyonları önleyecektir.



Şekil 1.32. Lokal oturma.

1.3.4.9 Çukurlar

Çukurlar, yolun muhtelif kesimlerinde oluşan belli çaplardaki oyuklardır (Şekil 1.33.). Çukurlar, ağır trafik yüküne karşı yetersiz kaplama kalınlığı, hatalı yapım teknikleri ve düşük malzeme kalitesi, karışımın soyulma ve segregasyon deformasyonu sebep olur. Çukur oluşumuna sebep olan bu etmenlerin imalat aşamasında ortadan kaldırılması bu tür deformasyonları önleyecektir (Doğan, 2006).



Şekil 1.33. Çukur.

1.3.4.10 Segregasyon, soyulma ve sökülmeler

Segregasyon, soyulma ve sökülmeler; sıcak karışımdan iri agreganın çeşitli sebeplerle ayrılmasıdır (Şekil 1.34.) (Van den Bergh ve Van de Ven, 2009).

Segregasyon, soyulma ve sökülmelere; su ve trafik etkisine rağmen soyulma mukavemeti düşük karışım kullanımı, karışım içerinde kil topakları ve/veya kille kaplı agrega kullanımı, yetersiz sıkışmaya bağlı yüksek boşluk, yetersiz bitüm içeriği, bitümün yaşlanması, tekniğine uygun yapılmayan imalat, donma çözünme mukavemeti zayıf agrega kullanımı gibi etmenler sebep olmaktadır (Sağlık ve Güngör, 2015).



Şekil 1.34. Segregasyon, soyulma, sökülme.

2. BOZULMUŞ ASFALT KAPLAMALARININ GERİ DÖNÜŞÜMÜ

2.1 Geri Dönüşüm Önemi

Yıpranmış veya ömrünü tamamlamış asfalt kaplamaların yol yüzeyinden kazılarak yeni yapılacak sıcak asfalt karışımlarda yeniden kullanılmasına geri dönüşüm (recycling) adı verilmektedir. Yoldan kazılarak geri kazanılan malzemenin yeniden yapılacak olan yolun kaplama tabakalarında kullanılması, kaynaklarımızın hem teknik hem de ekonomik anlamda daha verimli kullanılması açısından son derece önemlidir. Her geçen gün genişleyen ülkemiz karayolu ağı, gelecek dönemlerde üstyapı iyileştirme faaliyetlerinin yoğun bir şekilde gündeme geleceğini göstermektedir. Kazınmış eski asfalt kaplama tabakalarının içerisinde bulunan ekonomik değeri yüksek oranda bitüm ve agreganın yeniden yol yapımında kullanılması, maliyetleri oldukça azaltacağı gibi çevrenin korunmasına da büyük oranda katkı sağlayacaktır (Yiğiter, 2011).

Geri dönüşümde asıl olan kazılarak yerinden sökülen asfaltın, yeni bir karışıma bir katkı malzemesi olarak değil de karışımda yeniden kullanılarak devamının sağlanmasıdır. Asfalt veya bir başka bitümlü sıcak karışım mevcut halde bozulmuş olmasına rağmen geri kazanıldığında yine asfalt olarak değerini koruyabilmektedir. Ancak belirli bir süre hizmet vermiş olan asfalt tabakasının geri kazanımında, mevcut kaplama içerisindeki bitümlü bağlayıcısının yaşlanmadan kaynaklanan sertlik, elastiklik ve viskozitesinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu halde bile özellikle yüksek oranda geri dönüşüm asfaltın kullanıldığı ve/veya düşük sıcaklıklarda hazırlanmış karışımlarda geri kazanılan asfalt içerisindeki bitümlü bağlayıcı yeterince yumuşamayacağından karışım içerisinde adeta bir kütle gibi davranabilmekte ancak nihai durumda karışım termoplastik ve viskoelastik davranışa sahip olmaktadır (Van den Bergh ve Van de Ven, 2009).

Dünyada her yıl yaklaşık 1.5 milyar ton asfalt karışım üretimi için 1.425 milyar ton agrega ve 75 milyon ton bitüm tüketilmektedir. Buna karşın asfalt kaplama yolların yenilenmesi sırasında sökülen asfalt yığınları da doğaya terk edilmektedir. Sökülmüş asfalt kaplamaların geri kazanılarak ekonomik değere dönüştürülmesi günümüzde mümkün olmakla beraber çevre ve maliyet açısından her geçen gün daha da önem kazanmaktadır (Irving, 1998).

Geri kazanılan asfalt kaplaması (RAP), bu günlerde asfalt yol rehabilitasyonu alanında tipik bir yan ürün olmakla birlikte asfalt kaplamasının geri dönüşümü, 1973'teki petrol ambargosu ve tüm inşaat maliyetlerindeki keskin yükseliş nedeniyle teşvik edildiğinden beri uygulanageldiğinden aslında yeni bir teknik değildir. Avrupa'da, RAP kullanımı; Hollanda, Flanders Belçika, Almanya ve Danimarka gibi bazı ülkelerde 30 yıldan fazla deneyime sahip olan yaygın bir uygulamadır (Van den Bergh ve Van de Ven, 2009). Günümüzde, RAP inşaat sektöründe en çok geri dönüştürülebilir materyal olarak kabul edilmekte ve cam ve kâğıt gibi tipik geri dönüşüm malzemelerinin hacimlerini bile aşmaktadır (EAPA, 2011). AB Atık Çerçeve Yönetmeliği 2008/98/EC ile 2020 yılına kadar tehlikeli olmayan inşaat ve moloz atıklarında (asfalt atıkları dâhil) %70'lik bir geri dönüşüm hedefi koyulmuştur (Miliutenko vd., 2012). Avrupa'da her yıl yaklaşık 50 milyon ton RAP üretilmekte ve bunun %70'inden fazlası asfalt kaplamalarında yeniden kullanılmaktadır (Falchetto vd., 2014). 2000 yıllarda bile yılda geri dönüşüm için kullanılan RAP miktarı İsveç'te yaklaşık 0,84 milyon ton, Almanya'da 7,3 milyon ton, Danimarka'da 0,53 milyon ton ve Hollanda'da yaklaşık 0,12 milyon ton civarındadır. 1995 yılında Japonya'da toplam sıcak karışım üretiminin %30'unu oluşturan 20 milyon tonluk geri dönüştürülmüş sıcak karışım üretildi. ABD'de ise eski bitümlü kaplamalardan elde edilen toplam RAP miktarının yaklaşık %80'i (33 milyon ton) geri dönüşümde kullanılmıştır (Falchetto vd., 2014).

Ülkemizdeki nüfus artışı ve buna bağlı olarak artan atık malzemeler ve oluşan çevre duyarlılığı, geri dönüşümü ekonomik ve sosyal bir değer haline getirmiş ve Çevre Bakanlığı tarafından 1991 yılında yayınlanan bir yönetmenlikle geri dönüşüm yasal zorunluluk haline gelmiştir (Gürer vd., 2004). Asfalt tabakasında geri dönüşüm ise yeni yeni yaygınlaşmaktadır. Bunun en temel sebebi BSK kaplamalı yollara yeni geçmiş olmamızdan ve ülkemizde agrega temininin kolay olmasından kaynaklanmaktadır. Yakın gelecekte bu BSK kaplamaların bir kısmı ekonomik ömrünü tamamlayacaklarından geri dönüşüm daha da önemli hale gelecektir.

Bununla birlikte ülkemizde sıcak karışım yöntemiyle ilk geri dönüşüm uygulaması, KGM tarafından Sakarya Köprülü Kavşağı-Gümüşova (17. Bölge Müdürlüğü Sınırı) Arası Otoyol ve Bağlantı Yolları Üstyapı İyileştirmesi ve Büyük Onarım İşi”

kapsamında gerçekleştirilmiş, uygulamada herhangi bir katkı malzemesi de kullanılmamıştır (Yiğiter, 2011).

Diğer bir uygulama yine KGM tarafından Akyazı-Adapazarı Yolunda bozulmuş kaplamaların kazılan %15'lik kısmı ılık besleme metoduyla binder ve bitümlü temel tabakalarında tekrar değerlendirilmiştir. Böylece bozulmuş asfalt tabakasının bir kısmı ekonomiye tekrar kazandırılmıştır. 2006-2008 arası yapılan bu uygulama sonucu 2013 yılı itibariyle geri kazanılan asfalt tabakası 7 farklı işte kullanılmış ve toplamda 645.644 tona ulaşarak ekonomik geri kazanım 47 milyon TL olmuştur. Ekonomik kazancın yanı sıra bozulmuş asfalt tabakasının kazıması sonucu ortaya çıkan atık malzemelerinin yeniden kullanılması ile çevreye verilecek zararın önüne geçilmiş ve depolama sahalarının azaltılması, taş ocaklarından daha az malzeme temini ile doğa tahribatı asgari düzeye çekilmiştir. Ayrıca bu uygulama sayesinde yapılacak sonraki uygulamalar için de tecrübe kazanılmıştır (KGM, 2016).

Ülkemizle gelişmiş ülkeler arasında RAP malzemesinin geri kazanımı ile ilgili bir kıyaslama yapıldığı zaman, Avrupa Ülkelerinde bu geri kazanım oranı %70 ile %80 arası civarda iken, ülkemizde ise bu oran %20'ler civarındadır (Akbulut vd., 2003).

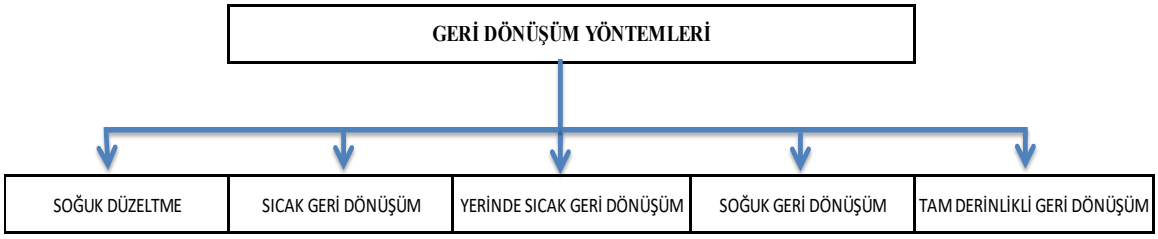
Bozulmuş asfalt kaplamaların, bitümlü sıcak karışımlarda yeniden kullanılması ile genel olarak aşağıdaki faydalar sağlanabilmektedir (Güngör vd., 2008).

- Kazılan BSK tabakası tekrar kullanılarak milli kaynakların korunması ve\veya değerlendirilmesi ile ekonomik kazanımlar elde edilir.
- Geri dönüşüm, yeni malzeme ihtiyacını azaltarak doğal kaynakların korunması ve atık sahalarının oluşmaması açısından çevrenin korunmasına katkı sağlar.
- Mevcut kaplamanın üzerine yeni kaplama yapılması halinde yansıma çatlaklarının önlenememesi, kot yükselmesi vb. sorunlar giderilebilir.
- Mevcut kaplama yapısı üzerine kalın bir tabaka eklenmeksizin geri dönüştürülerek daha mukavim bir tabaka elde edilir.
- Geri dönüşüm, geleneksel yapım teknikleriyle karşılaştırıldığında büyük miktarda enerji tasarrufu sağlayabilir.

2.2 Geri Dönüşüm Yöntemleri

Geri dönüşüm yerinde ve plentte geri dönüşün olarak iki şekilde uygulanmasına karşın teknik açıdan soğuk düzeltme (cold planing), sıcak geri dönüşüm (hot

recycling), yerinde sıcak geri dönüşüm (hot in-place recycling), soğuk geri dönüşüm (cold recycling) ve tam derinlikli geri dönüşüm (full depth reclamation) olmak üzere 5 farklı tipte uygulanır (Şekil 2.1.) (ARRA, 2001).



Şekil 2.1. Geri dönüşüm yöntemlerinin sınıflandırılması.

Geri dönüşüm yönteminin belirlenmesinde mevcut yol yüzeyindeki bozulmaların tipi, şiddeti ve yoğunluğu etkili olmaktadır. Çünkü bütün geri dönüşüm metotları farklı bozulma tiplerini onarmak için aynı etkinlikte değildir. Bozulma türlerine göre alternatif geri kazanım yöntemini seçmek için Çizelge 2.1.'i önermektedir (TS EN ISO 2592, 2017).

Çizelge 2.1. Bozulma türüne göre kullanılan geri dönüşüm yöntemi seçimi.

Kaplama Bozulma Tipi		CP	HR	HIR	CR	FDR
Yüzey kusurları	Sökülme	X	X	X		
	Cilalanma	X	X	X		
Kalıcı deformasyon	Tekerlek izi-sığ	X	X	X		
	Tekerlek izi-derin		X		X	X
Çatlaklar/ trafikten kaynaklanan	Timsah sırtı		X		X	X
	Boyuna çatlaklar		X	X	X	X
	Kaplama kenarı çatlakları		X		X	X
	Yansıma çatlakları		X	X		
Çatlaklar/ trafikten kaynaklanmayan	Blok tipi çatlaklar		X		X	X
	Boyuna çatlaklar		X	X		
	Enine çatlaklar		X		X	X
Yamalar	Yüzeysel yamalar		X			X
	Derin yamalar		X			X
Problemli temel/alttemel						X
Seyahat konforu (pürüzlülük)	Genel olarak pürüzlü	X	X	X		
	Çukur	X	X	X		X

2.2.1 Soğuk düzeltme (CP)

Soğuk düzeltme, mevcut bir kaplamanın, Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi, özel olarak tasarlanmış ekipman kullanılarak istenen derinliğe, boykesit ve enine eğimde kontrollü bir şekilde kazılmasıdır.

Elde edilen pürüzlü yüzey hemen trafiğe açılacağı gibi diğer asfalt geri dönüşüm yöntemlerinden biri ile kaplanabilir veya temizlenip yapıştırıcı (tack coat) ile kaplandıktan sonra üzerine BSK teşkil edilebilir. Ayrıca soğuk düzeltme, Şekil 2.3.'te gösterildiği gibi yolun sürtünmesini artırıp böylece kayganlığı ortadan kaldırmak amacıyla kaplamaların pürüzlendirilmesinde veya dokulandırılmasında da kullanılır.



Şekil 2.2. Tipik ön yüklemeli freze makinesi (ARRA, 2001)



Şekil 2.3. Yarım şerit soğuk düzeltme makinesi (ARRA, 2001).

Modern soğuk planya makinesi veya freze makinesinde büyük çaplı bir döner kesme silindiri veya kesme haznesinde kesici/rotor/mandrel bulunur. Freze işlemi sırasında, üretilen toz miktarını kontrol etmek ve aletin ömrünü uzatmak için az miktarda su kullanılır. Su, kesme haznesindeki birkaç enjektör aracılığıyla püskürtülür. Son yıllarda üretilen freze makineleri kaplama yüzeyini belirtilen derinlik ve yönde kazıyabilmesi için gereken çekiş ve dayanıma sahiptir.

Soğuk düzeltme çalışması sırasında üretilen RAP, freze makinesini takip eden kamyonlara yüklenerek sahadan uzaklaştırılır. Eldeki RAP isteğe göre merkezi bir plentte soğuk geri dönüşüm veya sıcak geri dönüşüm süreciyle geri dönüştürülür. RAP aynı zamanda yol yapımı ve genişletmesinde, hendek kaplamalarında, kaplamaların onarımlarında veya stabilize yollarda tozsuz bir yüzey için oluşturulan temel tabakasında yeniden kullanılabilir. RAP'nin bir temel olarak veya benzer malzeme olarak yeniden kullanımı da bir geri dönüşüm türüdür ancak RAP'den daha yüksek katma değer isteniyorsa RAP uygulaması, merkez plentte soğuk geri dönüşüm veya geri dönüştürülmüş karışım olarak kullanılması gerekmektedir.

Soğuk düzeltmenin avantajları şunlardır (ARRA, 2001):

- Tekerlek izindeki oturmaların düzeltilmesi, bozulmuş kaplama yüzeylerinin ve / veya oksitlenmiş asfaltların kazılması,
- Boyuna ve enine profilin düzeltilmesi,
- Mevcut yolun drenajının yeniden düzenlenmesi,
- Yolun yenilenmesi veya genişletilmesi için bozulmuş kaplamanın kaldırılması ve kaldırılan kaplamanın geri dönüşümde kullanılabilmesi,
- Tamir işlerinden önce çatlaklı veya bozulmuş kaplamanın kaldırılarak yansıma çatlaklarının önüne geçilmesi
- Sürtünmenin artırılması
- Kurplardaki mevcut kaplamanın kaldırılmasıyla oluşacak yükseklik farkı giderilerek eski haline getirilmesi,
- Yapılacak ilave bir asfalt geri dönüşümü öncesinde sathın hazır hale getirilmesi,
- Diğer iyileştirme yöntemlerine kıyasla daha fazla enerji tasarrufu,
- Artırılmış proje verimliliği ve mevcut malzemelerin yeniden kullanımı,
- Kamu malını daha az kullanarak yüksek verimlilik.

2.2.2 Sıcak geri dönüşüm (HR)

Sıcak geri dönüşüm, merkezi bir tesiste yeni agrega ve yeni bitümlü bağlayıcı ile yeteri kadar RAP'nin karıştırılarak bir geri dönüşümlü karışım üretme işlemidir. Sıcak geri dönüşümde, yeni agrega ve bitümlü bağlayıcı ile geri dönüşüm malzemesi karıştırılarak geri dönüşüm malzemesi elde etmek için RAP'nin ısıtılması gerekmektedir. Bunun için ısı transfer yöntemi kullanılır. Sıcak geri dönüşüm karışımı imalatı için Şekil 2.4. ve Şekil 2.5.'da gösterildiği gibi özel olarak tasarlanmış veya modifiye edilmiş harman (batch) tipi veya tamburda sürekli karıştırma (drum mix) tipi plentler kullanılır.

Sıcak geri dönüşüm şu anda dünyada en yaygın kullanılan asfalt geri dönüşüm yöntemidir. Sıcak geri dönüşümün bir parçası olan RAP'nin karışma dahil olma oranı ülkeler arasında değişiklikler göstermektedir. Bu oran, ülkelerin ilgili kurumlarının yaptığı araştırma ve teknolojik gelişkenliğine bağlı olarak artmaktadır. İlgili kurumlarca yapılan araştırmalar RAP'nin yolun sadece bitümlü temel ve binder tabakalarının imalatında değil, aynı zamanda aşınma tabakasının imalatında da kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Sıcak geri dönüşümünde RAP üretimi için soğuk düzeltme (CP) yöntemi tercih edilir.



Şekil 2.4. Sıcak geri dönüşüm için RAP beslemeli batch tipi plent (ARRA, 2001).



Şekil 2.5. Sıcak geri dönüşüm için RAP'lı durum-mix tipi plent (ARRA, 2001).

Sıcak geri dönüşüm yönteminde yeni agrega ve bitümlü bağlayıcı ile karışıma dâhil edilecek RAP'nin arasında cereyan edecek ısı transferi sebebiyle RAP'nin karışıma girmeden önce içerisindeki rutubet en aza indirilmelidir. Eğer fazla rutubet

giderilmediği takdirde karışım oluşturulması için verilen ısı rutubetin kurutulması için harcanacağından enerji kaybına neden olacaktır.

Sıcak geri dönüşüm sonucu oluşan karışım, plentten çıktıktan sonraki imalat süreci ile geleneksel bitümlü sıcak karışımın plentten sonraki imalat süreciyle aynı olduğu gibi yapılan performans gözlemleri sonucu kalite, dayanım, dayanıklılık vb. gibi özellikler bakımından da farkı bulunmadığı görülmektedir (ARRA, 2001).

2.2.3 Yerinde sıcak geri dönüşüm (HIR)

Yerinde sıcak geri dönüşüm yöntemi ile mevcut asfalt kaplamasının tamamı yerinde geri dönüştürülmektedir. Kaplamayı iyileştirme derinlikleri genellikle 20 mm ile 50 mm arasında olmakla birlikte gelişmiş ekipmanlarla bu derinlik 75 mm kadar çıkarılmaktadır (ARRA, 2001).

Yerinde sıcak geri dönüşüm yönteminde başlangıçta geri dönüştürülmesi öngörülen kaplama, uygun bir ısıtma sistemi ile yüksek bir sıcaklığa ısıtılmaktadır. Böylece kaplamanın bozulmuş kısımları daha kolay kaldırılır. İstenen sıcaklığa gelen kaplamanın yüzeyi istenen derinliğe kadar kazılır. Kazınan kaplamanın içerisine ihtiyaca bağlı olarak yine agrega ve bitümlü bağlayıcı eklenebilir. Malzeme homojen hale gelmesi için iyice karıştırılır ve istenen kalınlıkta serilip sıkıştırılır. Diğer geri dönüşüm yöntemlerine göre bu süreç daha az zaman harcadığından geri dönüştürülen kesimin trafiğe kapatılması süresi de diğer yöntemlerdekine göre daha kısadır. Geri dönüşüm yerinde yapıldığından nakliye maliyeti de daha azdır. Ancak yerinde sıcak geri dönüşüm yönteminde kullanılan ekipmanlar hacimce büyük ve hantal olduklarından şehir içi uygulamalarda bu handikapların göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Jones, 2010).

Yerinde sıcak geri dönüşüm 3 kategoriye ayrılabilir (Umar ve Ağar, 1985) :

- Yüzeysel Geri Dönüşüm (Surface Recycling)
- Yeniden Karıştırma (Remixing)
- Yeniden Kaplama (Repaving)

Yüzeysel geri dönüşüm; asfalt kaplama yüzeyinin birtakım ısıtma ünitesi ile yumuşatılması işlemini içeren yerinde sıcak geri dönüşüm türüdür. Şekil 2.6.'da gösterilen vasıtalarla belirli bir sıcaklığa getirilip yumuşatılan kaplama, istenen

derinliğe (genellikle 20 mm ile 40 mm arası) kadar kazılır (Şekil 2.7.). Gerekirse kazılan kaplamaya katkı maddesi ilave edilir. Kazılan gevşek kaplama harmanlanarak homojen bir şekilde karıştırılır (Şekil 2.9.). Standart bir serici (finişer) vasıtasıyla serilir ve sıkıştırılır (Şekil 2.8.). Yüzeysel geri dönüşüm işlemi sırasında kazılan kaplamaya yeni bir sıcak karışım ve agrega ilavesi yapılmaz ve böylece kaplamanın işlem sonundaki kalınlığı korunmuş olur. Yüzeysel geri dönüşüm aslında mevcut yol üzerine gelecek takviye BSK tabakasının oturacağı yüzeyin iyileştirilmesinde kullanılan en eski bir yerinde sıcak geri dönüşüm yöntemdir.



Şekil 2.6. Yüzeysel geri dönüşüm ısıtma üniteleri (ARRA, 2001).



Şekil 2.7. Yüzeysel geri dönüşüm kazıma dişleri (ARRA, 2001).



Şekil 2.8. Geri dönüşüm karışımın serilmesi (ARRA, 2001).



Şekil 2.9. Yerinde sıcak geri dönüşüm karıştırma treni (ARRA, 2001).

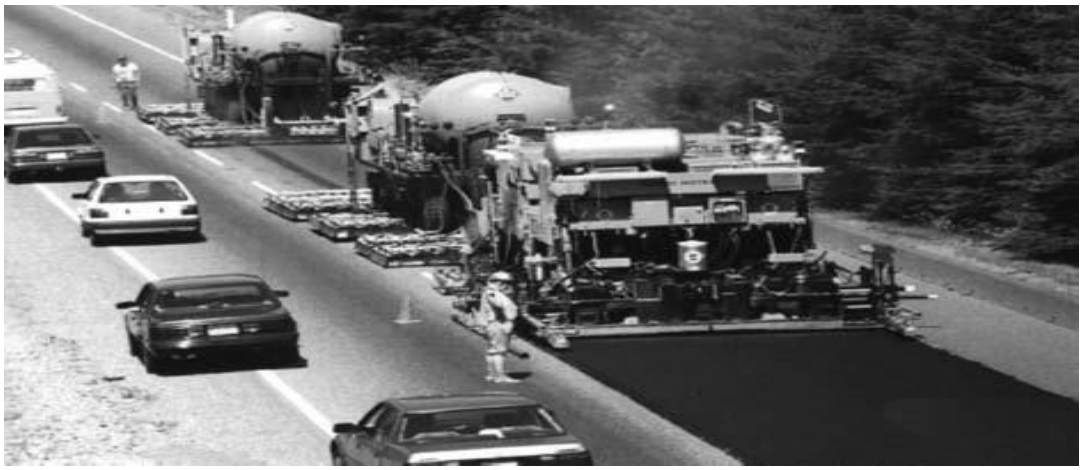
Yeniden karıştırma yöntemi; yüzeysel geri dönüşümden farklı olarak kazılan kaplamaya yeni agrega, yeni bitümlü bağlayıcı, katkı maddesi ve/veya yeni BSK eklendiği yerinde sıcak geri dönüşüm yöntemidir. Genellikle aşınma tabakalarında kullanılan bir yöntemdir ve kendi içinde tek ve çok aşamalı yöntem olarak ikiye ayrılır.

Tek aşamalı yöntemde, mevcut asfalt Şekil 2.10.'da verilen trenle kaplama ısıtılıp yumuşatıldıktan sonra kazılacak kalınlık tek seferde sıyırılır. Bu kalınlık genellikle 25 mm ile 50 mm arasındadır (ARRA, 2001).

Çok aşamalı yöntemin tek aşamalı yöntemden farklı olarak kazılması gereken kalınlığın tek seferde değil de ince tabakalar halinde kazılarak elde edilmesidir.

Genellikle iki ile dört arasında kazılan tabakalarda tatbik edilecek işlemleri rahat yapabilmek için işlem yapılan bir üst tabakadan çıkan malzeme, çalışılan kesim ortasına Şekil 2.11.'de gösterildiği gibi kümelenir. Bu yöntemle iyileştirilen kalınlık 40 mm ile 70 mm arasındadır.

Hem tek hem de çok aşamalı yeniden karıştırma yönteminde, mevcut kaplamanın özelliklerini geliştirmek veya kaplama kalınlığını arttırmak için yumuşatılan karışıma yeni agrega veya yeni BSK ilavesi yapılabilir. Çok aşamalı yöntemde, tek aşamalı yönteme nazaran daha fazla yeni malzeme ilavesi gerekli olmakla birlikte her iki yöntemde de ilave edilecek yeni malzemenin oranı %30'u geçmeyecektir. Bu nedenle yeniden karıştırma yöntemi, bu yöntemle yenilenen kaplama üzerine yeni bir BSK kaplama imalatı yapılmadığında dahi mevcut kaplama kalınlığını artırmaktadır.



Şekil 2.10. Tek aşamalı karıştırma treni (ARRA, 2001).



Şekil 2.11. Çok aşamalı karıştırma treni ile kazılan kaplama (ARRA, 2001).

Yeniden Kaplama; yüzeysel geri dönüşüm veya yerinde karıştırma yöntemiyle iyileştirilen mevcut kaplama ile yeni serilen BSK'nın birlikte sıkıştırılması esasına dayanan yerinde sıcak geri dönüşüm yöntemidir. Yeni BSK kaplamasının kalınlığı, beraber sıkıştırılacağı geri dönüştürülen karışım ile arasında termal bir segregasyon olmaması için geleneksel BSK kaplama kalınlığından daha az olabilir. Yeniden kaplama işleminde kullanılan iki ayrı karışımdan yüzeysel geri dönüşümle elde edilen karışım düzeltme tabakası olarak, yeni BSK ise aşınma tabakası olarak teşkil edilecektir. Yeni BSK aşınma tabakasının kalınlığı, karışımın ihtiva ettiği maksimum agrega büyüklüğüne bağlı olmakla birlikte 20 mm'den ince veya 75 mm'den kalın olmamalıdır. Yeniden kaplama yöntemi tek geçişli ve çok geçişli olarak iki kategori halinde sınıflandırılabilir.

Çok geçişli yöntemde ilk tabaka, yüzeysel geri dönüşüm ile hazırlanan karışım, uygun bir serici tarafından boy kesitte ve enine eğimde serilir. Hemen ardından serilen ama sıkıştırılmayan geri dönüştürülmüş bu karışım üzerine yeni BSK malzemesi serildikten sonra bu tabakalar lastik tekerlekli ve demir bandajlı titreşimli silindirler vasıtasıyla sıkıştırılır (Şekil 2.12.).



Şekil 2.12. Çok geçişli yeniden yapım uygulaması (ARRA, 2001).

Tek geçişli yöntemde ise iki üniteli tek bir araçla yeniden kaplama işlemi yapılır. Ünitelerden biri ısıtılıp yumuşatılan kaplamayı istenen kalınlığa kadar kazıyıp gerektiği kadar katkıyı ekleyip harmanlarken diğeri de bünyesine aldığı yeni BSK'yı işlemden geçip geri dönüştürülen tabaka üzerine serer (Şekil 2.13.). Tabakalara çok geçişli yöntemde kullanılan sıkıştırma metodunun aynısı uygulanır (ARRA, 2001).



Şekil 2.13. Tek geçişli yeniden yapım uygulaması (ARRA, 2001).

Yerinde sıcak geri dönüşüm yönteminin avantajları şunlardır (ARRA, 2001):

- Yenilenemeyen kaynakların korunması,
- Üretimde ısıtma işlemi olmadığı için enerjiden tasarruf sağlanması
- Yerinde iyileştirme yapıldığı için nakliye maliyetinin en aza indirilmesi,
- Geleneksel yöntemlerde çözülemeyen sorunların giderilmesi, isteğe bağlı olarak kaplamanın tüm genişliği boyunca veya tek şeritte iyileştirme imkânı
- Yüzey düzensizliklerinin ve çatlaklarının kaldırılıp tekrar serilerek düzeltilmesi,
- Yenilen kaplama sathı ile artan sürüş kalitesi,
- Tekerlek izinde oturmalar, çukurlar ve kopmaların giderilmesi,
- Kazılan kalınlığın tekrar serilerek mevcut kalınlığın muhafaza edilmesi,
- Oksidasyona uğramış bitümlü bağlayıcıya katkı maddesi eklenerek kaplamanın eski esnekliğinin sağlanması,
- Mevcut agrega gradasyonunda ve/veya bitümlü bağlayıcıda var olan sorunların, mevcut karışıma eklenecek agrega ve bitümlü bağlayıcının doğru seçilmesi ile düzeltilmesi,
- Bitümlü bağlayıcıdan ayrılan agreganın, bitümlü bağlayıcı ile tekrar karıştırılarak kaplanması,
- Sürtünmenin arttırılması,
- Boyuna derzler arasında termal segregasyonun önlemesi,
- Kaplamanın yerinde yenilenmesi nedeniyle yolun trafiğe daha az sürede açılması,
- Ekonomik tasarruf sağlanması

2.2.4 Soğuk geri dönüşüm (CR)

Soğuk geri dönüşüm, iyileştirilecek kaplamanın yüzeyini düzeltmek veya öğütmek için termal enerjiye başvurmaktan ziyade mekanik enerjinin kullanıldığı geri

dönüşüm türüdür. En yaygın soğuk geri dönüşüm ekipman türü, kaplamayı istenilen derinlikte kazımak için döner bir tambur etrafına dizilmiş dişlere sahip soğuk freze makinesidir. Genel olarak, soğuk freze makineleri tek geçişte sıcak geri dönüşüm ekipmanlarından daha fazla enerji harcamasına rağmen daha yüksek kesme kapasiteleri nedeniyle toplamda daha az enerji harcar (Donn, 2009).

Soğuk geri dönüşüm takip edilen sürece göre 2 alt kategoriye ayrılır; yerinde soğuk geri dönüşüm ve plentte soğuk geri dönüşüm (Yılmaz vd., 2011).

Yerinde soğuk geri dönüşüm, bozulmuş kaplamanın ısıtılmadan kaldırılıp çok sayıda ekipmanın kullanılarak tekrar yerine serilerek sıkıştırılmasını kapsayan bir soğuk geri dönüşüm yöntemidir. Bu yöntemde kırma-eleme ünitesi, karıştırma ünitesi ve serici ünitelerinden oluşan soğuk freze makinesi ve silindirler peşi sıra katar oluşturarak çalışmaktadır (Şekil 2.14.) (Pamuk, 1986).

Bozulmuş kaplama, geri dönüşüm makinesinin kazıcı ön tarafıyla 15 cm ile 40 cm arası bir derinlikte istenilen kalınlıkta kazılmakta ve bu şekilde öğütülen kaplama daha önceden yapılan dizayn sonucu bulunan bitüm emülsiyonu veya köpük bitüm ile karıştırılarak aynı makinanın arka kısmında tekrar yola serilip silindirler aracılığıyla sıkıştırılmaktadır. Soğuk yerinde karışımda bitüm emülsiyonu veya köpük bitüm bağlayıcı olarak kullanıldığında işlem sırasında herhangi bir ısıtma işlemine gerek duyulmamaktadır. Bağlayıcı olarak bitüm emülsiyonu kullanılması halinde, geri dönüşüm makinasının üzerine monte edilmiş bir hazneye konulan emülsiyon, dizayn sonucu bulunan oranda otomatik olarak ilave edilerek karıştırma işlemi yapılmaktadır. Bağlayıcı olarak köpük bitüm kullanılması halinde, köpük bitüm elde etmek için yüksek sıcaklıktaki bitüme yüksek basınçlı su ve hava püskürtülür ve karışıma ilave edilir (Sağlık vd,, 2013).

Yerinde soğuk geri dönüşüm sırasında çimento, sönmüş kireç, uçucu kül gibi katkı maddeleri de kullanılabilmektedir. Yerinde soğuk geri dönüşüm daha çok yüzeysel çatlaklar gibi kaplama bozukluklarının düzeltilmesi için kullanılan bir yöntemdir (Mosey ve Defoe, 1979). Geri dönüşüm süreci yerinde gerçekleştiği için nakliye maliyeti oldukça düşük olmaktadır. Geri dönüşüm süresince havanın durumundan kaynaklanan sorunlar, sıcak geri dönüşüm sürecine kıyasla neredeyse ihmal edilebilir niteliktedir (Mallick, 2005). Yerinde sıcak geri dönüşüm işlemine benzer şekilde,

kullanılan ekipmanlar hacimce büyük ve hantal olduklarından şehir içi uygulamalarda bu handikaplar göz önünde bulundurulmalı, bu ekipmanları çalıştırmak için yeterli manevra alanı olmalıdır. Ayrıca çalışılan şeridin belirli bir süre için trafiğe kapatılması gerekir, böylece yeni serilen kaplamanın kürünü alması için yeterli zaman elde edilebilir. Karışımda bağlayıcı olarak bitüm emülsiyonu kullanıldığında rutubet içeriği, karışımın gradasyon kontrolü, karıştırılması ve işlenebilirliğini etkilediği için önem arz etmektedir (Mosey ve Defoe, 1979).



Şekil 2.14. Yerinde soğuk geri dönüşüm uygulaması (Orhan, 2012a).

Plentte soğuk geri dönüşüm, asfalt geri dönüşümünün sabit bir soğuk karışım tesisinde gerçekleştirildiği süreçtir. Herhangi bir ısıtma süreci olmaması dışında plentte sıcak geri dönüşüm ile benzer uygulamaları içerir. Bu yüzden bağlayıcı olarak bitüm emülsiyonu kullanılmaktadır. Karıştırma esnasında en önemli husus karıştırma süresidir; aşırı karıştırma emülsiyonun erken kesilmesine, yetersiz karıştırma agreganın yetersiz kaplamasına sebep olmaktadır (Mallick, 2005).

Plentte soğuk geri dönüştürülen karışım hemen kullanılabildiği gibi ileride yama ve/veya çukur onarımı gibi uygulamalarda kullanılmak üzere stoklanabilmektedir. Bitüm emülsiyonları veya emülsiyon haline getirilmiş geri dönüşüm maddeleri genellikle geri dönüşüm katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Asfalt emülsiyonu veya emülsiyon haline getirilmiş geri dönüşüm maddesinin tipi, derecesi ve ekleme oranı RAP ve karışımın dizaynı sürecinde değerlendirilmektedir.

Gerektiği takdirde yeni agregalar da tesis sahasında stoklanmaktadır. Bir örneği Şekil 2.15.'te gösterilen CCPR plenti genellikle RAP ve yeni agrega için bir dizi soğuk besleme silosu, kantar, bilgisayar kontrollü sıvı geri dönüşüm katkısı sistemi, karıştırıcı hazne ve bunlara ilaveten karışımın hemen serilmesi durumunda bir nakliye kamyonu, stoklanacaksa ilaveten konveyörden oluşur. CCPR karışımı

Şekil 2.16.'da gösterildiği gibi geleneksel BSK finişerleriyle serilir, lastik tekerlekli ve demir bandajlı titreşimli silindirler vasıtasıyla da sıkıştırılır. Sıkıştırılan CCPR karışımı üzerine ise genellikle bir BSK tabakası getirilmektedir (ARRA, 2001).



Şekil 2.15. Soğuk geri dönüşüm plenti.



Şekil 2.16. CCPR Karışımının serilmesi (ARRA, 2001).

Soğuk geri dönüşümün avantajları şunlardır (ARRA, 2001):

- Yenilenemeyen kaynakların korunması,
- Üretimde ısıtma işlemi olmadığı için enerjiden tasarruf sağlanması,
- Geleneksel yöntemlerle çözülemeyen sorunların giderilmesi,
- Yüzeysel bozuklukların ve çatlakların giderilmesi,
- Tekerlek izinde oturmaların, çukurların ve kopmaların giderilmesi,
- Kaplamanın hem boyuna hem de enine doğrultuda iyileştirilmesi,
- Mevcut kaplamanın agrega gradasyonu ve/veya bitümlü bağlayıcısı ile ilgili problemler, ilave edilecek yeni agrega ve bitümlü bağlayıcının doğru seçilmesi ile düzeltilebilmesi,
- Yapısal iyileştirilmenin sağlanması ve sürüş konforunun artırılması,
- Yerinde geri dönüşüme göre trafik aksaklıkları, kullanıcı hoşnutsuzlukları azaltılarak trafik güvenliğinin sağlanması,
- Ekonomik tasarruflar sağlanması.

2.2.5 Tam derinlikli geri dönüşüm (FDR)

Tam derinlikli geri dönüşüm (FDR), esnek kaplama bölümünün tamamının, temel ve alttemel tabakalarının ise önceden belirlenmiş bir kısmının muntazam bir şekilde öğütülüp harmanlandığı bir iyileştirme tekniğidir. Daha fazla stabilizasyon, mevcut katkı maddelerinin kullanılmasıyla elde edilebilir. Tam derinlikli geri dönüşüm de tıpkı yerinde soğuk geri dönüşüm gibi ısı gerektirmeden iyileştirme yapılan yol kesimi içinde gerçekleşmektedir.

Tam derinlikli geri dönüşüm; hasarlı kaplamaların iyileştirilmesine, nakliye maliyetlerinin en aza indirilmesine, önemli yapısal iyileştirmelerin yapılmasına (özellikle temel, alttemel vb.) olanak tanıyan, atık madde problemlerini ortadan kaldıran ve sürüş kalitesini geliştiren bir geri dönüştürme yöntemidir.

Asfalt kaplamaların tam derinlemesine yeniden kazanılmasının, düşük hacimli yolların iyileştirilmesi için daha uygun maliyetli bir yöntem olduğu ve yenileme yapılan derinliğe bağlı olarak hizmet ömrünü orantılı olarak artırdığı belirlenmiştir.

Tam derinlikli geri dönüşüm sürecinde, freze makinelerinde bulunanlara benzer freze tamburlarını kullanan yol geri kazanım makinelerini kullanır. Bununla birlikte, bu geri kazanım makineleri, kaplama kısmının tamamı ile temel-alttemel malzemesinin önceden belirlenmiş bir kısmına nüfuz etmek, bunları homojen bir şekilde karışmalarını sağlamak için iyice öğütmek, karıştırmak ve ilave edilecek katkı maddelerini ölçecek şekilde tasarlanmaktadır.

Tam derinlikli geri dönüşüm işlemi genellikle 150 ila 230 mm aralığındaki derinlikler için uygulanmakla beraber nadiren 300 mm'ye kadar olan derinliklere de uygulanabilmektedir. Kaplamanın tamamı kazıldığından yeni yapılacak kaplama için yansıma çatlakların oluşma potansiyelini ortadan kaldırmaktadır (State Of New York Department Of Transportation, 2015).

Geri dönüşüm işlemi sırasında katkı maddesi katı veya sıvı halde olan kalsiyum klorür, magnezyum klorür, kireç, uçucu kül, çimento fırını tozu, kireç fırını tozu, portlant çimentosu, asfalt emülsiyonları, köpük asfalt veya bu katkı malzemelerinin bir veya birkaçı birlikte kullanılmaktadır. Kazılan kaplamanın gradasyonu düzeltilmek istenirse yeni agrega karışıma eklenebilir (Miliutenko vd., 2012).

Geri kazanım makinesi ile kaplama kalınlığının 15 cm'den daha az olduğu, stabilize edici katkı maddelerinin ve büyük geometrik düzeltmelerin gerekmediği uygulamalarda genellikle tek bir geçiş yeterli olmaktadır. Ancak bir veya daha fazla katkı maddesi eklenecekse büyük çapta profil düzeltmeleri gerekliyse yahut geri dönüştürülecek kaplama kalınlığı 15 cm'den fazla ise birden fazla geçiş gerekebilmektedir.

Standart birçok geçişli geri dönüşüm uygulamasında ilk geçiş yapıldıktan sonra geri dönüştürülen karışım serilip sıkıştırılmaktadır. Bir sonraki geçişte kazılan kaplamaya katkı maddeleri tatbik edilmekte ve karıştırma harmanında karıştırıldıktan sonra yerine serilmektedir. Birden fazla katkı maddesinin ilave edildiği uygulamalarda üçüncü bir geçiş gerekli olabilmektedir. Geri kazanılan kaplamanın sıkıştırma işlemi lastik tekerlekli ve demir bandajlı titreşimli silindirler vasıtasıyla yapılmaktadır (Oruç vd., 2017). Uygulamaya ait bir örnek Şekil 2.17.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Tam derinlikli geri dönüşüm uygulaması.

Tam derinlikli geri dönüşümün avantajları şunlardır (ARRA, 2001);

- Yenilenemeyen kaynakların korunması,
- Geleneksel iyileştirme yöntemlerine göre daha az enerji tüketimi,
- Sadece birkaç ekipman gereklidir,
- Ondülasyon, çukurlar, yamalar ve çatlakların giderilmesi,
- Temel tabakasındaki deformasyonların stabilize edilerek düzeltilmesi
- Mevcut agrega gradasyonunun yeni granüler agrega ilavesi ile düzeltilebilmesi,
- Mevcut profil ve drenaj yenilenecek şekilde temelin yeniden şekillendirilmesi,
- Katkı maddesi/maddeleri ilavesiyle kayda değer yapısal iyileştirme sağlanması,

- Geri kazanılan malzemeyi homojen hale getirip yola serilen tabakaların tek kalın bir tabaka olarak çalışmasının sağlanması,
- Temel tabakasını yeterince güçlendirdiğinden BSK tabakalarının tipi ve kalınlığı tercihinde seçimlerin esnetilmesi,
- Yerinde geri dönüşüme göre trafik aksaklıklarının ve kullanıcı hoşnutsuzluklarının azaltılarak trafik güvenliğini sağlanması,
- Ekonomik tasarruflar sağlanması.

3. LİTERATÜR ÖZETİ

Konuya yönelik yapılan çalışmalara bakılacak olursa;

Çubuk, (1990) yayınladığı makalesinde yeni materyal ile yoldan kazılan RAP malzemesini %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 oranlarında karıştırarak bitümlü temel tabakası dizaynı yapmış sonuçlarını kıyaslamıştır. Hazırladığı marshall briketlerine yaptığı pratik özgül ağırlık deneyi sonucunda genellikle, karışımda RAP miktarı arttıkça pratik özgül ağırlık değerinin arttığı, dolayısıyla hava boşluk değerinin azaldığı sonucuna varmıştır. VFA (Asfalt Dolu Boşluk) değerininse tüm karışımlar için %50- %55 arasında olduğunu belirlemiştir. Marshall briketlerine yaptığı stabilite ve akma deneyinde, stabilitelerin karışımdaki RAP miktarının artmasıyla arttığını, maksimum stabiliteyi %60 oranında RAP ihtiva eden karışımın verdiği sonucuna ulaşmıştır. Akmaların kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu belirlemiştir.

Byrne, (2005) tezinde yoldan kazınan RAP malzemesini tekrar yol yapımında kullanabilmeyi amaçlamıştır. Bu kapsamda aşınma tabakası için yeni agrega ve bitüm ile RAP malzemesini %0, %5, %10 ve %15 oranlarında kullanarak yaptığı karışımları aşağıdaki veriler açısından kıyaslamıştır. Karışımlara yaptığı indirek çekme rijitlik modülü deneyinde en uygun sonucun %10 ile %15 arasındaki RAP malzemesi içeren karışımların olduğunu saptamıştır. İndirek çekme deneyinde, RAP içeren karışımların virjin agrega ve bitüm karışımına göre daha iyi sonuç verdiğini tespit etmiştir. Marshall briketlerine yaptığı stabilite deneyinde, en yüksek stabiliteyi %10 RAP malzemesi içeren karışımda elde etmiş, akma değerinin karışımdaki RAP malzemesi ile orantılı arttığını saptamıştır. RAP malzemesi oranı arttıkça hava boşluğu ve VMA değerinin azaldığını, karışım yoğunluğunun arttığını tespit etmiştir. Son olarak karışımlara yaptığı tekerlek izi deneyinde, tekerlek izi derinliği ve oranının karışımdaki RAP oranının arttıkça arttığı sonucuna ulaşmıştır

Konuya yönelik yapılan başka bir çalışma da Daniel ve Lachance, (2005) tarafından yayınlanan makaledir. Bu çalışmada işlemden geçirilmiş ve geçirilmemiş RAP malzemesinin her ikisini de ayrı ayrı yeni materyal ile %0, %15, %25 ve %40 oranlarında karıştırarak Superpave yöntemi karışım dizaynı yapmıştır. İşlenmiş RAP karışımlarında VMA (Agregalar Arası Boşluk) ve VFA değerlerini, %25 ve %40

RAP içeren karışımlarda %0 ve %15 RAP karışımlarına göre daha yüksek olduğunu bulmuştur. İşlenmemiş RAP karışımlarında VMA değerinin artan her RAP içeriği için arttığını, VFA değerinin ise her RAP içeriği için yeni materyalle oluşturulan kontrol karışımdan büyük olduğunu tespit etmiştir. Hem işlenmiş hem de işlenmemiş her RAP karışımı için bulunan optimum bitüm içeriğinin, kontrol karışımının optimum bitüm içeriğinden yüksek olduğunu belirlemiştir.

Mogawer, (2007) bir çalışmasında yeni agrega ve PG 64-28, PG 58-34, PG 52-33 ve PG 52-33 (toplam bitümün %1,5'u oranında latex) performans sınıf bitüm ile RAP (maksimum dane boyutu 4,75 mm) malzemesini %0, %15, %30 ve %50 oranlarında ayrı ayrı ve tüm karışımlar için karışım içerisindeki toplam bağlayıcı miktarının %1,5'u kadar sasobit marka katkı maddesini karıştırarak superpave yöntemi ile aşınma tabakası dizaynı yapmıştır. PG 52-33 performans sınıfına getirdiği bitüm ile yaptığı superpave dizaynında %15 RAP ihtiva eden karışımın VMA (%16,5) ve VFA (%77,8) değeri, PG 52-33 (%1,5 latex ilaveli) performans sınıfına getirdiği bitüm ile yaptığı dizaynda %30 RAP ihtiva eden karışımın VMA (%17,5) ve VFA (74,9) değerinin, PG 64-28 performans sınıfına getirdiği bitüm ile yaptığı dizaynda %30 ihtiva eden karışımın VMA (%17,7) ve VFA (%77,4) değeri ile %50 RAP ihtiva eden VMA (%16,5) ve VFA (%75) değeri, PG 58-34 performans sınıfına getirdiği bitüm ile yaptığı dizaynda, %30 oranında RAP ihtiva eden karışımın VMA (%17,5) ve VFA (74,9) değerinin superpave şartnamesinin VMA (%16-18) ve VFA (%65-78) değerini sağladığını tespit etmiştir.

Güngör vd., (2008) bir çalışmasında; Karayolları Genel Müdürlüğünün, İstanbul' u Ankara' ya bağlayan O-4 otoyolunun "Sakarya Köprülü Kavşağı - Gümüşova arasında aşınma tabakasından elde ettiği RAP malzemesi ile binder ve bitümlü temel dizaynı yapmıştır. RAP malzemesini bitümlü temel dizaynında %20, binder dizaynında ise %10 oranında kullanmış, her iki dizaynda da karışıma giren eski ve yeni bitüm karışımının penetrasyonu, 50/70 penetrasyon sınıfını sağladığı için karışıma gençleştirici katkı ilavesine gerek duymamıştır. Yapılan her iki marshall dizaynında boşluk yüzdesi, optimum bitüm içeriği yüzdesi, agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), asfalt dolu boşluk yüzdesi (VFA), akma ve stabilite değerleri KTŞ'nin ilgili kısımlarındaki limitleri sağladığını tespit etmiştir.

Mazlum, (2014) tezinde yoldan kazılan RAP malzemesini %0, %10, %25, %40 oranlarında yeni materyal ile karıştırarak binder tabakasında kullanmak üzere marshall dizaynı yapmıştır. Yaptığı dizayn sonucunda, tüm RAP malzemeli karışımların KTŞ'nin minimum (750 kg) stabilite değerini sağladığını belirlemekle birlikte artan her RAP içeriği için stabilite değerinin düştüğünü tespit etmiştir. Tüm karışımlarda akma değeri şartname limitleri içerisinde kalmakla birlikte kontrol karışımının akma değeri diğerlerinkinden yüksek olduğunu saptamıştır. Tüm karışımların VFA ve VMA değerlerinin şartname limitlerini sağladığını ancak %10 RAP'lı karışımın VMA değerinin %13 sınırına yakın olduğunu belirlemiştir. Pratik yoğunluk değerleri artan her RAP içeriği azaldığını, tüm karışımlardaki boşluk değerinin şartname limitini sağladığını tespit etmiştir.

Izaks vd., (2015) çalışmasında, yeni materyal ile hazırladığı marshall dizaynı ile yoldaki mevcut BSK kaplamaların sadece aşınma tabakasını kazınması sonucu elde edilen RAP (A7) malzemesinin %30 ve %50 oranlarında yeni materyal ile karıştırarak hazırladığı marshall dizaynı ve mevcut BSK tabakalarının tam derinlikli kazınması sonucu elde edilen RAP (A6) malzemesinin %30 oranında yeni materyal ile karıştırarak hazırladığı marshall dizaynı ve bazı parametreler açısından kıyaslamıştır. Marshal dizaynı sonucu bulduğu optimum bitüm, yeni materyal ile hazırladığı dizaynda en yüksek olup A6 karışımında en az, A7 karışımınlarında ise RAP oranı arttıkça optimum bitüm oranının arttığını sonucuna ulaşmıştır. Hava boşluğu yüzdesi A6 karışımında (%6,8) şartname limitini aştığını (%2,5- %6,5), diğer karışımların şartname limitini sağladığını belirlemiştir. Tüm karışımların VMA ve VFA değerlerinin şartname değerini sağladığını saptamıştır. Stabilite ve akma değerleri açısından tüm karışımların şartname değerlerini (min. 10 kN, 1-4 mm) sağladığı sonucuna ulaşmakla birlikte en yüksek stabilite değerini A7 RAP %50 karışımında, en düşüğünü ise A7 RAP %30 karışımında elde edildiğini tespit etmiştir. Karışımlara yaptığı tekerlek izinde oturma deneyinde, 1000 döngü açısından, en iyi tekerlek izi performansını A6 karışımı, en kötü performansı ise yeni materyalle hazırlanan karışımının verdiği sonucuna ulaşmıştır. Yine karışımlara yaptığı yorulma testinde, yeni materyal ve %30 oranındaki RAP malzemeli karışımlara kıyasla en kötü performansı A7 RAP %50 karışımının verdiğini, yeni bitüm kullanımının yorulma direncini artıracağını belirlemiştir. Son olarak karışımlara yaptığı esneklik testinde her iki türde elde edilen RAP malzemelerinin

%30 oranındaki karışımları, yeni bitümle yapılan karışıma göre daha düşük esneklik gösterdiğini ve A7 RAP %50 karışımının en düşük esnekliğe sahip olduğunu saptamıştır.

Al-Ali, (2016) yüksek lisans tezinde, yeni materyal ile yoldan kaldırılan RAP malzemesini %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45 ve %50 oranlarında karıştırarak marshall dizaynı, RAP malzemesinin %25 oranlarına kadar ki karışımlara ITS deneyi yapmış elde ettiği sonuçları kıyaslamıştır. Ekstraksiyon deneyi sonucu elde ettiği eski bitüm ile yeni bitümü yukarıdaki oranlarla karıştırarak hazırladığı numunelere penetrasyon deneyi yapmış, %25 oranında ve %25 oranına kadar RAP ihtiva eden karışımlar 50/70 penetrasyon sınıfını sağlarken %25 oranından fazla RAP malzemesi ihtiva eden karışımlar 50/70 penetrasyon sınıfının altında kaldığı sonucuna ulaşmıştır. Bu sonuçlara göre %30'dan az RAP malzemesi ihtiva eden karışımların TS EN 12591 standardını sağladığını tespit etmiştir. Yine aynı şekilde elde ettiği numunelere yaptığı yumuşama noktası deneyinde %10 ve %15 RAP malzemesi ihtiva eden numunelerin TS EN 12591 standardını sağladığını belirlemiştir. Yaptığı Marshall dizaynında RAP ilave eden (%15 hariç) karışımların Dp değerlerinin yeni materyale göre hazırladığı karışımın Dp değerinden fazla olduğu sonucuna varmıştır. Karışımların teorik özgül ağırlık (Dt) değerlerini kıyasladığında; yeni materyal ile yaptığı karışım en yüksek olmak üzere, karışım içerisindeki RAP içeriği arttıkça Dt değerinin kademeli olarak düştüğü sonucunu elde etmiştir. Karışımlar içerisinde en fazla boşluk yüzdesine sahip yeni materyal ile hazırlanan karışım olduğunu elde etmiş, KTŞ aşınma tabakası dizaynı için belirtilen hava boşluğu limitini (%3-%5) sadece %2,41 değeri ile %45 RAP malzemesi ihtiva eden karışımın sağlamadığını belirlemiştir. Tüm karışımların VMA değerlerinin şartnamede istenen (%14-%16) aralığı sağladığını tespit etmiştir. VFA değeri açışından, yeni materyal ile hazırlanan karışım ile %5 ve %15 oranında RAP ihtiva eden karışımların VFA değerinin şartnamede istenen aralığa (%65-%75) girdiğini belirlemiş. Diğer RAP içeriğine sahip karışımların VFA değerlerinin şartnamenin maksimum değerini geçtiğini belirlemekle birlikte %5 RAP ihtiva eden karışımın VFA (%74,54) değerinin şartnamenin üst sınırına çok yakın olduğunu tespit etmiştir. Stabilite ve akmalar açısından, her karışımın akma değerinin, şartnamede istenen aralığa (2-4mm) girdiğini belirlemiştir. Her karışımın stabilite değerinin şartnamede istenen minimum (900 kg) değerini sağladığını, en düşük stabiliteyi (970 kg) yeni

materyalle hazırlanan karışımın verdiği sonucunu elde etmiştir. Son olarak %25 ve %25 oranına kadar RAP ihtiva karışımlara yaptığı ITS deneyinde tüm karışım numunelerinin ITS oranı, minimum %80 olan şartname kriterini sağladığı sonucuna ulaşmıştır.

Oruç vd., (2017) yaptığı bir makalesinde binder tabakasının geri dönüşümünü incelemiştir. Bu amaçla binder dizaynı için yeni agrega ve bitüm ile RAP malzemesini %0, %10, %25 ve %40 oranlarında karıştırarak marshall dizaynı yapmış ve aşağıdaki sonuçları elde etmiştir. Marshall briketlerinin VMA ve VFA değerleri üzerine yaptığı bir değerlendirmede farklı karışımların hepsinin KTŞ'de binder tabakası dizaynı için belirtilen değerleri sağladığını saptamıştır. Karışıma katılan RAP içeriği ile birlikte genel olarak hava boşluğunun arttığını ancak şartname sınırları içinde kaldığını ve buna paralel olarak karışımda artan her RAP içeriği için karışımın pratik yoğunluk (Dp) değerinin düştüğünü belirlemiştir. Marshall briketlerine yaptığı stabilite deneyinde karışımdaki RAP miktarının artmasıyla stabilite değerinin düştüğünü tespit etmiştir. Ayrıca stabilite deneyinde bulunan akma değeri ile hesap ettiği marshall oranının %10 RAP içerikli karışımda en yüksek olduğunu saptamıştır. %10 RAP karışımından sonra artan her RAP içeriğinden bu değer düşmüş ancak %40 RAP içeren karışımınkinde dahi RAP ihtiva etmeyen karışıma göre daha yüksek çıktığını belirlemiştir.

Tığdemir ve Dhanoon, (2017) çalışmasında yoldan alınan RAP malzemesini %0, %7, %14, %21, %28 oranlarında, 5 farklı gradasyon verecek şekilde yeni materyal ile karıştırarak marshall dizaynı yapılmıştır. Marshall briketlerine yaptığı stabilite ve akma deneyinde, uygun gradasyon ve bitüm içeriğinde karışım içerisinde RAP malzemesinin artması halinde dahi stabilite değerlerinin arttığı sonucuna ulaşmış ve tüm RAP ilaveli karışımların stabilite ve akma değerlerinin Irak Şartnamesini sağladığını belirtmiştir. Ayrıca kontrol ve RAP ilaveli karışımlara yaptığı indirek çekme mukavemeti (ITS) deneyinde tüm karışımların şartname değerini (min. %80) sağladığını tespit etmiştir.

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1 Malzeme

Bu tez çalışmasında RAP malzemesi olarak, Konya-Ankara Devlet Yolu Km:4+000-40+000 arası mevcut aşınma tabakasında tekerlek izinde oturmaların bulunduğu kesimlerin freze makinesi ile kazılmasıyla elde edilen asfalt malzemesi kullanılmıştır.

Elde edilen bu RAP malzemesi 9,5 mm (3/8 inc) elekten elenmiş, elekten geçen malzeme belirlenen gradasyonu verecek şekilde hazırlanan yeni agrega ve ihtiyaca yönelik ilave edilecek yeni bitüm ile karıştırılarak Marshall Dizaynı deneylerinde kullanılmıştır. Asfalt betonu aşınma tabakası için Çizelge 4.1.'de verilen KTŞ Kısım 407'da belirtilen Tip-1 aşınma tabakası için gradasyon limitlerine uyulmuştur.

Çizelge 4.1. KTŞ Tip-1 aşınma tabakası için gradasyon limitleri.

Elek Boyu mm (inç, No)	**TİP-1**
19 (3/4")	100
12,5 (1/2")	88 - 100
9,5 (3/8")	72 - 90
6,0 (1/4")	-
4,75 (No.4)	42 - 52
2,00 (No.10)	25 - 35
0,425 (No.40)	10 - 20
0,180 (No.80)	7 - 14
0,075 (No.200)	3 - 8

KTŞ Kısım 407'de aşınma tabakası dizaynında kullanılacak agregaya ait olması gereken fiziksel özellikler; kaba ve ince agrega olarak ayrı ayrı istenmektedir. Kaba agregada aranacak fiziksel ve mekaniksel özellikler Çizelge 4.2.'de, ince agregada aranacak fiziksel ve mekaniksel özellikler Çizelge 4.3.'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.2. KTŞ-2013 kaba agreganın mekanik ve fiziksel özellikleri.

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
	Aşınma	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), %Kayıp	≤ 27 (LA27)	TSEN 1097-2 [a] (AASHTO T 96)
Aşınma Direnci (Micro Deval)b, %Kayıp	≤ 20 (MDE 20)	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO4 ile kayıp), %	16 (MS16)	TS EN 1367-2
Kırılmışlık, ağırlıkça % (Tüm yüzeyi kırılmış – tüm yüzeyi yuvarlak)	≥ 95 - ≤ 0 (C95/0)	TS EN 933-5
Yassılık İndeksi, %	≤ 25	BS 812
	≤ 20 (FI20)	TS EN 933-9[a]
Cilalanma Değeri, %	≥ 50 (PSV50)	TS EN 1097-8
Su Emme, %	≤ 2,0 (WA242,0)	TS EN 1097-6
Soyulma Mukavemeti, %Bitümle Kaplı Yüzey (24 saat 60 °C suda bekletmeden sonra)	≥ 60	TS EN 12697-11 Kısım 403 EK-A)
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, %	≤ 0,3	ASTM C 142 AASHTO T 112
a Referans metot. b Gerek görüldüğünde yapılacaktır. c Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043 'deki sınıfını gösterir.		

Çizelge 4.3. KTŞ-2013 ince agreganın özellikleri.

Deney Adı		Şartname Limitleri	Deney Standardı
		Aşınma	
Plastisite İndeksi %		NP	TS 1900-1
Organik Madde, (%3 NaOH ile)		Negatif	TS EN 1744-1 Madde 15.1
Su Emme, %		≤ 2,0 (WA_{24} 2,0)	TS EN 1097-6
Metilen Mavisi, g/kg	İnce agreganın 0/2 mm kısmına	≤ 1,5 ($MB_{1,5}$) ≤ 3,0 ($MB_{3,0}$)*	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik TS EN 933-9 agreganın 0/2mm kısmına	≤ 3,0 ($MB_{3,0}$)*	
* Magmatik kökenli kayaçlarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanamaması durumunda bu şart aranacaktır.			

Ayrıca KTŞ'ye göre aşınma tabakasının agrega gradasyonu kaba, ince agrega ile mineral fillerden oluşacaktır. Karışıma girecek mineral filler taş ve mermer tozu, sönmüş kireç veya benzer malzemelerden oluştuğu gibi içerisinde kil, toprak, organik madde ve zararlı madde içermeyecektir. Mineral filler Çizelge 4.4.'te verilen gradasyon limitlerini sağlamalıdır.

Çizelge 4.4. KTŞ-2013 mineral fillerin gradasyon limitleri.

Elek Boyu mm (No)	Ağırlıkça %Geçen
0,425 (No.40)	100
0,075 (No.200)	70 - 100

Aşınma tabakası imalatında kullanılacak 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm, Çizelge 4.5.'te verilen şartları sağlamalıdır.

Çizelge 4.5. KTŞ-2013 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm özellikleri.

Sıra No	Deney Adı	Standardı	50/70 Bitüm Sınıfı
1	Penetrasyon, (25 ^{0}C) 0,1 mm	TS EN 1426	50-70
2	Yumuşama Noktası, ^{0}C	TS EN 1427	46-54
3	Fraass Kırılma Noktası[a], ^{0}C	TS EN 12593	≤ -8
4	Yaşlanmaya Karşı Dayanım[b]	TS EN 12607-1	
4.1	Kütle Değişimi, %		≤ 0,5
4.2	Kalıcı Penetrasyon, %	TS EN 1426	≥ 50
4.3	Yumuşama Noktası Yükselmesi, %	TS EN 1427	≤ 9
5	Parlama Noktası, ^{0}C	TS EN ISO 2592	≥ 230
6	Çözünürlük, %	TS EN 12592	≥ 99
7	Parafin Mumu İçeriği[c], %	TS EN 12606-1	≤ 2,2
		TS EN 12606-2	≤ 4,5

a Soğuk bölgelerde kullanılacak bitüme yapılacaktır.
b Kalite kontrol amaçlı bu deney için TS EN 12607-2 (TFOT) deney standardı kullanılabilecektir.
c Gerek Duyulduğunda yapılacaktır.

Konya-Ankara Devlet Yolu mevcut aşınma tabakasının imalatında, Karayolları 3.Bölge Müdürlüğü adına ruhsatlı Konya-Ankara Devlet Yolu üzerinde bulunan Karaömerler Taşocağından temin edilen agrega ile 50/70 penetrasyonlu bitüm

kullanılmıştır. Mevcut aşınma tabakasının Marshall Dizayn raporunda, karışımda kullanılan agrega ile 50/70 özellikte bitüme ait deney sonuçları Çizelge 4.6.'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Mevcut aşınma tabakasındaki agrega ve bitümün özellikleri.

Ocak Adı		Karaömerler		
Kayanın Cinsi		Kalker		
Deneyler	Kaba Agrega	İnce Agrega	Filler	Deney Standardı
Hacim Özgül Ağırlığı	2,703	2,707		TS EN 1097-6
Zahiri Özgül Ağırlığı	2,717	2,726	2,679	TS EN 1097-6
Absorpsiyonu %	0,3	0,3		TS EN 1097-6
Mg_2SO_4 Donma Kaybı, %			3,2	TS EN 1367-2
Metilen Mavisi,			0,5	TS EN 933-9
Los Angeles Parçalanma Direnci, %			21,8	TS EN 1097-2
Yassılık İndeksi, %			16,7	BS 812
Soyulma Mukavemeti (%0,1 Katkılı)			80-85	KTŞ Kısım 403 Ek-A
Bitüm Özgül Ağırlığı			1,023	TSEN 15326+A1
Bitüm Penetrasyonu, dmm			64	TS EN 1426
Bitüm Parlama Noktası 'C			320	TS EN 2592
Yumuşama Noktası, ^oC			52	TS EN 1427
İmalatta Kullanılacak Bitümlü Bağlayıcı			Rafinerisi	Kırıkkale
			Tipi	Bitüm
			Sınıfı	50/70

Yapılacak marshall dizaynı çalışmalarında kullanılacak olan yeni agrega, Ermenek-Mut Yolu üzerinde Karayolları 3.Bölge Müdürlüğü adına ruhsatlı Semerkaya Taşocağından elde edilmiş, bitüm ise 50/70 penetrasyonlu Kırıkkale Rafinesine ait Karayolları 3.Bölge Müdürlüğü Pınarbaşı Tesislerinden temin edilmiştir.

Geri kazanımdan elde edilen bitümün özelliklerinin iyileştirilmesi halinde kullanılacak gençleştirici katkı maddesine ait özellikler Çizelge 4.7.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. VIATOP® plus RC maddesinin granül özellikleri.

Özellikler	Birim
Gençleştirici miktarı	% 50
Ortalama pelet uzunluğu	5-15 mm
Ortalama palet kalınlığı	3-5 mm
Genel yoğunluk (DIN EN ISO 60 standardına uygun)	400-500 g/L
Elek analizi: 2 mm den daha ince maks.	%8

4.1.1 Cihazlar

Bu çalışma konusuna esas teşkil edecek deneysel çalışmalar için numunelerin hazırlanması, çalışma için gereken tüm deneylerin gerçekleştirilmesinde Karayolları 3.Bölge Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Başmühendisliği Laboratuvarında bulunan bölgeçler, elek analizi aleti setleri, yassılık şablonu, teraziler, etüvler, kronometreler, termometreler, asfalt analizatörü, bitüm geri kazanım evaporatörü, su banyoları, beherler, penetrasyon cihazı, penetrasyon kapları, yumuşama noktası tayini cihazı, parlama noktası tayini cihazı, erlen, kiriş eğilme reometresi (BBR) cihazı, dinamik kesme reometresi (DSR) cihazı, basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), vakum kabı, dönmeli ince film etüvü (RTFO) desikatörler, piknometreler, vakum pompası, arşiment havuzu, Marshall tokmakları, Marshall numunesi kalıpları, sıcak karışım mikserleri, Marshall stabilte cihazı, derin dondurucu, indirek çekme mukaveti cihazı, tekerlek izi numune hazırlama için yoğumalı sıkıştırıcı, Hamburg tipi tekerlek izi cihazı ve sarf malzemeleri kullanılmıştır.

4.2 Yöntem

Bu tez çalışması, eski-yeni bitüm karışımının şartnamede istenen değerleri sağlayıp sağlamadığı, sağlamadığı halde karışıma ne kadar gençleştirici katkı katılması gerektiği ve performanslarına yönelik yapılan penetrasyon, yumuşama noktası tayini, BBR, DSR ile RAP malzemesinin aşınma tabakasında kullanılabilirliğinin tespiti için tüm karışımlara Marshall dizaynı, ITS deneyi, TİO (Tekerlek İzinde Oturma) deneyi, yöntemlerini içermektedir.

4.2.1 RAP malzemesinin agrega ve bitüm özelliklerinin belirlenmesi

Şekil 4.1.'de gösterilen RAP malzemesindeki bitüm ile agreganın içerik ve özelliklerini belirlemek için RAP numunesine İnfiratest marka asfalt analizatörüyle ekstraksiyon yapılmıştır. Çalışmalarda kullanılacak (d_{max}:9,5 mm) RAP malzemesinden anlamlı bir sonuç elde etmek maksadıyla eldeki RAP malzemesi homojen şekilde karıştırılıp harmanlanmış ve bölgeçten bölünerek deney numunesi elde edilmiştir. Bu şekilde hazırlanan 8 farklı 3500 g ağılığındaki RAP numunesi, 30 dk boyunca 120°C'deki etüvde ısıtılmıştır. Böylece yumuşayan RAP numuneleri Şekil 4.2.'de gösterilen analizatör haznesine yerleştirilmiş ve 1 saat sonra agrega ile bitüm birbirlerinden ayrılmıştır.



Şekil 4.1. RAP malzemesi.



Şekil 4.2. İnfiratest marka asfalt analizatörü.

4.2.1.1 RAP agregalarının gradasyonunun belirlenmesi

Ekstraksiyon deneyi sonucunda bitümden ayrılan agrega, içerisindeki kalan muhtemel trikoleretileni uzaklaştırmak için 110±5 ^{0}C'de karalı etüvde sabit ağırlığa gelinceye dek kurutulmuştur. Kurutulan agreganın sıcaklığı laboratuvar sıcaklığına gelene kadar laboratuvarda bekletilmiş ve ardından agreganın tamamının geçtiği son elek olan 3/8" kare açıklıklı elekten başlanarak sırasıyla No.4, No.10, No.40, No.80 ve No.200 elekten elenmiştir (Şekil 4.3.). Eleme işlemi bittikten sonra her elek üzerinde kalan agrega miktarı tartılmış ve her elek üzerinde kalan miktar kümülatif olarak hesaplandıktan sonra eleklerden geçen yüzdeler bulunmuştur.



Şekil 4.3. Elek analizi.

4.2.1.2 RAP malzemesinin bitüm içeriği ve özelliklerinin belirlenmesi

Analizatörde ayrılan agregaya elek analizi işlemi yapıldıktan sonra bitüm haznesinde biriken trikloretilen+bitüm karışımından trikloretileni uzaklaştırmak amacı ile heidolph marka evaporatör cihazı ile damıtma işlemi yapılmıştır (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Heidolph marka evaporatör cihazı.

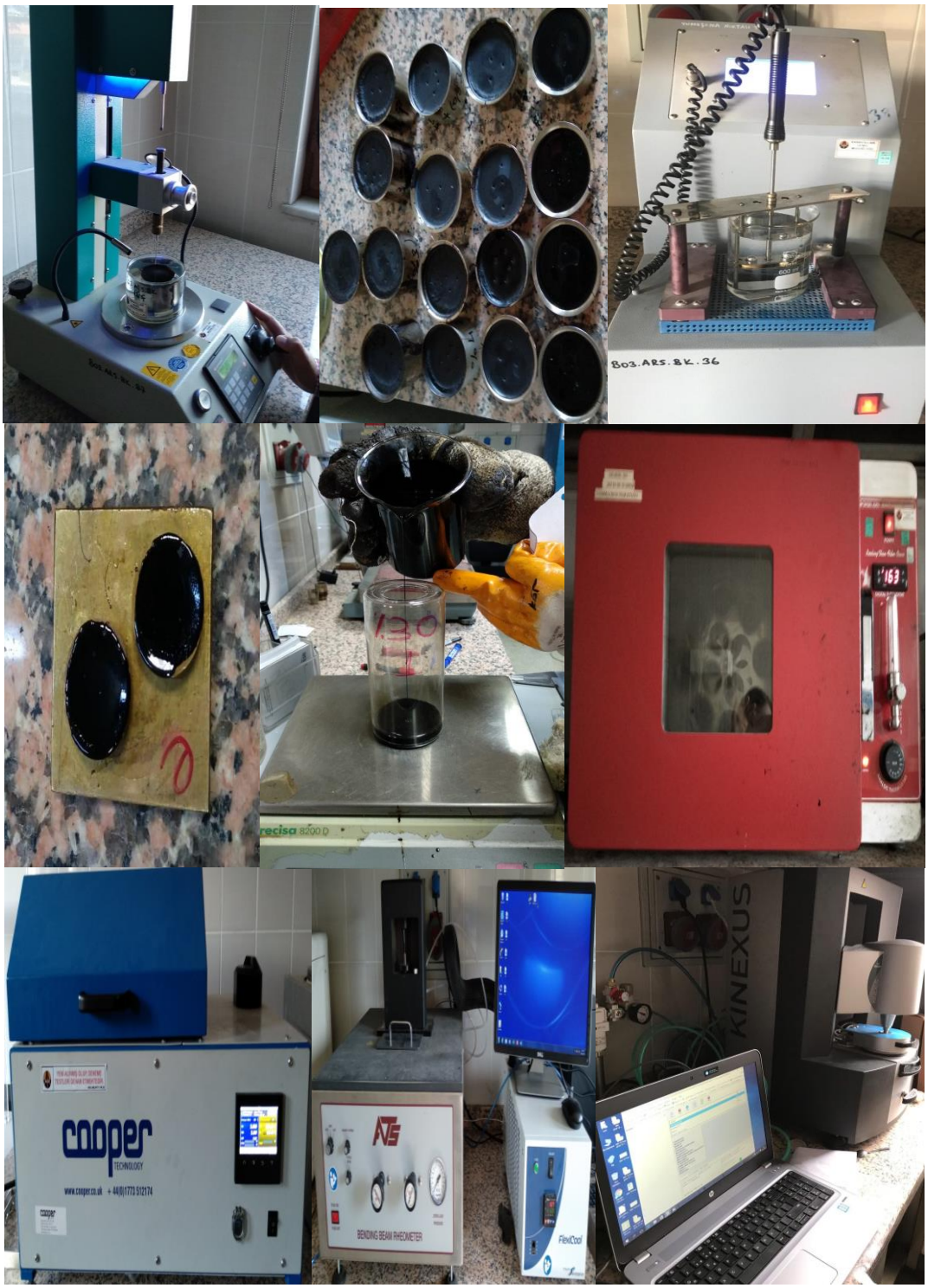
Damıtma işlemi sonucunda elde edilen geri dönüşüm bitümün özelliklerini belirlemek amacı ile bitüm numunesine penetrasyon, yumuşama noktası ve bitüm özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.

4.2.2 Çalışmalarda kullanılacak yeni agrega özelliklerinin belirlenmesi

Hem RAP malzemesiyle birlikte kullanılması hem de RAP malzemeli karışımlarla mukayese edilmesi amacıyla yeni agrega ve yeni bitümle yapılacak karışım için virjin agrega özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapılan parçalanma direnci (Los Angeles yöntemi), hava tesirlerine karşı dayanıklılığın belirlenmesi (magnezyum sülfat yöntemi), yassılık indeksi, kil topakları ve ufalanabilir danelerin içeriğinin belirlenmesi ve metilen mavisi değerinin belirlenmesi için deneyler yapılmıştır.

4.2.3 Çalışmalarda kullanılacak bitümlerin özelliklerinin belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında yeni materyal ile RAP malzemesinin %0, %15, %25, %30 oranında karıştırılarak hazırlanacak karışımdaki bitümlerin özelliklerini belirlemek amacıyla yeni bitüm, %15 eski+ %85 yeni bitüm karışımı, %25 eski + %75 yeni bitüm karışımı, %30 eski + %70 yeni bitüm karışımına penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık deneyleri yapılmış ayrıca bu bitüm numuneleri ilkin RTFO'da, RTFO'dan çıktıktan sonra PAV'de koşullandırılmıştır. Koşullandırılan numunelere BBR ve DSR deneyleri yapılmıştır (Şekil 4.5.). Ayrıca geri kazanılan bitüm ile yeni bitüm karışımlarının penetrasyonu ve yumuşama noktaları TS EN 13108-1, (2016) standardına göre hesap edilmiş ve aynı oranlardaki bitümler laboratuvarda oluşturularak penetrasyon ve yumuşama noktası tayini deneyi yapılarak hesaplamalar teyit edilmiştir.



Şekil 4.5. Bitümlere yapılan deneyler

4.2.4 Marshall dizaynları

RAP malzemesinin aşınma tabakasında tekrar kullanılıp kullanılamayacağına yönelik KTŞ açısından istenen kıstasları sağlanabilirliğinin tespiti için yeni materyal ile RAP

malzemesi %0, %15, %25, %30 oranlarında karıştırılmış ve Marshall dizaynı hazırlanmıştır.

4.2.4.1 Karışım gradasyonu

Karışımlara yapılacak Marshall dizaynlarından hem anlamlı bir sonuç elde etmek hem de farklı oranda RAP içeren karışımları hem birbirleriyle hem de yeni materyalle yapılan karışım ile kıyaslamak için dizayn gradasyonu sabit tutulmuştur. RAP malzemesinden gelen agrega gradasyonu sabit olduğundan, karışıma dahil edilecek yeni agrega, RAP oranı değişen her karışıma sabit tutulan dizayn gradasyonunu sağlayacak şekilde karışıma alınmıştır.

4.2.4.2 Dizayn agregalarının özgül ağırlık ve absorbsiyonlarının belirlenmesi

Marshall dizaynı verilerinin hesaplanması için dizayn gradasyonunu oluşturan agregaların hacim özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık ile absorpsiyonları ve agrega bitüm karışımının efektif özgül ağırlığının tespit edilmesi gerekmektedir. Agregaların hacim ve zahiri özgül ağırlığı ile absorpsiyonu; kaba ve ince agregaya ayrı ayrı deney yapılarak bulunur (Şekil 4.6.).



Şekil 4.6. Özgül ağırlık deneyleri.

Kaba agregalarının özgül ağırlık ve absorbsiyonlarının belirlenmesi

Ekstraksiyon sonucu elde edilen agregalar ile yeni agregaların, 4,75 mm kare açıklıklı elek üzerinde kalan kısımları dizayn gradasyonununa katıldıkları oranda ve her fraksiyon numunesinin de dizayn gradasyonunda temsil edildiği orandaki kadar agrega numunesi 0,075 mm kare açıklıklı elekten yıkanmış ve ardından sabit ağılığa gelinceye kadar 110±5 ^{0}C'de karalı etüvde kurutulmuştur.

Deneye alınacak kaba agrega karışımının oluşturulmasından sonra agrega, 22 ± 3 ^{0}C'deki saf suyla dolu 2500 mL hacime sahip piknometre içerisine alınmıştır. İçerisindeki hapsolmuş hava vakum yapılarak çıkarılarak piknometre aynı sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat boyunca bekletilmiş, bu süre sonunda havuzdan alınan piknometre üzerine takılan cam huninin ortasındaki çizgiye kadar yine 22 ± 3 ^{0}C'deki saf suyla doldurulmuş ve piknometre yüzeyleri silinerek kurulanmış ve ardından tartılmıştır. Bu işlemden sonra piknometre içerisindeki agreganın suyu süzülmesi için kuruma bırakılmış, piknometre ise tekrar 22 ± 3 ^{0}C'deki saf suyla yine huni ortasındaki çizgiye kadar doldurulmuş, silinerek kurulanmış ve ardından tekrar tartılmıştır. Fazla suyu süzülen agrega temiz ve kuru bir havlu üzerine alınarak agrega üzerinde su filmleri giderilmiş ve agregalar bu halde tartılmıştır. Daha sonra agregalar 110 ± 5 ^{0}C kararlılıktaki etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulmuş ve tekrar tartılmış böylece deney sonlandırılmıştır. Deneyden daha sağlıklı sonuç elde etmek için ikiz numuneye özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.

İnce agregalarının özgül ağırlık ve absorbsiyonlarının belirlenmesi

İnce agregaların özgül ağırlık ve absorbsiyonlarının belirlenmesi için 4,75 mm kare açıklıklı elekten geçen agregalar fraksiyonlarına ayrılmıştır.

İnce agrega özgül ağırlığı deney metodoloji, kaba agrega özgül ağırlığın bulunması metodolojisiyle aynıdır. Ancak ince agreganın özgül ağırlık deneyinde balon joje kullanıldığından vakum pompası ile vakum yapılmamış yerine balon joje el yordamı ile yuvarlanmış ve titreşim uygulama suretiyle hapsolmuş hava giderilmiştir. Kaba agreganın özgül ağırlığının belirlenmesi yönteminden farklı olan bir diğer husus doygun ve yüzeyi kuru ağırlığın elde edilmesi için agrega yüzeyindeki fazlalık suyun kurutma işlemi havlu ile değil, tepsi içerisine eş ve ince bir tabaka halinde yayılan ince agregaya hafif sıcak bir hava dalgası ile giderilmiş olmasıdır. Yüzey

kuruluğunun sağlanıp sağlanamadığı Abraham hunisi yöntemi ile tespit edilmiştir. Geniş ağzı tepsi tabanına gelecek şekilde yerleştirilen huniye ince agrega numunesi kendi ağılığı ile doldurulmuş ardından Abraham tokmağı ile 25 defa serbest düşüş yapacak şekilde bırakılmıştır. Bu işlemden sonra Abraham huni kaldırılmış, ortaya çıkan numune kendi ağırlığında çökene kadar kurutma ve huni işlemine devam edilmiştir.

Filler zahiri özgül ağırlıklarının belirlenmesi

Agrega karışımının özgül ağılıklarının hesap edilebilmesi için karışıma girecek fillerin de zahiri özgül ağırlığının bulunması gerekmektedir. Yeni agrega ve RAP malzemesinde gradasyondaki oranına göre 50 gr numune alınmıştır. Bu numune daha önce tartılmış 250 mL hacme sahip piknometreye alınmış üzerine 22 ± 3 ^{0}C'deki saf su ilave edilmiştir. Filler içerisinde hapsolan hava vakum yapılarak alınmış ve ardından piknometreye 22 ± 3 ^{0}C'deki saf su doldurularak 24 saat boyunca 22 ± 3 ^{0}C kararlılıktaki kum banyosunda kalmıştır. Bu sürenin sonunda piknometre ağzına kadar aynı sıcaklıktaki saf su ile doldurulmuş ve piknometre kapağı takılmıştır. Kapak takılması sonucu taşan su piknometre üzerinden silinmiş ve piknometre tartılmıştır.

Teorik ve efektif özgül ağırlıklarının belirlenmesi

Karışım gradasyonuna göre hazırlanan 1150 g agrega ile bu agrega ağırlığının % 4,75 ve % 5,00'i oranında bitüm ile karıştırarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunesi laboratuvar sıcaklığına soğuduktan sonra daha önce boş ağırlığı ve 22 ± 3 ^{0}C'deki saf su ile dolu hali tartılmış piknometrenin içine yerleştirilmiş ve tartılmıştır. Daha sonra numune dolu piknometrenin bir kısmı 22 ± 3 ^{0}C'deki saf su ile doldurulmuş ve su altındaki numune içerisindeki hapsolmuş hava vakum yapılarak çıkarılmıştır. Bu işlem sonunda piknometre 22 ± 3 ^{0}C'deki saf su ile doldurulmuş ve 22 ± 3 ^{0}C kararlılıktaki su banyosunda 24 saat bekletilmiş, bu sürenin sonunda piknometre hunisinin ortasındaki çizgiye kadar 22 ± 3 ^{0}C'deki saf su ile doldurulmuştur. Piknometrenin dış yüzeyindeki ıslaklıklar kurutulmuş ve numune ve su ile dolu piknometre tartılmıştır.

Karışımların hacim, zahiri ve efektif özgül ağırlıklarının belirlenmesi

Deney tartımları ve deney tartımları ile hesaplanan karışımlara ait teorik ve efektif özgül ağırlık; kaba ve ince agrega ile filler özgül ağırlıkları belirlendikten sonra karışımın hacim özgül ağırlıkları aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanmıştır.

$$Gsb=\frac{\%K+\%İ+\%F}{\frac{\%K}{Gkb}+\frac{\%İ}{Gib}+\frac{\%F}{Gfb}} \quad (4.1)$$

$$Gsa=\frac{\%K+\%İ+\%F}{\frac{\%K}{Gka}+\frac{\%İ}{Gia}+\frac{\%F}{Gfa}} \quad (4.2)$$

$$Geff_h=\frac{Gsa+Gsb}{2} \quad (4.3)$$

Burada;

Gsb; Agrega karışımının hacim özgül ağırlığı,

Gsa; Agrega karışımının zahiri özgül ağırlığı,

$Geff_h$: Karışımın efektif özgül ağırlığı (Hesapla);

%K, %İ, %F; Sırasıyla kaba, ince ve filler agregaların ağırlıkça yüzdeleri,

Gkb,Gib; Sırasıyla kaba ve ince agregaların hacim özgül ağırlıkları,

Gka, Gia, Gfa; Sırasıyla kaba, ince ve filler agregaların zahiri özgül ağırlıkları,

4.2.4.3 Dizaynda kullanılacak bitümlerin özgül ağırlıklarının belirlenmesi

Yeni bitüm ve yeni bitüm ile geri kazanım bitümlerle yapılacak Marshall dizaynında bazı parametrelerin belirlenmesi için tüm bitümlerin özgül ağırlıklılarının tespit edilmesi gerekmektedir.

Bitüm özgül ağırlık deneyinde önce boş ağırlığı ve 22 ± 3 °C'deki saf su ile dolu hali tartılmış piknometrenin içine likit hale getirilmiş bitüm numunesi dökülmüş ve bitüm laboratuvar sıcaklığını alınca bitümlü piknometre tartılmıştır. Daha sonra bitümlü piknometre, taşıncaya dek 22 ± 3 °C'deki saf su ile doldurulmuştur. Ardından piknometrenin kapağı kapatılmış ve piknometrenin dış yüzeyindeki taşan su kalıntıları giderilmiştir. Daha sonra piknometre bu hali ile tekrar tartılmıştır.

4.2.4.4 Marshall briketlerinin hazırlanması ve parametrelerin hesaplanması

Her karışım için sabit tutulan dizayn gradasyonundaki oranına göre fraksiyonlarından Marshall briketleri oluşturmak için 1150 g agrega tartımı yapılmıştır. RAP'lı karışımlarda ise agrega içerisindeki ağırlık toplamda 1150 g agrega ve RAP içerisindeki bitüm olacaktır. Bu halde ilgi bitüm yüzdesine göre gereken bitüm ağırlığından karışıma girecek RAP içerisinde bulunan bitüm düşülmüştür. Tartım işleminde fraksiyolardan alınan kümülatif agrega ağırlıkları, karışımların teorik ve efektif özgül ağırlık deneyine alınacak miktarının aynıdır. %4,0, %4,5, %5,0, %5,5, %6,0 ve %6,5 oranlarında farklı bitüm içeriği ve her bitüm içeriğinden 3 briket olmak üzere toplamda 18 briketlik agrega hazırlanmıştır. Hazırlanan agrega ve RAP 170 $^{\circ}$C'ye, bitüm 150 ^{0}C'ye ısıtılmış, agrega ağırlığının yüzdesi olarak bitüm verilerek sıcak karışım mikserinde 2 dakika boyunca bitüm agregayı saracak şekilde homojen olarak karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra karışım 4"lik Marshall kalıplarının içerisine alınmış, termometre aracılığı ile sıcaklığı kontrol edilen karışımın sıcaklığı 135 ^{0}C geldiğinde Marshall tokmağı, kalıp içerisindeki karışımın ön ve arka yüzünün her birine 75 serbest düşüş yapacak şekilde karışım sıkıştırılmıştır. Bu şekilde 6 farklı grup ve her bir gruptan 3 briket olacak şekilde 18 briket hazırlanmıştır. Briketlerin karıştırılmaması için dövülen briketler sırasıyla numaralandırılmıştır. Hazırlanan numunelerin sıcaklığı laboratuvar sıcaklığını alması için kalıplar içerisinde 24 saat laboratuvarda bekletilmiştir. Bu süre sonunda briketler kriko vasıtasıyla kalıpların içerisinden çıkarılmış ve briket yüzeylerindeki oluşan çapaklar giderilmiştir (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. Marshall briketlerinin hazırlanması.

Karışımlara ait grupların pratik (dp) ve teorik (dt) özgül ağırlıklarının belirlenmesi

%0, %15, %25, %30 RAP içeriği ile oluşturulan karışımlara ait her bir briketin 3 farklı noktadan yüksekliği ölçülmüş ve briketin kabul edilebilmesi için her bir briketin ortalama kalınlığın 63,5±2,5 cm aralığına girip girmediği tespit edilmiştir. Daha sonunda briketlerin hacim özgül ağırlıklarını bulmak için ilk önce her briket terazide tartılmış daha sonra 23 °C'deki su banyosunda 4 dk boyunca bekletilmiştir. Bu zaman sonunda her bir briket suda tartılmış ardından kuru bir havluda yüzeyinde oluşan su filmi giderilecek şekilde hafifçe kurulanmış ve briketin doygun yüzey kuru ağırlığı tartılmıştır (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. Marshall briketlerinin Dp'lerinin tespiti.

Her bir briketin pratik özgül ağırlığı, bahsedilen tartımları kullanarak aşağıdaki denklemlere göre hesap edilmiştir.

$$Vb=Md-Ms \tag{4.4}$$

$$Dp=\frac{Vb}{Mh} \tag{4.5}$$

Burada;

Vb: Briketin hacmi, cm^3,

Md: Briketin doygun yüzey kuru ağırlığı, g,

Ms: Briketin sudaki ağırlığı, g,

Mh: Brketin havadaki kuru ağırlığı, g,

Dp: Briketin pratik özgül ağırlığı, g/cm^3

Karışımlara ait farklı bitüm oranlarındaki grupların Dp değerleri ise o gruba ait 3 briketin Dp değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

Karışımlara ait farklı bitüm oranlardaki grupların teorik özgül ağırlıkları denklem 4.6'e göre hesap edilmiştir.

$$Dt = \frac{100+Wa}{\frac{100}{\frac{Geff+Wa}{Gb}}} \tag{4.6}$$

Burada;

Dt: Karışım grubunun teorik özgül ağırlığı, g/cm^3,

Wa: Bitüm yüzdesi, %,

Geff: Agreganın efektif özgül ağırlığı, g/cm^3,

Gb: Bitümün özgül ağırlığı. g/cm^3

Karışımlara ait farklı grupların hava (vh), agregalar arası (vma), asfalt dolu (vfa) boşlukların belirlenmesi

Karışımların Dp ve Dt değerleri hesaplandıktan soran hava boşluğu, agregalar arası boşluk ve asfalt dolu boşluk değerleri Denklem 4.7-4.9 'a göre hesaplanmıştır.

$$Vh = \frac{(Dt-Dp)}{Dt} x100 \tag{4.7}$$

$$VMA = 100x \frac{(Dpx(100-Wa)}{\frac{(1+Wa)}{\frac{100}{Gsb}}} \tag{4.8}$$

$$VFA = \frac{(VMA-Vh)}{VMA} x100 \tag{4.9}$$

Burada;

Vh: Briketteki hava boşluğu, %,

VMA: Agregalar arası boşluk, %,

VFA: Asfalt dolu boşluk, %.

Karışımlara ait farklı grupların stabilite ve akma değerlerinin bulunması

%0, %15, %25, %30 RAP içeriği ile oluşturulan karışım gruplarına ait briketler 60 ^{0}C'deki su banyosunda 35 dk bekletilmiş ardından Marshall stabilite deney cihazında stabilite deneyi yapılmış böylece briketlerin maksimum stabilite ve akmaları tespit edilmiştir (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. Marshall stabilitesi deneyi.

4.2.4.5 Karışımların optimum bitümünün belirlenmesi

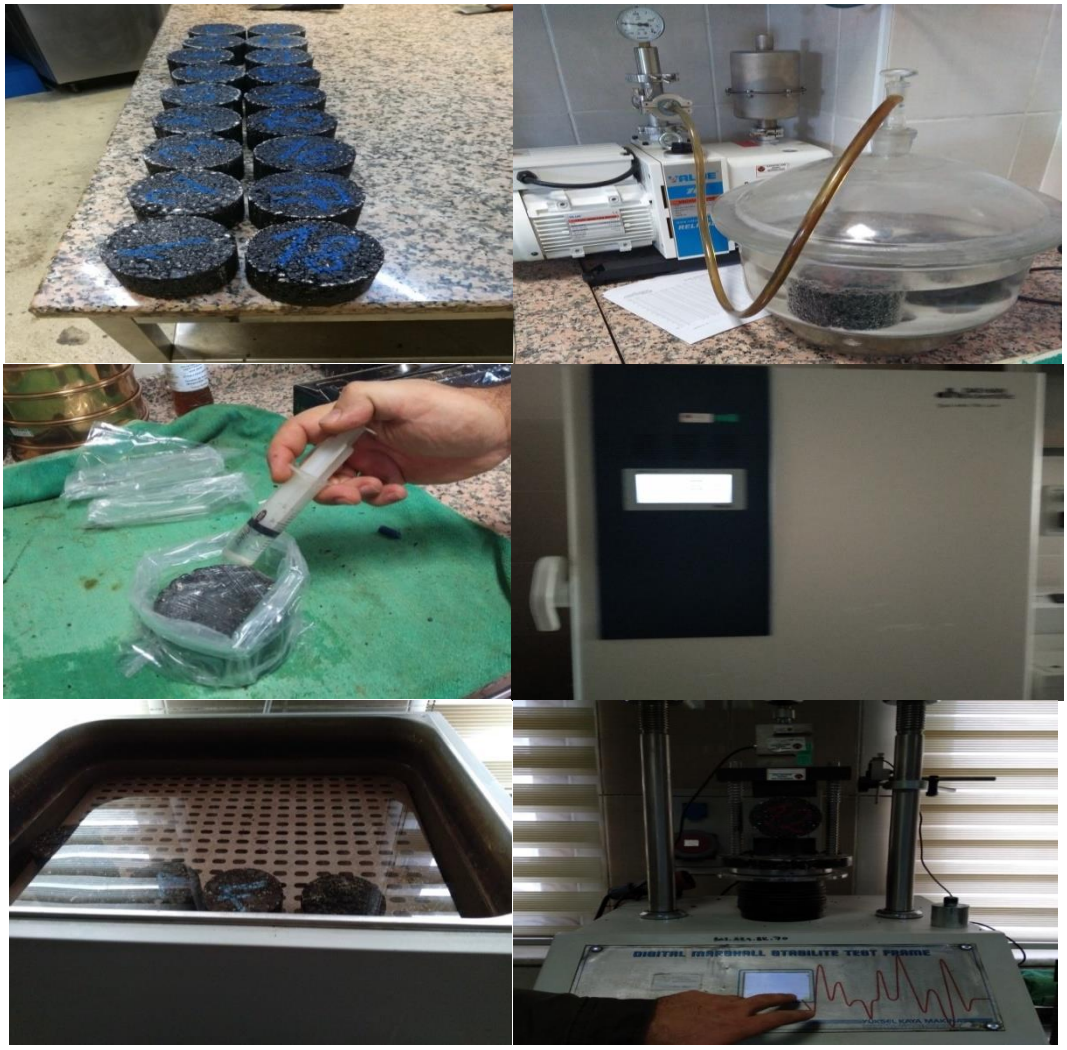
KTŞ'ye göre aşınma dizaynı için hava boşluk yüzdesi 3-5 aralığında olmalıdır. MS-II'ye göre en ideal boşluk %4 değeridir. Aşınma tabakası için yapılan Marshall dizaynlarında optimum bitüm bulunurken ilk adım hava boşluğu-bitüm grafiğinden %4 boşluğa tekabül eden bitüm içeriği optimum bitüm kabul edilmiştir. Optimum bitüm kabul edilen bu bitüm içeriği VMA-bitüm, VFA-bitüm, Stabilite-bitüm ve Akma-bitüm grafiklerinden şartname kriterlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilerek seçilen bitümün nihai optimum bitüm olduğu teyit edilmiştir.

4.2.5 Karışımların indirek çekme mukavemeti oranlarının (ITS) belirlenmesi

Karışımların nem duyarlılığının tespiti için yapılan ITS deneyinde, Marshall dizaynı ile bulunan optimum bitüm içeriği ile Marshall dizaynındaki gibi hazırlanan 1150 g agrega yine Marshall dizaynında olduğu gibi karıştırılıp sıkıştırılmıştır. Bu şekilde hazırlanan aynı agrega gradasyonu ve bitüm içeriğine sahip 12 briket, toplam Dp değerleri (veya boşluk yüzdeleri) eşit olacak şekilde göre 6'şar gruplara ayrılmıştır. Bu gruplardan birindeki 6 briketin her biri koşullandırılması için boşluğunun %70-%80'i saf su dolması için desikatör içine alınarak vakum yapılmıştır. Bu işlem sonunda briketler streç film ile kaplanmış içerisinde 10 mL saf su bulunan plastik

torbaları alınmış ve torbaların ağzı bağlanmıştır. Briketlerin bulunduğu plastik torbalar -18 °C'deki dipfrizde 16 saat boyunca dondurulmuştur. Ardından dipfrizden çıkarılan numuneler 60 °C'deki su banyosuna alınmış numune torbaları çıkarılarak briketler 24 boyunca su banyosunda tutulmuştur. Bu süre zarfının sonunda su banyosundan çıkarılan briketler bu kez 25 °C'deki su banyosunda 2 saat bekletilmiş ardından su banyosundan çıkarılan koşullandırılmış 6 briket ile koşullandırılmamış, kuru 6 briket çelik yükleme şeritleri arasına sırayla yerleştirilerek indirek çekme mukavemeti testine tabi tutulmuştur. Koşullandırılmış 6 briketin kırılma yüklerinin toplamı ile koşullandırılmamış 6 briketin kırılma yüklerinin toplamı birbirlerine oranı Denklem 4.10'a göre hesap edilmiştir (Şekil 4.10.).

$$TSR=\frac{TSR_{ıslak}}{TSR_{kuru}}x100 \qquad (4.10)$$



Şekil 4.10. ITS deneyi.

4.2.6 Karışımların tekerlek izinde oturmalarının belirlenmesi

Marshall dizaynı yapılan karışımların tekerlek izindeki oturmaya karşı mukavemetlerini tespit etmek için bu karışımlara Hamburg cihazında tekerlek izinde oturma deneyi gerçekleştirilmiştir.

Hamburg tekerlek izinde oturma deneyi kalıpları, 40 – 120mm yüksekliğinde ve 320x260mm boyutlarındadır. KTŞ'ye Hamburg tekerlek izi deneyinde numunenin yüksekliği, küçük ebatlı cihazlar için, 5 cm olmalıdır. Denklem 4.11'e göre karışıma alınacak agrega kütlesi dizayn gradasyonuna göre gerekli RAP miktarı ile hazırlanmış 170 °C'deki etüvde, Denklem 4.12-4.13'ye göre tekerlek izi karışımı için gerekli bitüm miktarından, RAP'lı karışımlar için, karışıma giren eski bitüm miktarı düşülmüş ve bu şekilde tartılan bitüm 150 °C etüvde ayarlanan sıcaklığa gelene kadar bekletilmiştir. Hamburg tekerlek izi deneyi ikiz numuneye yapılmaktadır.

$$Mk=DpxVk \tag{4.11}$$

$$Ma=\frac{Mk}{(100+Wa)}x100 \tag{4.12}$$

$$Mk=Mk-Ma \tag{4.13}$$

Burada;
Vk; Kalıp hacmi
Mk: Karışımın ağırlığı,
Ma: Karışımdaki agrega ağırlığı,
Mb: Karışımdaki bitüm ağırlığı,
İstenen sıcaklığa ulaşan agrega ve bitüm Şekil 4.11.'de gösterilen mikserde 2 dk. boyunca karıştırılmıştır.



Şekil 4. 11. T.İ.O numunesi karıştırma mikseri.

Karıştırma işleminden sonra karışım kompaktör numunesi kalıplarına alınmış, ardından 80 ^{0}C'deki Şekil 4.12.'deki silindir dilimli sıkıştırıcıda numune kalınlığı 5 cm olana kadar sıkıştırılmıştır.



Şekil 4.12. T.İ.O kompaktörü ile numunelerin sıkıştırılması.

Sıkıştırılan kalıplar laboratuvar sıcaklığına soğuması için 24 saat laboratuvarda bekletilmiş, bu sürenin sonunda kalıplardan çıkarılan numuneler, tekerlek izi deneyi kalıplarına alınmış ve numuneler kalıbın şeklini alması için alçılanmıştır (Şekil 4.13.).



Şekil 4.13. Numunelerin alçılanması.

Numuneler alçılandıktan 24 saat sonra kalıplarından çıkarılıp Hamburg tekerlek izi deney cihazına yerleştirilmiştir. Şartnameye göre deney sıcaklığı 60 ^{0}C olduğu için, cihaz deney sıcaklığına ulaştığında, numunelerin de deney sıcaklığını alması maksadıyla deneye başlamadan 4 saat boyunca numuneler, deney sıcaklığında ısıtılmıştır. Ön ısıtma sürecinin sonunda deney başlamış, numuneler üzerindeki lastik tekerler toplamda 15000 devir veya bir başka deyişle 30000 geçiş yaparak deney sonlanmıştır. Şartnamede 10000 devirdeki (20000 geçiş) tekerlek izi oturmaları kıstas alınmaktadır. Deney sonucu olarak iki numunenin 10000 devirdeki tekerlek izinde çökme değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır (Şekil 4.14.).



Şekil 4.14. Tekerlek izinde oturma deneyi.

5. BULGULAR

Karışımlarda kullanılacak yeni bitüm ile yeni ve geri kazanım bitümlere yapılan deneylerin sonuçlarına göre muhtelif RAP oranındaki karışımlarının hangisinin gençleştirici katkı maddesine ihtiyaç duyduğu ile hangi oranda katkı maddesinin ilave edileceği yeni-eski bitüm karışımlarına yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası tayini deneyi ile karar verilmiştir. Ayrıca bu yeni bitüm ve yeni bitüm ile muhtelif oranlardaki geri kazanım bitüm karışımlarına RTFO+PAV'deki koşullandırılmalarından sonra BBR ve DSR deneyi yapılmış sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Yeni materyal ve yeni materyal ile muhtelif oranlardaki RAP karışımlarınınım Marshall dizayn sonuçları ile Marshall dizayn verilerine göre hazırlanan bu karışımların ITS oranları, tekerlek izinde oturma deneyi bu bölümde ele alınıştır.

5.1 Bitümlerin Fiziksel Özelliklerine Ait Bulgular

5.1.1 Penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri

TS EN 13110-1:2016 standardına göre RAP bitümü ihtiva eden karışımların bitüm penetrasyonunun hesaplanması şu şekildedir:

$$a \lg pen_1 + b \lg pen_2 = (a+b) \lg pen_{mix} \quad (5.1)$$

Burada;

pen_{mix}: Bitüm karışımının penetrasyonu,

pen_1: Geri kazanılmış bitümün penetrasyonu,

pen_2: Normal bitümün penetrasyonu,

a ve b: Geri kazanılmış bitümün (a) ve normal bitümün (b) kütlece oranı (a+b=1).

TS EN 13110-1:2016 standardına göre RAP bitümü ihtiva eden bitüm karışımlarının yumuşama noktasının hesaplanması ise şu şekildedir:

$$T_{R\&B\ mix} = a \times T_{R\&B1} + b \times T_{R\&B2} \quad (5.2)$$

Burada;

$T_{R\&B\ mix}$: Bitüm karışımının yumuşama noktası,

$T_{R\&B1}$: Geri kazanılmış bitümün yumuşama noktası,

$T_{R\&B2}$: Normal bitümün yumuşama noktası,
a ve b: Geri kazanılmış bitümün (a) ve normal bitümün (b) kütlece oranı (a+b=1).

Çizelge 5.1.'de görüldüğü üzere %30 geri kazanım bitüm içeren bitüm karışımın penetrasyon değeri hem TS EN 13110-1:2016 standardına göre yapılan karışımın penetrasyonu hesabına hem de karışıma yapılan penetrasyon deneyi sonucuna göre 50/70 penetrasyon aralığını sağlamamaktadır.

Çizelge 5.1. Bitüm penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri.

Deney Adı	Geri Kazanılan Bitüm	Yeni Bitüm	%15 Geri Kazanılan Bitüm + %85 Yeni Bitüm (Hesapla)	%25 Geri Kazanılan Bitüm + %75 Yeni Bitüm (Hesapla)	%30 Geri Kazanılan Bitüm + %70 Yeni Bitüm (Hesapla)
Penetrasyon, (0,1 mm)	30	59,9	54	50,4	48,7
Yumuşama Noktası (°C)	59	50	51,4	52,3	52,7

%30 geri kazanım bitüm ihtiva eden bitüm karışımının penetrasyon (42,3 mm) ve yumuşama noktası değeri (59 ^{0}C) 50/70 penetrasyon sınıfı bitümün penetrasyon ve yumuşama noktası değerini sağlaması için bu karışıma VIATOP® plus RC marka gençleştirici katkı, muhtelif oranlarda, geri kazanılan bitümün yüzde değeri olarak ilave edilmiş optimum katkı oranını tespit etmek için bu numunelere penetrasyon ve yumuşama deneyi yapılarak şartname limitlerini ilk sağlayan katkı oranı tespit edilmiştir. Deney sonuçları ve şartname limitleri Çizelge 5.2.'de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Katkı oranlarına göre penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri.

Deney Adı	%30'u Geri Kazanılan Bitüm Karışımı (%1 VIATOP® plus RC)	%30'u Geri Kazanılan Bitüm Karışımı (%2 VIATOP® plus RC)	%30'u Geri Kazanılan Bitüm Karışımı (%3 VIATOP® plus RC)	Şartname Limitleri
Penetrasyon, (0,1 mm)	46	49,1	50,4	50-70
Yumuşama Noktası (°C)	52,3	51,4	50	46-54

Yeni bitüm ve yeni bitüm ile geri kazanım bitüm karışımları RTFO'da yaşlandırılmış ardından yaşlandırılan numunelere penetrasyon ve yumuşama noktası tayini deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları ve şartname limitleri Çizelge 5.3.'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. RTFO deneyi sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçları.

Deney Adı	Pen. (0,1 mm)	Yum. Nok. (°C)	RTFO'da Koşullandırılmış			
			Kalıcı Pen. (%)	Yum. Nok. Yük. ^{0}C	Şartname Limitleri	
					Kalıcı Pen. (%)	Yum. Nok. Yük. ^{0}C
Yeni Bitüm	59,9	50	54	8	≥ 50	≤ 9
%15 Geri Kazanılan Bitüm + %85 Yeni Bitüm	54,2	53	53	6		
%25 Geri Kazanılan Bitüm + %75 Yeni Bitüm	50,2	55	51	5,5		
%30 Geri Kazanılan Bitüm + %70 Yeni Bitüm	42,3	59	50	5		
%30 Geri Kazanılan Bitüm (% 3 VIATOP® plus RC Katkılı) + %70 Yeni Bitüm	55	53	52	4		

5.1.2 BBR ve DSR deneyi bulguları

Bitüm karışımları ilk önce RTFO deneyi ile koşullandırılmış ardından PAV deneyi ile yaşlandırılmıştır. Burada RTFO deneyi ile koşullandırma bitüm sıcak karışım plentindeki geçirdiği aşamalar sonucu yaşlanmasını, PAV deneyi ise bitümlü karışım içerisindeki bitümün hizmet verdiği süre içerisindeki yaşlanmasını temsil etmektedir. Yaşlandırma işlemlerinden sonra bitüm numunesinin bir kısmına BBR deneyi, diğer kısmına DSR deneyi yapılmıştır. BBR deneyi bitümün sünme rijitlik değerinin belirlenmesi dolayısıyla bitümün düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı dayanımının bir göstergesidir. DSR deneyi ise belli bir sıcaklık ve yük altındaki bitümün visko-elastik davranışını belirlemek için yapılmaktadır. Aslında bitümün

yük ve sıcaklık altındaki kalıcı deformasyonlara karşı direncinin bir göstergesidir. RTFO+PAV deneyleri ile yaşlandırılan bitümlere yapılan -6 ^{0}C'de yapılan BBR deneylerinin 60.sn sonuçları Çizelge 5.4.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.4. Bitümlerin RTFO+PAV sonrası BBR deneyi sonuçları.

Bitümler	Sünme Sertliği, S(t), MPa	Eğim, m	Şartname Limitleri	
			Sünme Sertliği, S(t), MPa	Eğim, m
%0 Geri Kazanım Bitüm	152	0,270	≤ 300	≥ 0,300
%15 Geri Kazanım Bitüm	149	0,298		
%25 Geri Kazanım Bitüm	131	0,305		
%30 Geri Kazanım Bitüm (%3 VIATOP® plus RC)	126	0,314		

RTFO+PAV deneyleri ile yaşlandırılan bitümlere BBR deneyinden sonra DSR deneyi yapılmış ve şartname gereği G*sinδ değerinin 5000 kPa değerinin altına ilk düştüğü sıcaklık değerleri Çizelge 5.5.'de sunulmuştur.

Çizelge 5.5. Bitümlerin RTFO+PAV sonrası DSR deneyi sonuçları.

Bitümler	1.Deney		2.Deney		<5000 kPa Geçen İlk Değer
	G*sinδ, kPa	T, ^{0}C	G*sinδ, kPa	T, ^{0}C	T, ^{0}C
%0 Geri Kazanım Bitüm	5541	28,06	3968	31,11	29
%15 Geri Kazanım Bitüm	5864	28,03	4296	31,05	29,6
%25 Geri Kazanım Bitüm	6807	28,03	4918	31,13	31,0
%30 Geri Kazanım Bitüm (%3 VIATOP® plus RC)	5286	25,00	4033	27,98	25,6

5.1.3 Agregaların özelliklerine ait bulgular

Çalışma kapsamında kullanılmış yeni agregaya ait deneysel çalışmalar sonucu belirlenen özellikler Çizelge 5.6.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.6. Yeni agreganın deney sonuçları.

Deney Adı	Deney Sonucu	Şartname Limiti	Deney Standardı
Kil Top. Ve Uf. Md. Mkt., %	0,2	≤ 0,3	ASTM C142
Mg_2SO_4 Donma Kaybı, %	2,8	≤ 16	TS EN 1367-2
Metilen Mavisi, g/kg	0,8	≤ 1,5	TS EN 933-9
Los Angeles Parçalanma Direnci, %	21,5	≤ 27	TS EN 1097-2
Yassılık İndeksi, %	10,7	≤ 25	BS 812

RAP malzemesinin ekstraksiyonu sonucu elde edilen agrega örneklerine yapılan elek analizi sonuçları Çizelge 5.7.'de sunulmuştur.

Çizelge 5.7. RAP malzemesinin agrega gradasyonu.

Elek Açıklığı		1	2	3	4	5	6	7	8	Ort.
mm	inc	% geçen	% geçen	% geçen	% geçen	% geçen	% geçen	% geçen	% geçen	% geçen
9,5	3/8	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4,75	No.4	64,9	69,7	67,3	65,1	64,8	68,7	65,3	68,5	66,8
2	No.10	37,4	43	41,1	33,1	34,1	39	38,6	40,9	38,4
0,425	No.40	20,6	24	22,7	18,2	18,8	21,2	20,6	22,7	21,1
0,18	No.80	15,7	18,6	17,8	14,3	14,7	16,4	15,8	17,9	16,4
0,075	No.200	11,2	13,8	12,9	10,8	11,2	13	12,5	12,5	12,2

5.2 Marshall Dizaynı Bulguları

5.2.1 Gradasyon bulguları

Karışımların mukayese edilebilmesi için dizayn gradasyonu sabit tutulmuştur. RAP malzemesine ait agrega gradasyonu ve sabit bir dizayn gradasyonu elde etmek için RAP malzemesinin oranına göre ayarlanan yeni agrega gradasyonu ile karışım gradasyonu ve şartname limitleri Çizelge 5.8.-5.11.'da verilmektedir.

Çizelge 5.8. Yeni materyalle (%0 RAP) yapılacak dizaynın agrega gradasyonu.

Elek Açıklığı		Kar. Grad.	Şartname Limitleri	
mm	inch	%geçen	%geçen	
19,1	3/4"	100,0	100	
12,7	1/2"	91,1	88	100
9,52	3/8"	78,5	72	90
4,76	No.4	47,1	42	52
2,00	No.10	28,0	25	35
0,42	No.40	11,5	10	20
0,177	No.80	7,8	7	14
0,075	No.200	5,5	3	8

Çizelge 5.9. %15 RAP'lı yapılacak dizaynın agrega gradasyonu.

Elek Açıklığı		85% Yeni Agrega Karışımının Gradasyonu	15% RAP Agrega Gradasyonu	15% RAP'lı Karışımın Gradasyonu	Şartname Limitleri	
mm	inch	%geçen	%geçen	%geçen	%geçen	
19,1	3/4"	100,0	100,0	100,0	100	
12,7	1/2"	89,5	100,0	91,1	88	100
9,52	3/8"	74,7	100,0	78,5	72	90
4,76	No.4	43,6	66,8	47,1	42	52
2,00	No.10	26,2	38,4	28,0	25	35
0,42	No.40	9,8	21,1	11,5	10	20
0,177	No.80	6,7	16,4	8,1	7	14
0,075	No.200	4,3	12,2	5,5	3	8

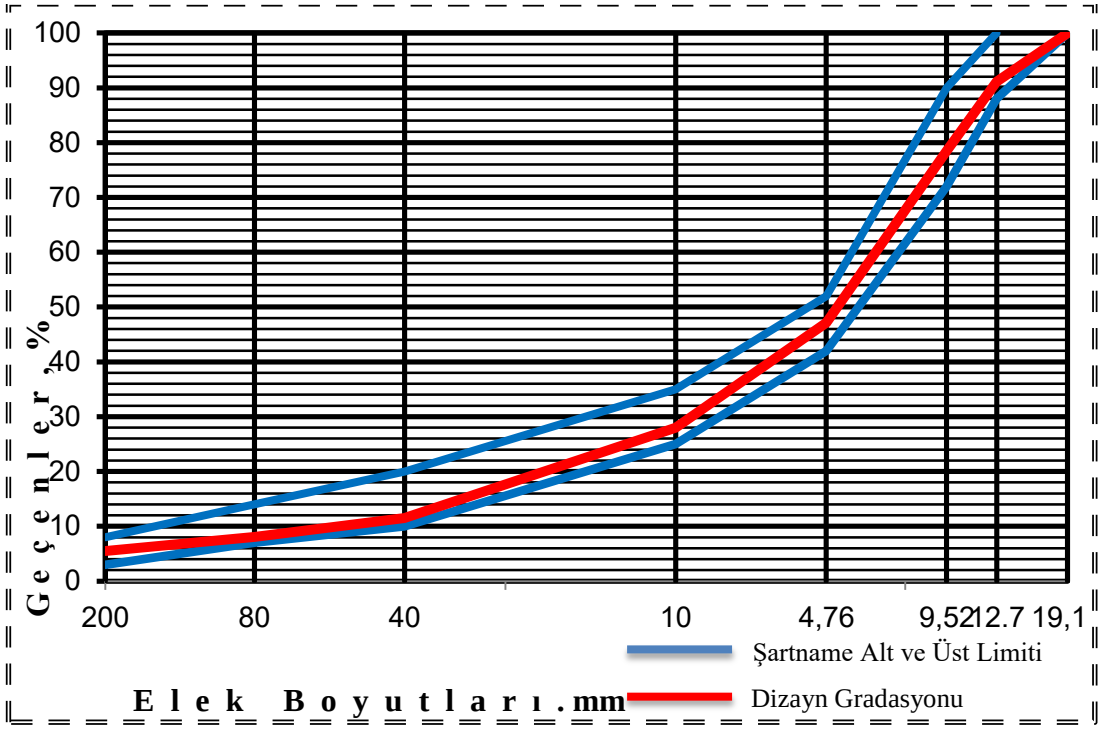
Çizelge 5.10. %25 RAP'lı yapılacak dizaynın agrega gradasyonu.

Elek Açıklığı		75% Yeni Agrega Karışımının Gradasyonu	25% RAP Agrega Gradasyonu	25% RAP'lı Karışımın Gradasyonu	Şartname Limitleri	
mm	inch	%geçen	%geçen	%geçen	%geçen	
19,1	3/4"	100,0	100,0	100,0	100	
12,7	1/2"	88,1	100,0	91,1	88	100
9,52	3/8"	71,3	100,0	78,5	72	90
4,76	No.4	40,5	66,8	47,1	42	52
2,00	No.10	24,5	38,4	28,0	25	35
0,42	No.40	8,3	21,1	11,5	10	20
0,177	No.80	5,3	16,4	8,1	7	14
0,075	No.200	3,3	12,2	5,5	3	8

Çizelge 5.11. %30 RAP'lı yapılacak dizaynın agrega gradasyonu.

Elek Açıklığı		70%	30%	30% RAP'lı Karışımın Gradasyonu	Şartname Limitleri	
		Yeni Agrega Karışımının Gradasyonu	RAP Malzemesinin Agrega Gradasyonu			
mm	inch	%geçen	%geçen	%geçen	%geçen	
19,1	3/4"	100,0	100,0	100,0	100	
12,7	1/2"	87,3	100,0	91,1	88	100
9,52	3/8"	69,3	100,0	78,5	72	90
4,76	No.4	38,7	66,8	47,1	42	52
2,00	No.10	23,5	38,4	28,0	25	35
0,42	No.40	7,4	21,1	11,5	10	20
0,177	No.80	4,5	16,4	8,1	7	14
0,075	No.200	2,6	12,2	5,5	3	8

Her karışım için sabit tutulan dizayn gradasyonuna ait eğri ve şartname limitleri Şekil 5.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Dizayn gradasyonu ve şartname limitleri grafiği.

5.2.2 Özgül ağırlık bulguları

Kaba agregaya ait özgül ağırlık deneyi sonucunda bulunan hacim özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık, su absorbsiyonları Çizelge 5.12.'de verilmiştir.

Çizelge 5.12. Kaba agrega özgül ağırlık ve absorbsiyonları.

RAP Oranı	Hacim Özgül Ağırlık, g/cm^3	Zahiri Özgül Ağırlık, g/cm^3	Su Absorpsiyonu, %
% 0 RAP	2,660	2,696	0,50
% 15 RAP	2,666	2,711	0,63
% 25 RAP	2,672	2,707	0,49
% 30 RAP	2,680	2,718	0,52

İnce agregaya ait özgül ağırlık deneyi sonucunda bulunan hacim özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık, su absorbsiyonları Çizelge 5.13.'de verilmiştir.

Çizelge 5.13. İnce agrega özgül ağırlık ve absorbsiyonları.

RAP Oranı	Hacim Özgül Ağırlık, g/cm^3	Zahiri Özgül Ağırlık, g/cm^3	Su Absorpsiyonu, %
% 0 RAP	2,660	2,705	0,62
% 15 RAP	2,669	2,710	0,57
% 25 RAP	2,683	2,712	0,39
% 30 RAP	2,684	2,718	0,40

Filler numunelerine ait özgül ağırlık deneyi sonucunda bulunan zahiri özgül ağırlık değerleri Çizelge 5.14.'de verilmiştir.

Çizelge 5.14. Fillerin zahiri özgül ağırlıkları.

RAP Oranı	Zahiri Özgül Ağırlık, g/cm^3
% 0 RAP	2,730
% 15 RAP	2,725
% 25 RAP	2,724
% 30 RAP	2,721

Karışımlara yapılan efektif özgül ağırlık deneyleri sonuçları Çizelge 5.15.'de sunulmuştur.

Çizelge 5.15. Karışımların teorik ve efektif özgül ağırlığı.

RAP Oranı	Teorik Özgül Ağırlık, Dt, g/cm^3	Efektif Özgül Ağırlık, Geff, g/cm^3
% 0 RAP	2,493	2,676
% 15 RAP	2,505	2,687
% 25 RAP	2,507	2,692
% 30 RAP	2,512	2,698

Karışımların Gsb ve Gsa ile bu değerlere göre hesaplanan $Geff_h$ değerleri ve efektif özgül ağırlık deneyi sonucu bulunan $Geff_d$ değerleri Çizelge 5.16.'da sunulmuştur.

Çizelge 5.16. Karışımların hacim, zahiri ve efektif özgül ağırlıkları.

RAP Yüzdesi	Gsb, g/cm^3	Gsa, g/cm^3	$Geff_h$, g/cm^3	$Geff_d$, g/cm^3
Yeni Agrega (%0 RAP)	2,663	2,701	2,682	2,676
%15 RAP'lı	2,670	2,712	2,691	2,687
%25 RAP'lı	2,679	2,710	2,695	2,692
%30 RAP'lı	2,684	2,718	2,701	2,698

Agregaların hacim ve zahiri özgül ağılıklarının aritmetik ortalaması olarak bulunan efektif özgül ağırlık ile deneysel metotla bulunan efektif özgül ağırlıklığın teorik oalrak birbirlerine yakın olması gerekmektedir. Çizelge 5.9.'da görüleceği üzere bu değerler birlerine yakın olmakla birlikte Marshall dizayn verileri hesaplanırken $Geff_d$ değeri kullanılmıştır.

Marshall parametrelerinin hesap edilmesi içi dizaynda kullanılacak bitüme ait özgül ağırlık deneyi sonucu bulunan bitüm özgül ağırlık değerleri Çizelge 5.17.'de sunulmuştur.

Çizelge 5.17. Bitüm özgül ağırlıkları.

RAP Oranı	Bitüm Özgül Ağırlık, Gbit, g/cm^3
% 0 RAP	1,036
% 15 RAP	1,047
% 25 RAP	1,040
% 30 RAP	1,042

5.2.3 Marshall dizaynı parametreleri bulguları

Karışımlara yapılan marshall dizaynı bulguları; pratik özgül ağırlık (Dp), hava boşluğu (Vh), aslfalt dolu boşluk (VFA), agregalar arası boşluk (VMA), stabilite ve akma parametreleridir. KTŞ'de asfalt betonu aşınma dizaynının hava boşluğu için limit değerler olan 3-5% aralığından MS-II'ye göre asfalt betonu aşınma dizaynı için en ideal hava boşluğu olan %4 değeri seçilerek optimum bitüm tespit edilmiş ve bu optimum bitüme karşılık gelen bahsi geçen Marshall dizaynı parametrelerinin şartnameye uygunluğu belirlenerek optimum bitüm kontrol edilmiştir.

Karışımın Marshall parametrelerinden stabilite, karışıma gelen yüklere karşı karışımın mukavemetidir ve daha çok agregalara bağlıdır. Karışımın akması, sıfır yükten maksimum yüke ulaştığı ana kadar karışımın yaptığı toplam deformasyondur. Karışımın yüksek akma değeri, karışımın plastik deformasyona ve düşük stabilitesine, düşük akma değeri ise karışımın kırılganlaşmasına işaret etmektedir. Karışımın hava boşluğu, karışım içerisinde homojen dağılmış hava boşluklarını temsil etmektedir. Hava boşluğunun yüksek olması; karışımın daha çabuk yaşlanmasına, geçirgenliğinin artmasına, yorulma direncinin düşmesine sebep olacağı gibi düşük olması da sıcak havalarda bitümün genişleyeceği yeterli bir hacim oluşmaması nedeniyle karışımdaki bitümün kusmasına, tekerlek izinde oturmalara, yığılmalara sebep olacaktır. Agregalar arası boşluk, karışım içerisindeki agrega danelere arasındaki boşluğu ifade etmekle birlikte hava boşluğu ile efektif bitüm hacminin toplamını da temsil etmektedir. Karışımın VMA değeri, bitümün agregaların etrafını yeterince sarması için şartnamenin minimum değerinin üzerinde bir değerde olması gerekmemektedir. İstenenden yüksek bir VMA değeri ise fazla miktarda bitümü bağlayıcı anlamında geldiği için tasvip edilmemektedir. VFA değeri ise, karışım içerisindeki asfaltın kapladığı hacmi ifade etmektedir. Karışımın VFA değeri, bitüm filminin yeteri kadar olması için yeterli değerde olmalıdır. Düşük VFA değeri karışımın dayanıksız ve kuru görünümüne, yüksek VFA değeri ise düşük stabilite ve kusmalara sebep olmaktadır.

5.2.3.1 Yeni materyal karışıma ait bulgular

Yeni agrega ve yeni bitümle yapılan Marshall dizaynına ait parametreler Çizelge 5.18.'de verilmiştir.

Çizelge 5.18. Yeni materyal karışımının marshall dizayn verileri.

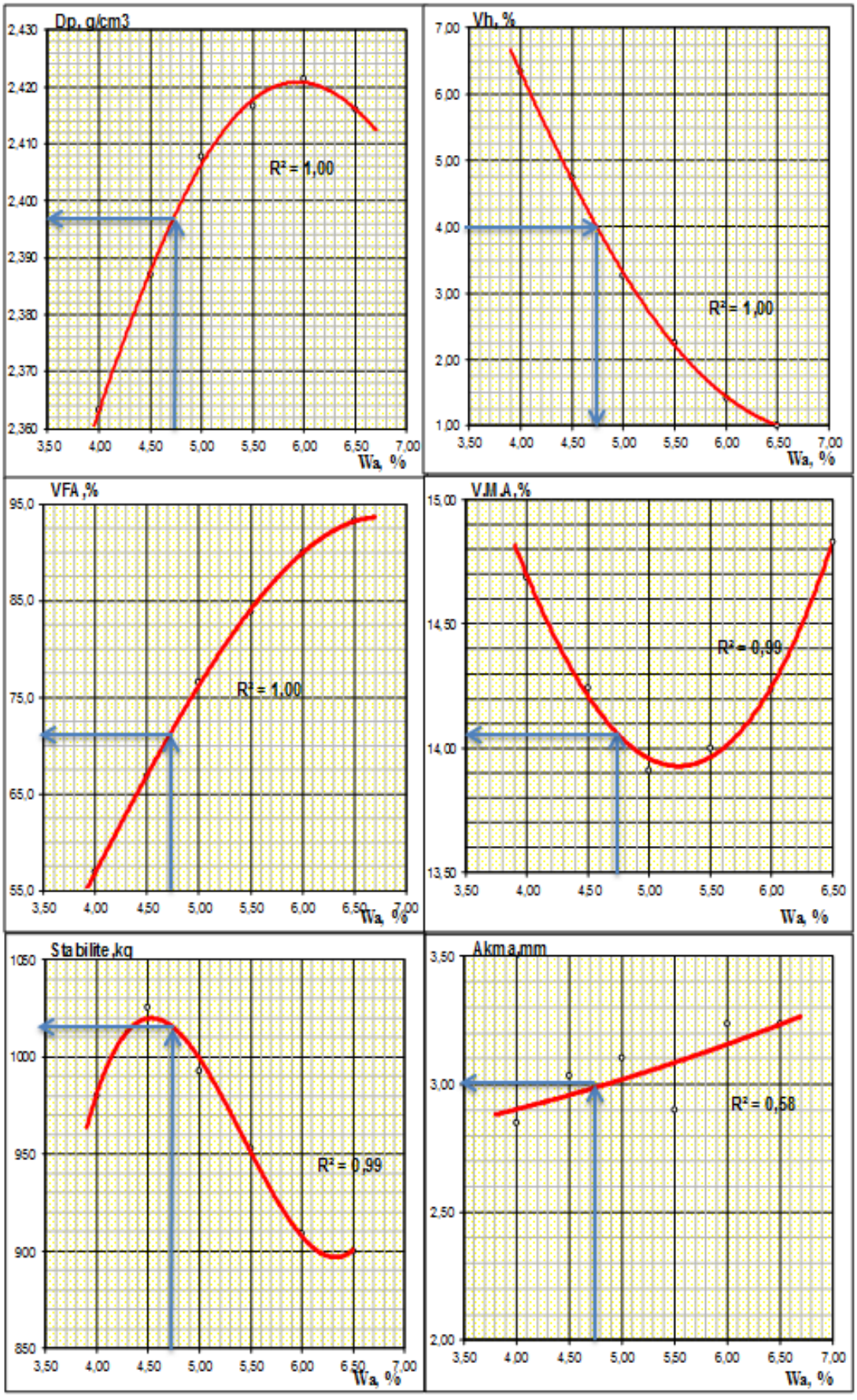
Bitüm %	Dp t/m^3	Dt t/m^3	Vh %	VMA %	VFA %	Stabilite kg	Akma mm
4,0	2,363	2,523	6,33	14,69	56,9	979	2,85
4,5	2,387	2,506	4,74	14,24	66,7	1026	3,03
5,0	2,408	2,489	3,26	13,91	76,6	993	3,10
5,5	2,417	2,472	2,26	14,00	83,9	953	2,90
6,0	2,421	2,456	1,42	14,23	90,0	909	3,23
6,5	2,416	2,441	1,01	14,83	93,2	900	3,25

Farklı bitüm oranlarında oluşturulan Marshall briketlerine ait Çizelge 5.18.'de verilen veriler kullanılarak hazırlanan Şekil 5.2.'deki Marshall dizaynına ait grafikler hazırlanmıştır. Hava boşluğu-bitüm grafiğinde %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm oranı optimum bitüm olarak belirlenmiş ve bu bitüm yüzdesi ile diğer parametrelerin şartnameye uygunluğu kontrol edilmiştir (Çizelge 5.19.).

Çizelge 5.19. Dizayn sonuçları.

Marshall Dizaynı Parametreleri	**Dizayn Sonuçları**	**Şartname Limitleri**
Optimum Bitüm, %	4,75	4,0-7,0
Pratik Özgül Ağırlık, g/cm^3	2,397	-
Stabilite, kg	1015	Min 900
Boşluk, %	4,01	3-5
Asfaltla Dolu Boşluk, %	71,5	65-75
V.M.A, %	14,1	14-16
Akma, mm	3,00	2-4

Çizelge 5.19.'da da gösterildiği gibi yeni materyalle yapılan Marshall dizayn sonuçları şartname limitlerini sağlamaktadır. Ancak yeni materyalle yapılan Marshall dizaynı sonucu VMA değeri (%14,1) şartnamenin alt sınırına (%14) yakın olmakla birlikte VFA değerinin şartname limitlerinin ortalamasının üstünde olması, VMA değerinin yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.2. Marshall dizaynı grafikleri (%0 RAP).

5.2.3.2 %15 RAP karışımına ait bulguları

Yeni materyalin %85'i ve RAP malzemesinin %15'i ile oluşturulan karışımın marshall dizaynı sonucu elde edilen veriler Çizelge 5.20.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.20. %15 RAP'lı karışımın marshall dizayn verileri.

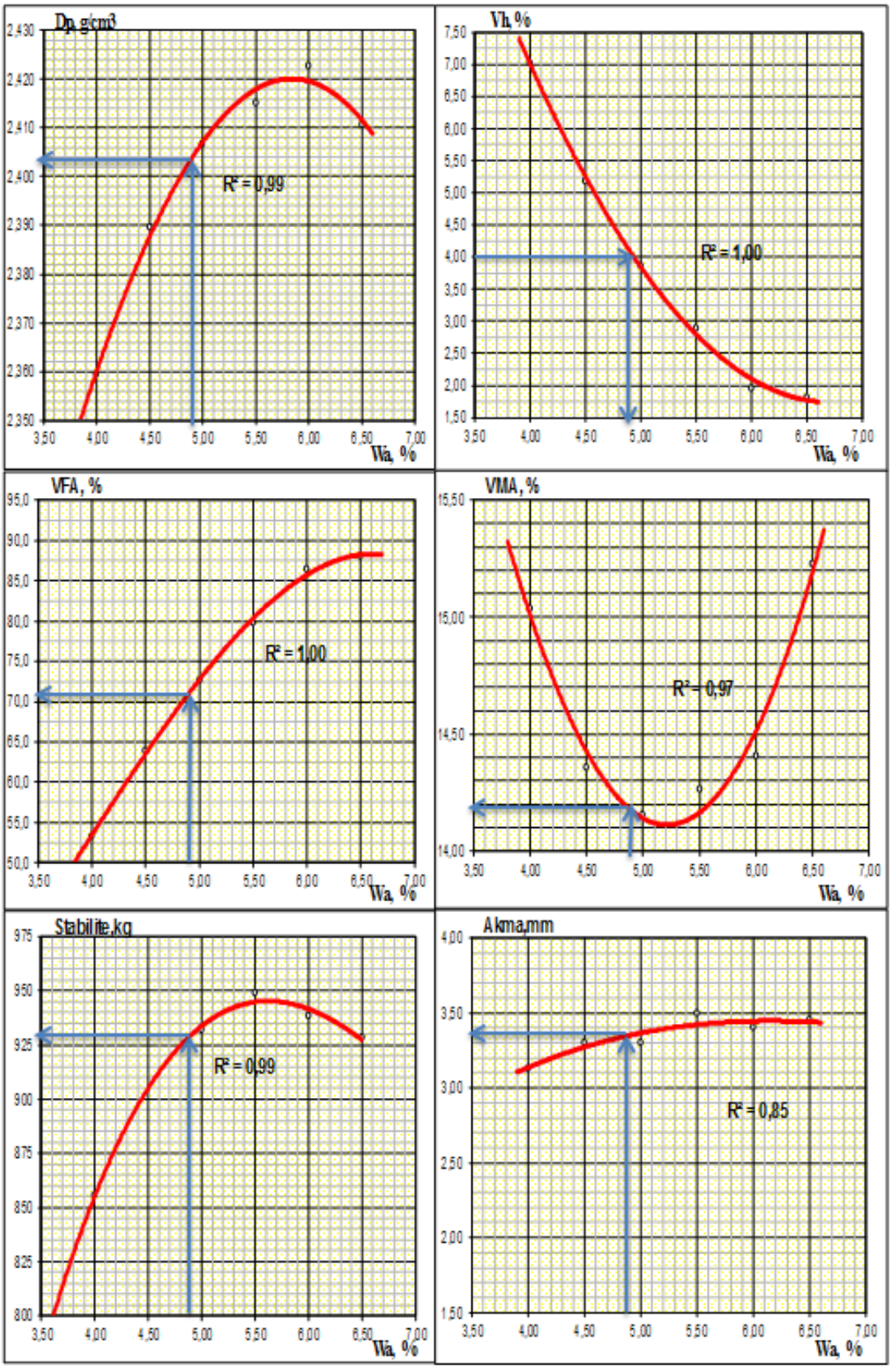
Bitüm %	Dp t/m^3	Dt t/m^3	Vh %	VMA %	VFA %	Stabilite kg	Akma mm
4,0	2,359	2,537	7,02	15,03	53,3	855	3,13
4,5	2,385	2,520	5,37	14,52	63,0	918	3,30
5,0	2,407	2,504	3,86	14,15	72,7	932	3,30
5,5	2,415	2,487	2,90	14,27	79,7	949	3,50
6,0	2,423	2,471	1,96	14,40	86,4	929	3,30
6,5	2,411	2,455	1,82	15,23	88,0	928	3,45

Çizelge 5.19.'teki veriler kullanılarak hazırlanan marshall grafikleri Şekil 5.3'.de verilmiştir. %15 RAP malzemesiyle hazırlanan marshall dizaynında optimum bitüm %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm olarak seçilmiş ve diğer paramtreler bu bitüm değeri ile kontrol edilmiştir. Dizayn sonuçları Çizelge 5.21.'de sunulmuştur.

Çizelge 5.21. Dizayn sonuçları.

Marshall Dizaynı Parametreleri	**Dizayn Sonuçları**	**Şartname Limitleri**
Optimum Bitüm, %	4,90	4,0-7,0
Pratik Özgül Ağırlık, g/cm^3	2,404	-
Stabilite, kg	935	Min 900
Boşluk, %	3,99	3-5
Asfaltla Dolu Boşluk, %	71,9	65-75
V.M.A, %	14,2	14-16
Akma, mm	3,38	2-4

Çizelge 5.21.'de de görüleceği gibi %15 RAP'lı karışımın Marshall dizaynı sonuçları şartname kriterlerini sağlamaktadır. Yine VMA değeri (14,2) şartnamenin alt limitine yakın olmakla birlikte dizaynın VFA değeri (71,9) şartname limitini sağlıyor olması VMA değerinin yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.3. Marshall dizaynı grafikleri (%15 RAP).

5.2.3.3 %25 RAP karışımına ait bulguları

Yeni materyalin %75'i ve RAP malzemesinin %25'i ile oluşturulan karışımın Marshall dizaynı sonucu elde edilen veriler Çizelge 5.22.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.22. %25 RAP'lı karışımın marshall dizayn verileri.

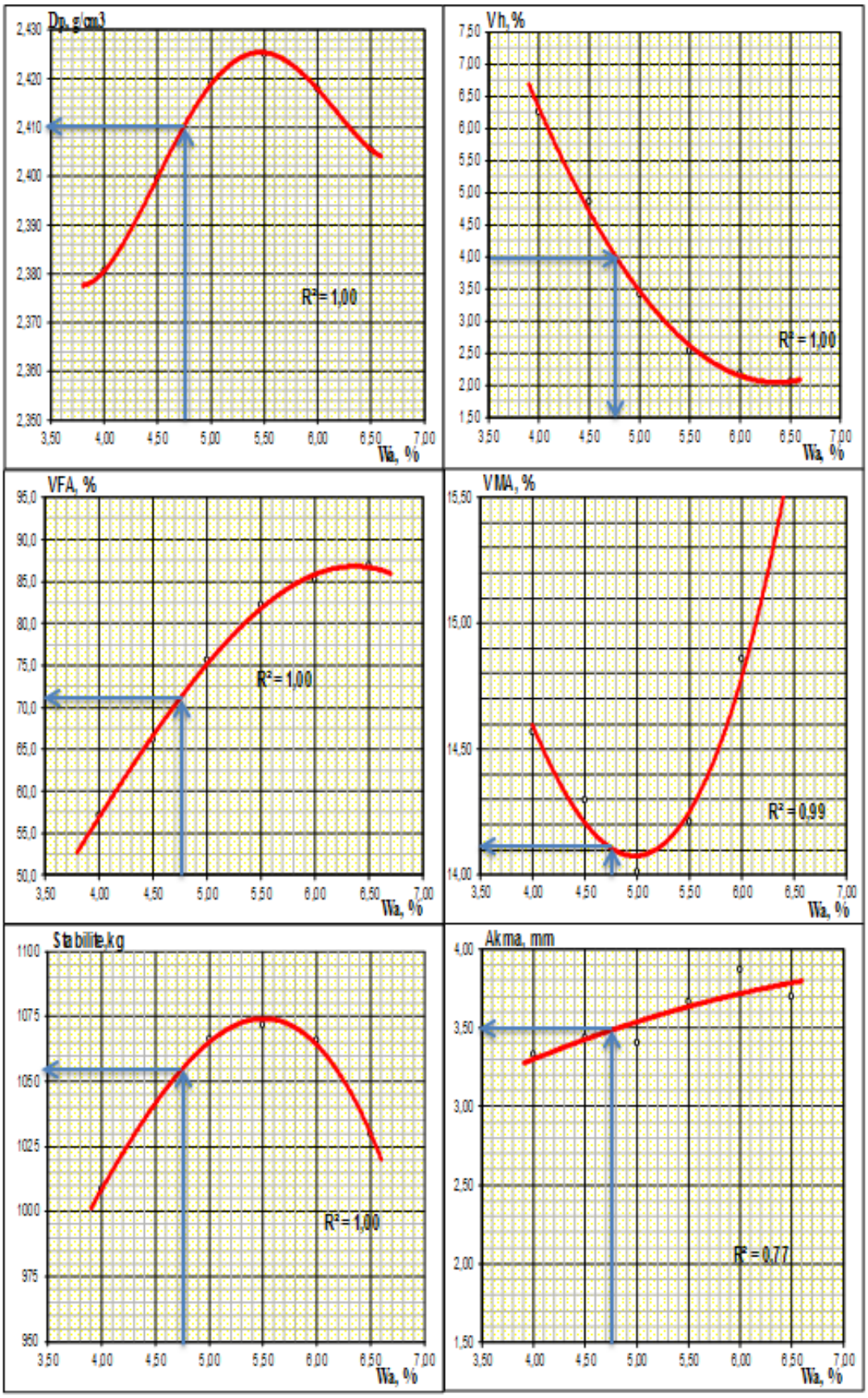
Bitüm %	Dp t/m^3	Dt t/m^3	Vh %	VMA %	VFA %	Stabilite kg	Akma mm
4,0	2,381	2,539	6,25	14,57	57,1	1008	3,33
4,5	2,397	2,522	4,94	14,38	65,6	1014	3,43
5,0	2,419	2,505	3,42	14,01	75,6	1066	3,40
5,5	2,425	2,488	2,54	14,21	82,1	1072	3,67
6,0	2,418	2,472	2,19	14,86	85,3	1066	3,87
6,5	2,409	2,456	1,91	15,57	87,7	1030	3,70

Çizelge 5.22.'deki veriler kullanılarak hazırlanan marshall grafikleri Şekil 5.4.'de sunulmaktadır. %25 RAP malzemesiyle hazırlanan marshall dizaynında optimum bitüm %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm olarak seçilmiş ve diğer parametreler bu bitüm değeri ile kontrol edilmiştir. Dizayn sonuçları Çizelge 5.23.'de sunulmuştur.

Çizelge 5.23. Dizayn sonuçları.

Marshall Dizaynı Parametreleri	**Dizayn Sonuçları**	**Şartname Limitleri**
Optimum Bitüm, %	4,75	4,0-7,0
Pratik Özgül Ağırlık, g/cm^3	2,410	-
Stabilite, kg	1060	Min 900
Boşluk, %	4,01	3-5
Asfaltla Dolu Boşluk, %	71,4	65-75
V.M.A, %	14,1	14-16
Akma, mm	3,50	2-4

Çizelge 5.23.'de de görüleceği gibi %25 RAP'lı karışımın Marshall dizaynı sonuçları şartname kriterlerini sağlamaktadır. Bu karışımın Marshall dizaynı VMA değeri (%14,1) şartname limitlerinin alt sınırına (min. %14) yakın olmakla birlikte VFA değerinin şartname kriterlerini sağlaması, VMA değerinin yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4. Marshall dizaynı grafikleri (%25 RAP).

5.2.3.4 %30 RAP karışımına ait bulguları

Yeni materyalin %70'i ve RAP malzemesinin %30'u ile oluşturulan karışımın Marshall dizaynı sonucu elde edilen veriler Çizelge 5.24.'te gösterilmiştir. %30 RAP karışımı içerisinde, RAP malzemesinin ihtiva ettiği bitümün %3'ü kadar VIATOP® plus RC marka gençleştirici katkı maddesi ilave edilmiştir.

Çizelge 5.24. %30 RAP'lı karışımın marshall dizayn verileri.

Bitüm %	Dp t/m^3	Dt t/m^3	Vh %	VMA %	VFA %	Stabilite kg	Akma mm
4,0	2,379	2,545	6,51	14,77	55,9	1001	3,33
4,5	2,408	2,527	4,72	14,15	66,6	1059	3,43
5,0	2,417	2,510	3,70	14,23	74,0	1061	3,40
5,5	2,427	2,494	2,67	14,30	81,3	1131	3,67
6,0	2,426	2,477	2,07	14,74	85,9	1100	3,87
6,5	2,423	2,461	1,57	15,25	89,7	1097	3,70

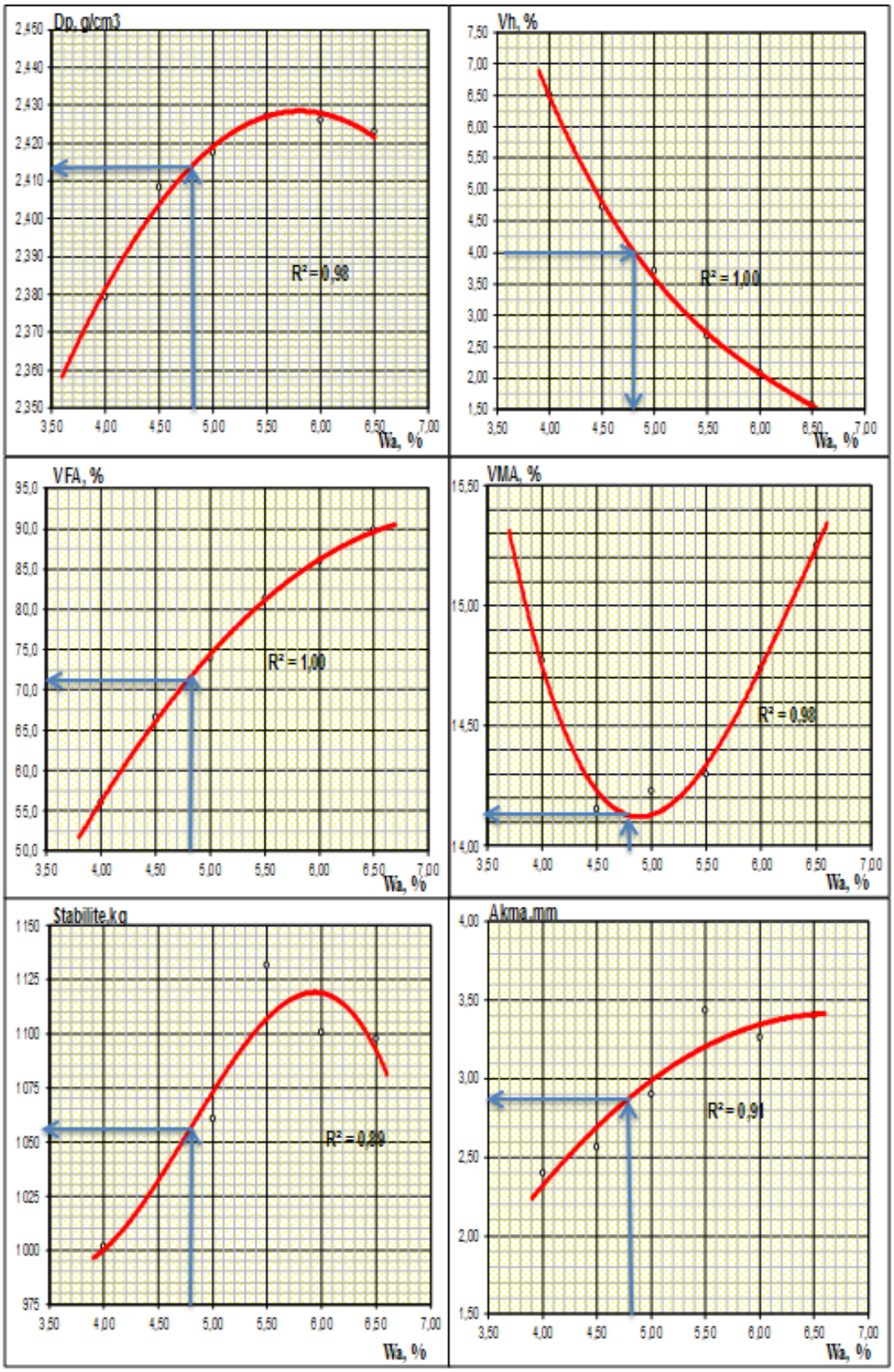
Çizelge 5.24.'teki veriler kullanılarak hazırlanan marshall grafikleri Şekil 5.5.'de sunulmuştur. %30 RAP malzemesiyle hazırlanan marshall dizaynında optimum bitüm %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm olarak seçilmiş ve diğer parametreler bu bitüm değeri ile kontrol edilmiştir. Dizayn sonuçları Çizelge 5.25.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.25. Dizayn sonuçları.

Marshall Dizaynı Parametreleri	**Dizayn Sonuçları**	**Şartname Limitleri**
Optimum Bitüm, %	4,80	4,0-7,0
Pratik Özgül Ağırlık, g/cm^3	2,414	-
Stabilite, kg	1055	Min 900
Boşluk, %	3,99	3-5
Asfaltla Dolu Boşluk, %	71,9	65-75
V.M.A, %	14,2	14-16
Akma, mm	2,90	2-4

Çizelge 5.25.'de de görüleceği gibi %30 RAP'lı karışımın Marshall dizaynı sonuçları şartname kriterlerini sağlamaktadır. Bu karışımında diğer karışımlar gibi Marshall dizaynı VMA değeri (%14,1) şartname limitlerinin alt sınırına (min. %14) yakın

olmakla birlikte VFA değerinin şartname kriterlerini sağlaması, VMA değerinin yeterli olduğunu göstermektedir.

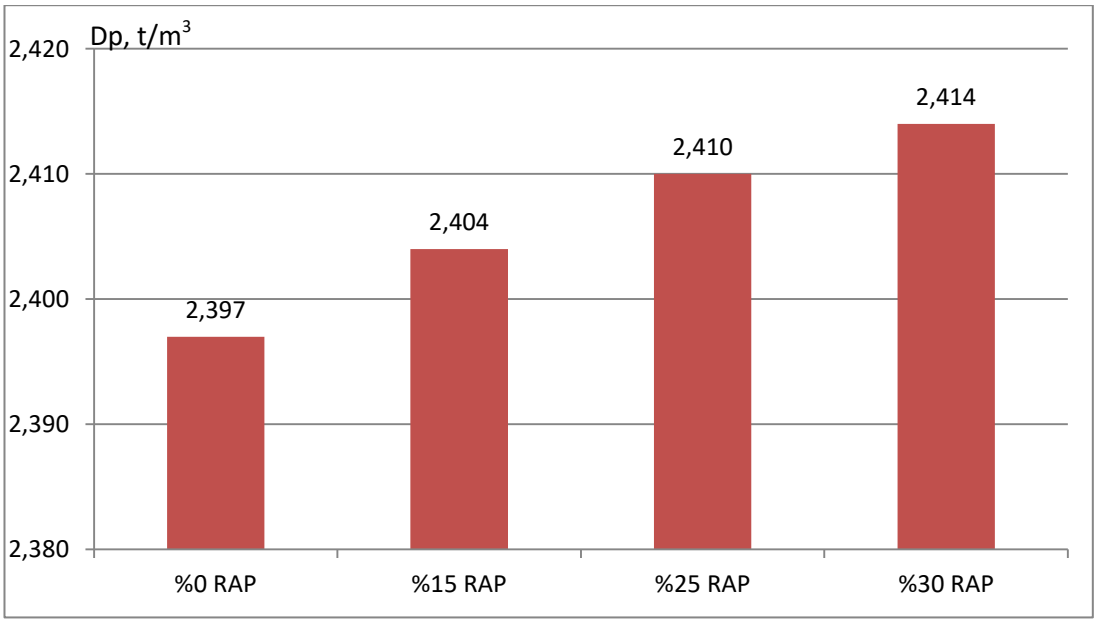


Şekil 5.5. Marshall dizaynı grafikleri (%30 RAP).

5.2.3.5 Karışımlara Ait Marshall Parametrelerinin Kıyaslanması

Yeni materyal (%0 RAP), %15, %25 ve %30 RAP içeren karışımların Marshall dizaynı sonucunda bulunan parametre değerleri grafikler üzerinde karşılaştırılmıştır. Grafiklerde sunulan %30 RAP karışımı, %3 oranında VIATOP® plus RC gençleştirici ihtiva etmektedir.

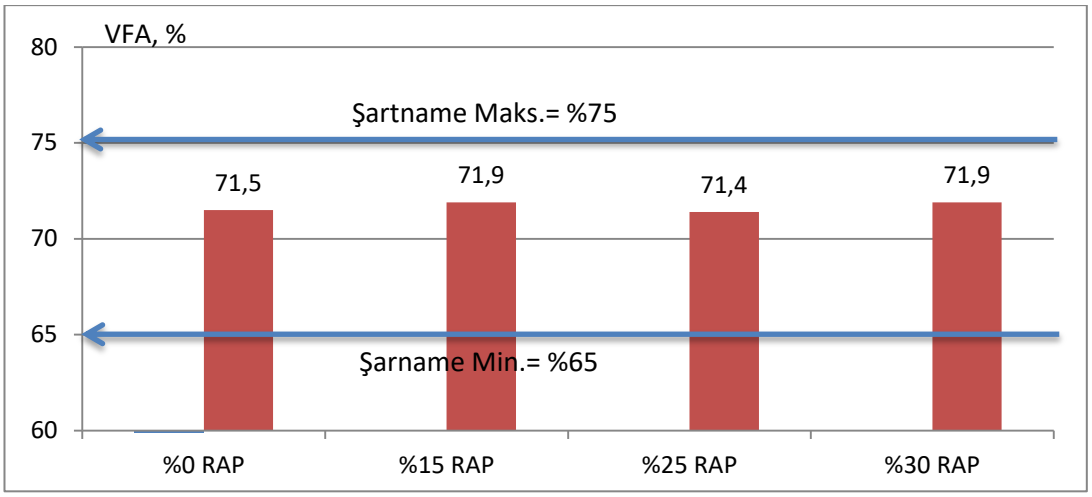
Yeni materyal, %15, %25 ve %30 RAP içeren karışımların Marshall dizaynı sonucu bulunan Dp değerleri Şekil 5.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Her karışıma ait marshal dizaynı Dp değerleri.

Şekil 5.6.'da gösterilen Dp grafiğinde görüleceği gibi karışım içerisindeki RAP miktarı arttıkça karışımın pratik özgül ağırlığının arttığı tespit edilmiştir.

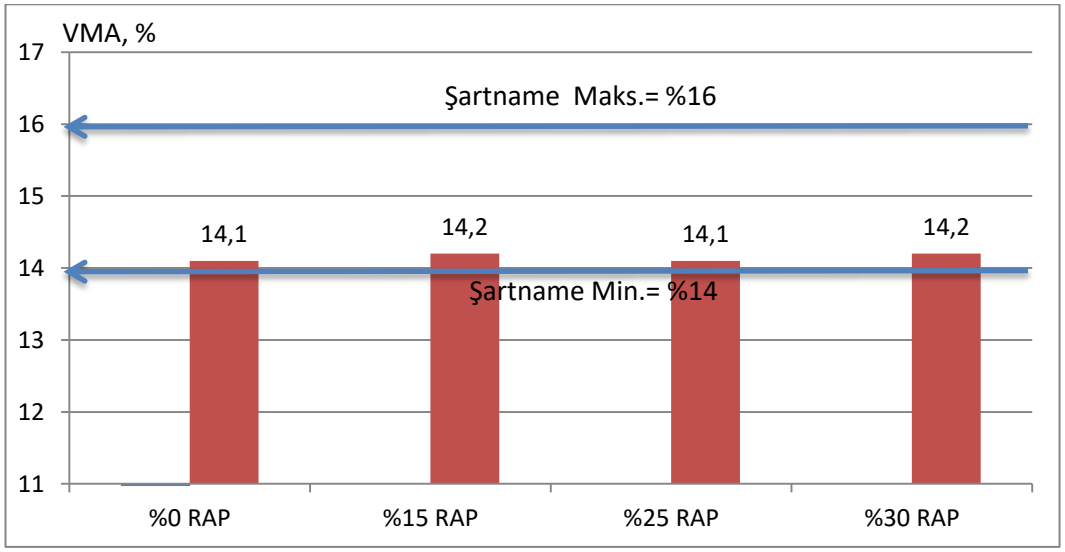
Marshall dizaynları sonucu karışımlara ait VFA değerleri Şekil 5.7.'deki grafikte sunulmuştur.



Şekil 5.7. Her karışıma ait marshall dizaynı VFA değerleri.

Şekil 5.7.'de gösterilen VFA grafiğinde görüleceği gibi karışımların VFA değeri birbirlerine yakın olmakla birlikte tüm karışımlar KTŞ'de aşınma tabakası dizaynı için istenen %65-75 aralığına girmektedir.

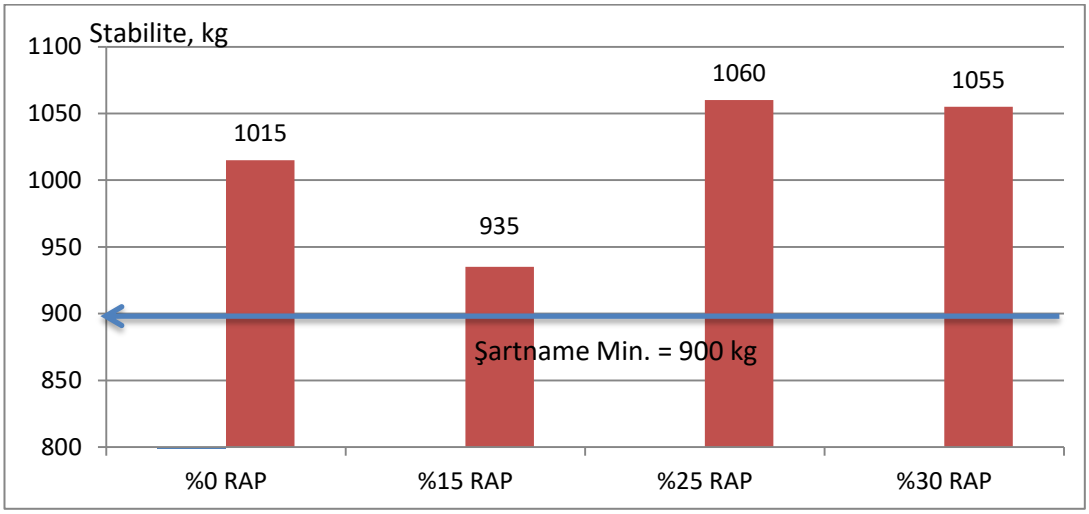
Karışımların Marshall dizaynları sonucunda bulunan VMA değerleri Şekil 5.8.'deki grafikte sunulmuştur.



Şekil 5.8. Her karışıma ait marshall dizaynı VMA değerleri.

Şekil 5.8.'de karışımlara ait sunulan VMA grafiğinde görüleceği gibi karışımların VMA değeri birbirlerine yakın olmakla birlikte tüm karışımlar alt sınıra yakın olsa da KTŞ'de aşınma tabakası dizaynı için istenen %14-16 aralığına girmektedir.

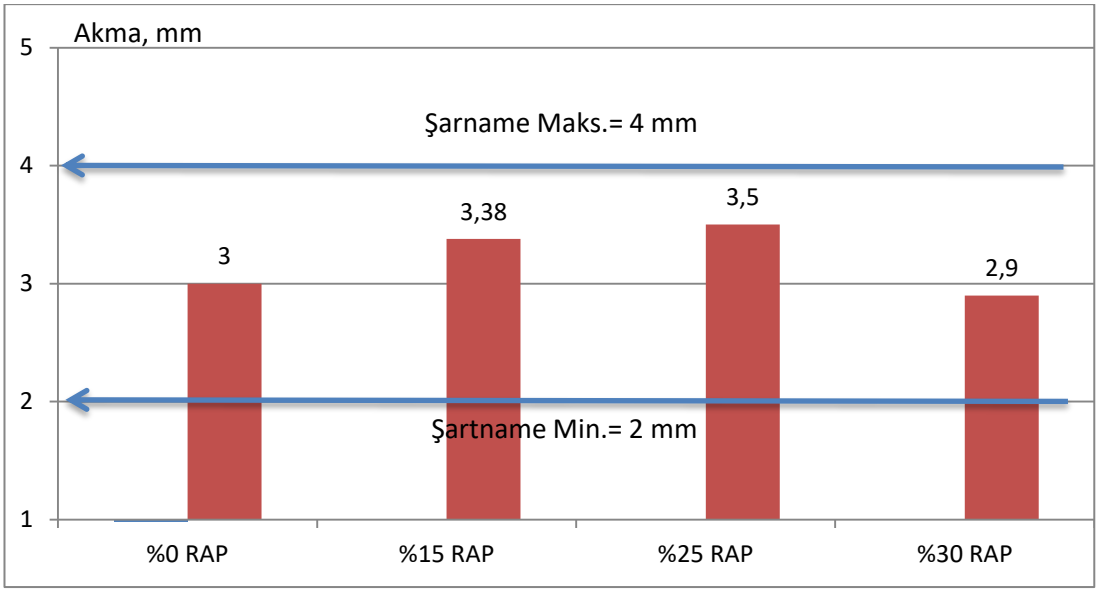
Karışımların Marshall dizaynları sonucunda bulunan karışımlara ait stabilite değerleri Şekil 5.9.'deki grafikte sunulmuştur.



Şekil 5.9. Her karışıma ait marshal dizaynı stabilite değerleri.

Şekil 5.9.'de karışımlara ait Marshall dizaynı sonucu bulunan stabilite değerleri grafiğinde görüleceği gibi karışım içerisindeki RAP miktarı arttıkça stabilite değeri artmış sadece %15 RAP içeren karışımda stabilite değeri RAP'sız karışıma göre düşmüştür. Ancak bu halde bile tüm karışımların stabilite değeri KTŞ'de aşınma tabakası dizaynı için istenen minimum 900 kg stabilite değerini sağlamaktadır.

Yine karışımların Marshall dizaynları sonucunda bulunan karışımlara ait akma değerleri Şekil 5.10.'deki grafikte sunulmuştur.



Şekil 5.10. Her karışıma ait marshal dizaynı akma değerleri.

Şekil 5.10.'de karışımlara ait sunulan akma grafiğinde görüleceği gibi karışımların akma değerleri KTŞ'de aşınma tabakası dizaynı için istenen 2-4 mm aralığına girmektedir.

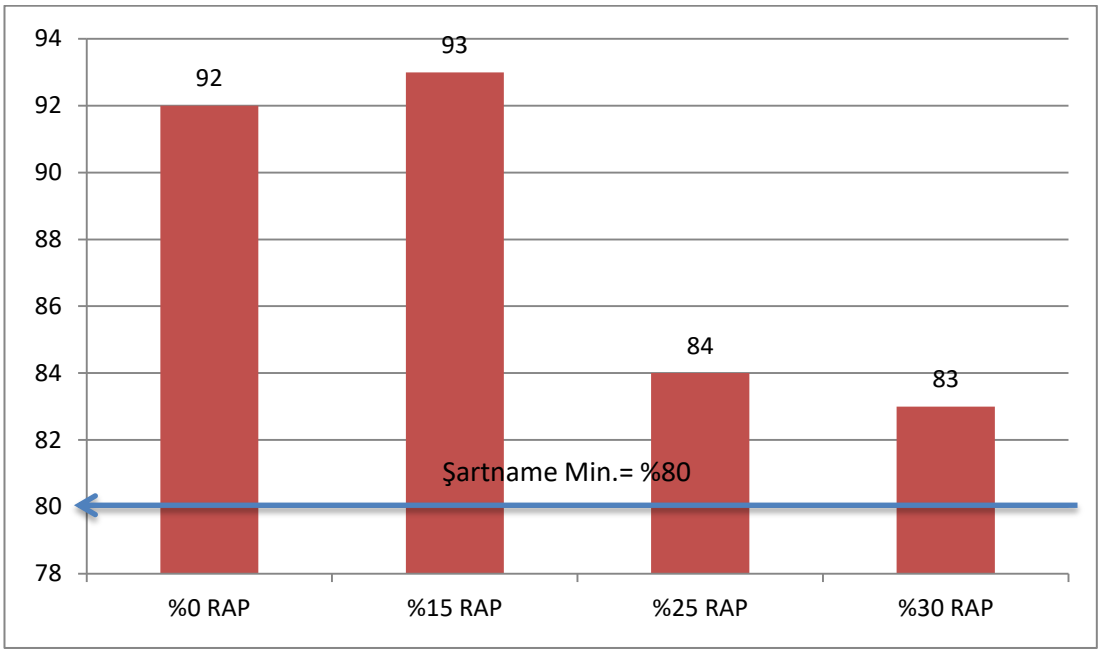
5.3 İndirek Çekme Mukavemeti Deneyi Bulguları

Tüm karışımların suya karşı hassasiyetleri indirek çekme mukavemeti yöntemi ile tespit edilmiştir. Marshall dizaynında optimum bitümü tespit edilmiş karışımların optimum bitüm ile oluşturulan koşullandırılmış ve koşullandırılmamış Marshall briketlerine ait ITS deneyi kırılma değerleri ve ITS oranları Çizelge 5.26.'da verilmektedir.

Çizelge 5.26. Karışımlara ait ITS sonuçları

Karışım	Koşullandırılmamış Numunelerin ∑ITS Mpa	Koşullandırılmış Numunelerin ∑ITS Mpa	ITS Oranı, %	Şartname Limiti min.%
%0 RAP	0,870	0,797	92	80
%15 RAP	1,291	1,195	93	
%25 RAP	1,489	1,252	84	
%30 RAP	1,252	1,034	83	

Şekil 5.11.'de görüldüğü gibi tüm karışımların ITS oranları şartname limitini sağlamaktadır.



Şekil 5.11. Her karışıma ait ITS değerleri.

5.4 Tekerlek İzinde Oturma Deneyi Bulguları

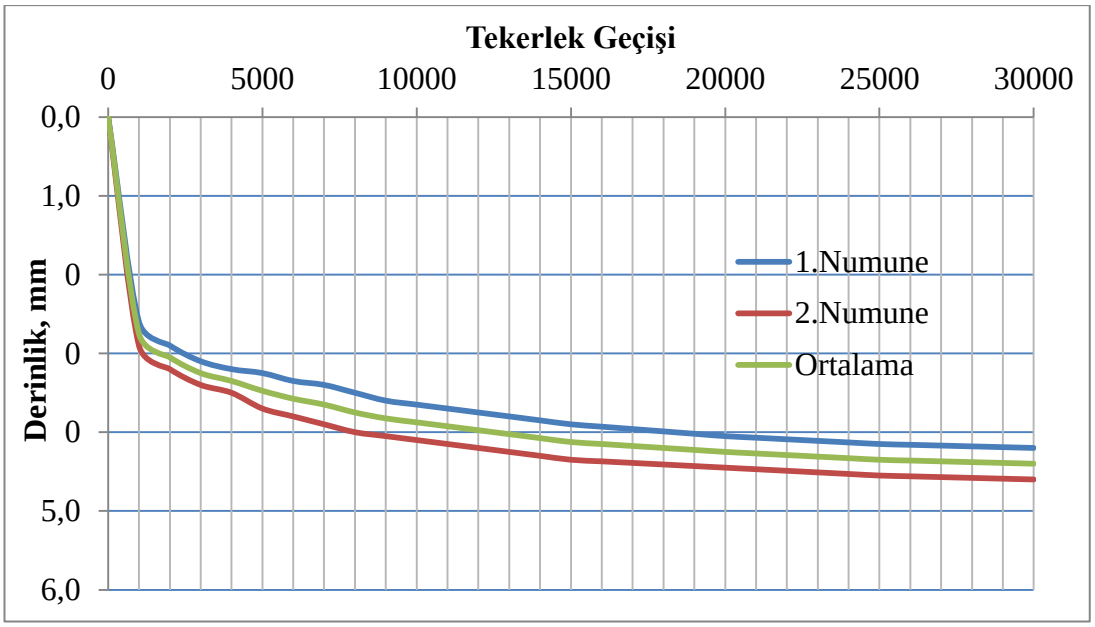
Tekerlek izinde oturmalar, aşınma tabakasında görülen en sık plastik deformasyon tipidir. Yük ve sıcaklıkla doğru orantılıdır. Genellikle tekerlek izinde oturma karşı direnci köşeli, pürüzlü ve sağlam agregalar sağlamakla birlikte daha sert bir bitümle karışımın tekerlek izi performansı artırılabilmektedir.

Yeni materyalle (%0 RAP) Marshall dizaynı sonucuna göre hazırlanan karışım numunesine yapılan tekerlek izinde oturma deneyi sonuçları Çizelge 5.27.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.27. Yeni materyal karışımına ait tekerlek izi deneyi sonuçları.

Teker Geçişi	1.Numune T.İ.O derinliği mm	2.Numune T.İ.O derinliği mm	Ortalama mm	Şartname Limiti mm
0	0	0	0	
5000	3,2	3,7	3,5	
10000	3,7	4,2	3,9	
15000	3,9	4,3	4,1	
20000	**4,0**	**4,5**	**4,3**	**≤4,5**
25000	4,1	4,6	4,4	
30000	4,2	4,6	4,4	

Yeni materyal (%0 RAP) numunesinde tekerlek geçişlerinde meydana gelen çökmeler Şekil 5.12.'daki grafikte gösterilmektedir.



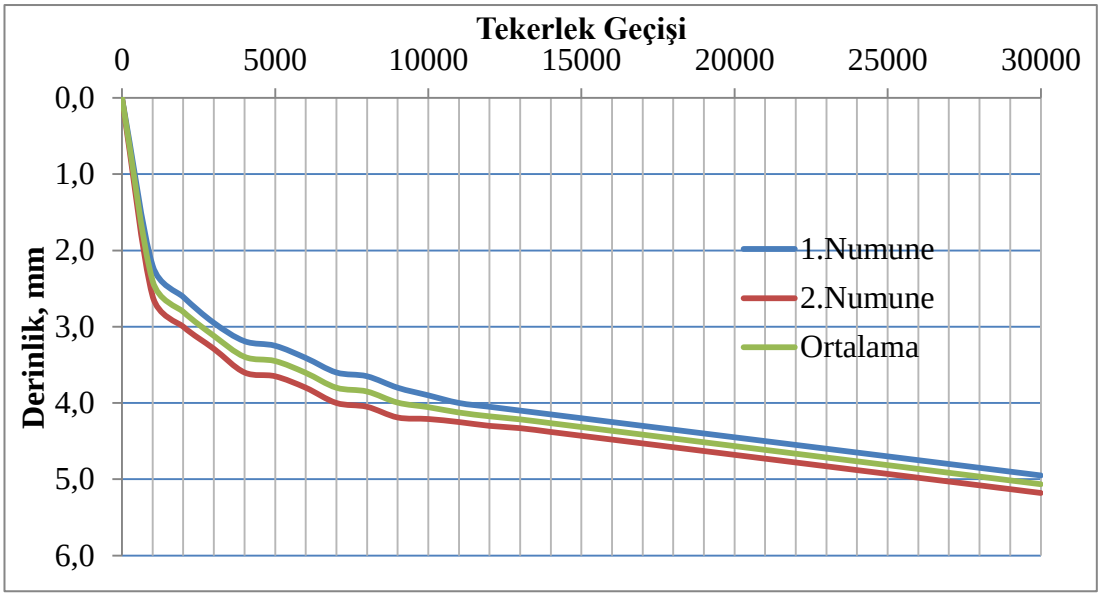
Şekil 5.12. Yeni materyal karışımı tekerlek izi grafiği.

Marshall dizaynı sonucuna göre hazırlanan %15 RAP karışım numunesine yapılan tekerlek izinde oturma deneyi sonuçları Çizelge 5.28.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.28. %15 RAP'lı karışıma ait tekerlek izi deneyi sonuçları.

Teker Geçişi	1.Numune T.İ.O derinliği mm	2.Numune T.İ.O derinliği mm	Ortalama mm	Şartname Limiti mm
0	0	0	0	
5000	3,3	3,7	3,5	
10000	3,9	4,2	4,1	
15000	4,2	4,4	4,3	
20000	4,5	4,7	4,6	**≤4,5**
25000	4,7	4,9	4,8	
30000	5,0	5,2	5,1	

%15 RAP numunesinde tekerleğin geçişlerinde meydana gelen çökmeler Şekil 5.13.'deki grafikte gösterilmektedir.



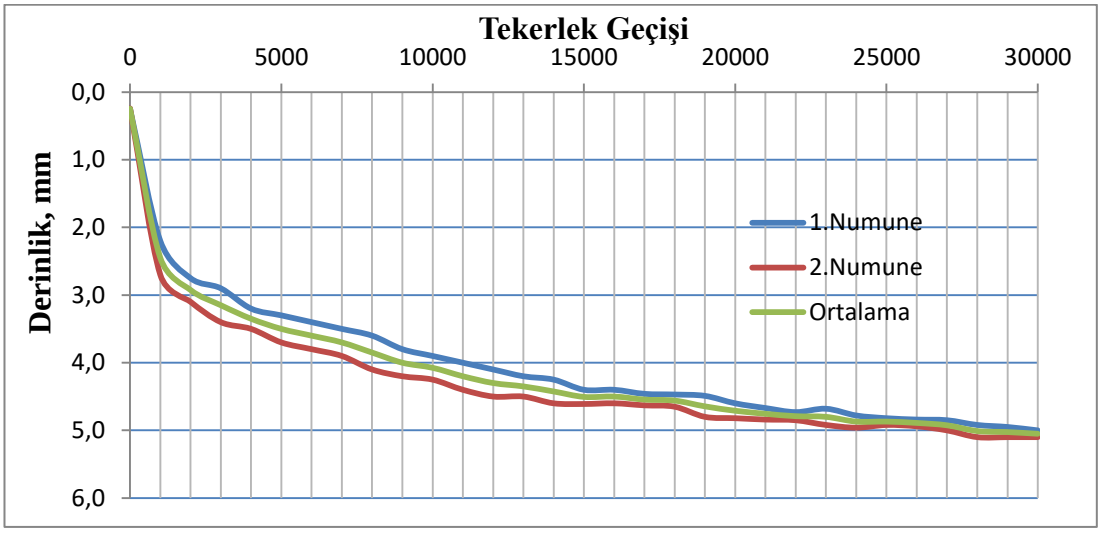
Şekil 5.13. %15 RAP karışımı tekerlek izi grafiği.

Marshall dizaynı sonucuna göre hazırlanan %25 RAP karışım numunesine yapılan tekerlek izinde oturma deneyi sonuçları Çizelge 5.29.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.29. %25 RAP'lı karışıma ait tekerlek izi deneyi sonuçları.

Teker Geçişi	1.Numune T.İ.O derinliği mm	2.Numune T.İ.O derinliği mm	Ortalama mm	Şartname Limiti mm
0	0,3	0,2	0,3	
5000	3,3	3,7	3,5	
10000	3,9	4,3	4,1	
15000	4,4	4,6	4,5	
20000	4,6	4,8	4,7	**≤4,5**
25000	4,8	4,9	4,9	
30000	5,1	5,2	5,1	

%25 RAP numunesinde tekerleğin geçişlerinde meydana gelen çökmeler Şekil 5.14.'daki grafikte gösterilmektedir.



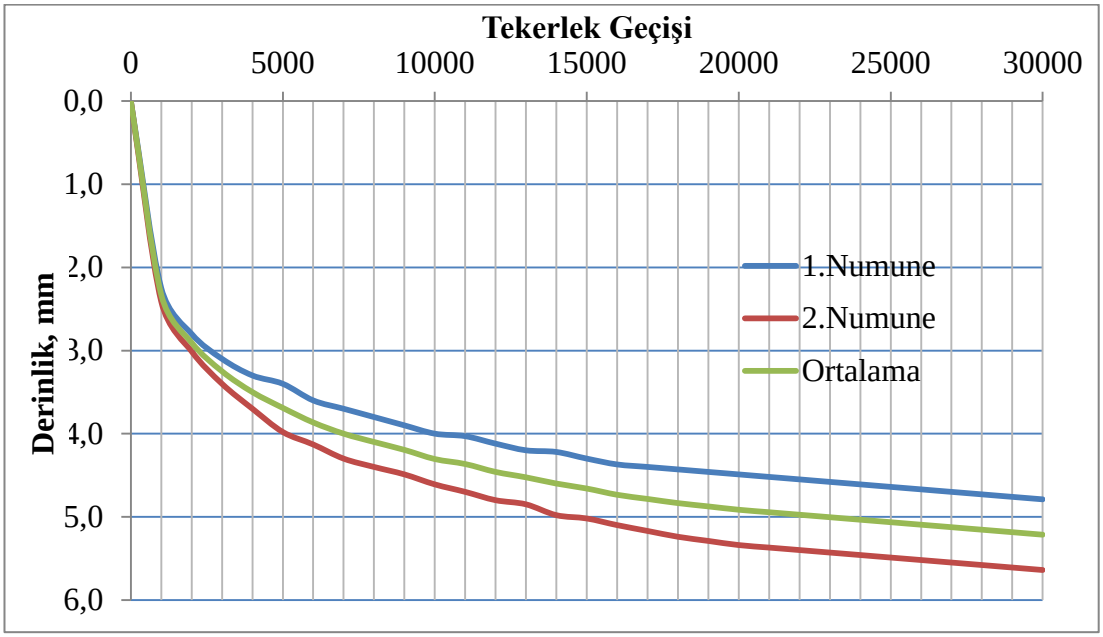
Şekil 5.14. %25 RAP karışımı tekerlek izi grafiği.

Marshall dizaynı sonucuna göre hazırlanan %25 RAP karışım numunesine yapılan tekerlek izinde oturma deneyi sonuçları Çizelge 5.30.'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.30. %30 RAP'lı karışıma ait tekerlek izi deneyi sonuçları.

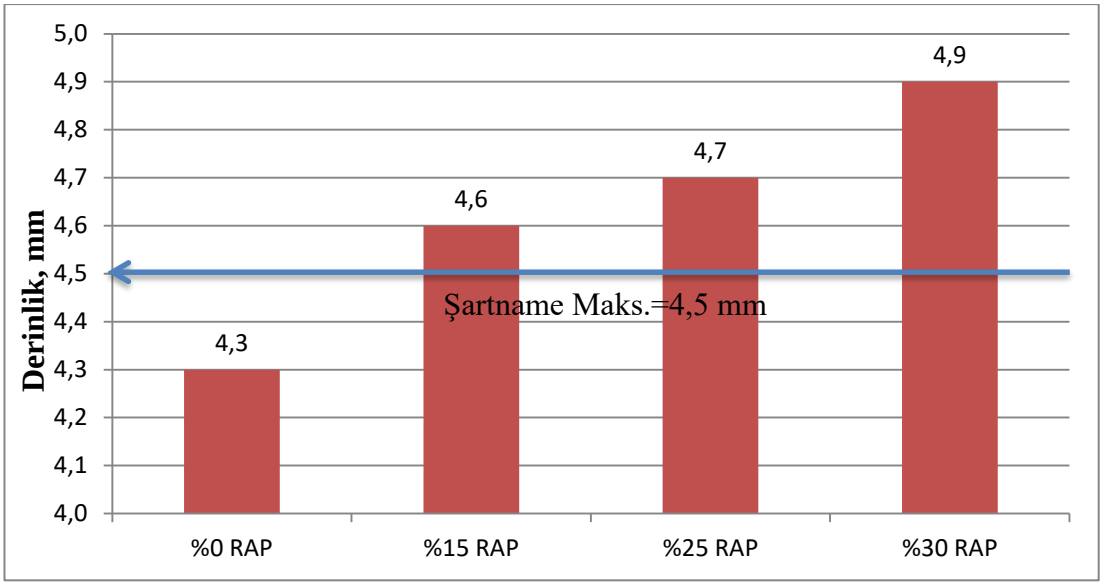
Teker Geçişi	1.Numune T.İ.O derinliği mm	2.Numune T.İ.O derinliği mm	Ortalama mm	Şartname Limiti mm
0	0	0	0	
5000	2,3	2,4	2,3	
10000	3,4	4,0	3,7	
15000	4,3	5,0	4,7	
20000	4,5	5,3	4,9	**≤4,5**
25000	4,6	5,5	5,1	
30000	4,8	5,6	5,2	

%30 RAP numunesinde tekerleğin geçişlerinde meydana gelen çökmeler Şekil 5.15.'deki grafikte gösterilmektedir.



Şekil 5.15. %30 RAP karışımı tekerlek izi grafiği.

Şartnamede belirtilen 20000 tekerlek geçişinde karışımlarda oluşan tekerlek izi derinlikleri Şekil 5.16.'da sunulmuştur.



Şekil 5.16. Karışımlara ait 20000 teker geçişinde oluşan tekerlek izi derinlikleri.

Şekil 5.16.'da da görüldüğü gibi yeni materyal (%0 RAP) ile hazırlanan karışım şartname limitini sağlamamış, RAP ihtiva eden karışımlar sağlamamıştır.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında bozulmuş aşınma tabakasının kazılması sonucu ortaya çıkan malzemenin RAP malzemesinin tekrar aşınma tabakasında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla ilkin yeni ve yeni ile geri kazınım bitüm karışımlarının penetrasyon, yumuşama noktası, RTFOT sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası, RTFOT+PAV sonrası BBR ve DSR deneyleri yapılmıştır. Yeni materyal (%0 RAP) ve RAP malzemeli karışımlara Marshall dizaynı, indirek çekme deneyi ve tekerlek izinde oturma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular ise kıyaslanmıştır.

1. Yeni bitüm ve yeni bitüm ile geri kazanılan bitüm numunelerine yapılan penetrasyon deneyleri sonucu %30 geri kazanım bitüm ihtiva eden bitüm karışımının penetrasyon sonucu 50/70 bitüm sınıfını sağlamadığından dolayı bu karışıma, karışımdaki geri kazazılan bitümün %3 kadar VIATOP® plus RC marka gençleştirici madde katılmış ve sonuçta %30 geri kazanılan bitüm karışımı 50/70 penetrasyon sınıfını sağlamıştır. RTFOT sonrası tüm bitümlerin kalıcı penetrasyon ve yumuşama noktası yükselmesi değerleri KTŞ'de istenen 50/70 penetrasyon sınıfı bitümün değerlerini sağlamıştır.

2. Yeni ve yeni ile geri kazanılan bitüm karışımları RTFOT+PAV'da koşullandırıldıktan sonra BBR ve DSR deneyleri yapılmış, -6 ℃'de yapılan BBR deneyinde %15, %25, %30 geri kazanım ihtiva eden bitüm karışımları şartname limitlerini sağlarken yeni bitüm sağlamamıştır. En iyi sonucu ise %3 oranında VIATOP® plus RC gençleştirici katkı maddesi ihtiva eden %30 geri kazanım bitüm karışımı vermiştir. DSR deneyinde ise en iyi sonucu %3 oranında VIATOP® plus RC gençleştirici katkı maddesi ihtiva eden %30 geri kazanım bitüm karışımı vermiş ve bunu sırasıyla yemi bitüm ve %15, %25 geri kazanılan bitüm karışımı takip etmiştir.

3. Aynı agrega gradasyonuna sahip karışımlara yapılan Marshall dizaynı sonucunda tüm karışımların aslfalt dolu boşluk değeri, agregalar arası boşluk parametresi açısından yine tüm karışımların agregalar arası boşluk değeri ve akma değeri KTŞ'de istenen aralığı sağlamıştır. Karışımların stabilite değeri ise KTŞ'de istenen minimum değerin üzerinde çıkmıştır. En yüksek stabilite

değeri %25 RAP ihtiva eden karışım verirken onu sırasıyla ihtiva eden %30 (%3 oranında VIATOP® plus RC), %15 RAP ve yeni materyal karışımları izlemiştir.

4. Marshall dizaynında tespit edilen optimum bitüm içeriğine göre hazırlanan briketlere yapılan indirek çekme deneyinde tüm karışımların indirek çekme mukavemeti oranı KTŞ'de istenen minimum oranı sağlamıştır. En yüksek ITS oranı %15 RAP'lı karışım verirken onu sırasıyla %0, %25, %30 RAP karışımları takip etmiştir.

5. Karışımların Marshall dizaynı sonucu bulunan optimum bitüm ve pratik özgül ağırlık değerlerine göre hazırlanan numunelere tekerlek izinde oturma deneyi yapılmış, sadece %0 RAP karışımı KTŞ'de istenen maksimum sonucun altında kalmıştır. Buna karşın karışım içerisindeki RAP miktarı arttıkça tekerlek izi derinliği de artmıştır. Bunda bu çalışmada kullanılan RAP malzemesinin, mevcut kaplamanın tekerlek izinde oturan kesimlerinin kazılması sonucu ortaya çıkan malzemeden temin edilmesi en büyük etmen olarak görülmektedir. Bununla birlikte RAP'lı karışımlar şartname kriterini sağlamasa da kritere oldukça yakın kalmıştır. Bu ise RAP'lı karışımlarda yapılacak birtakım kritik değişikliklerle RAP'lı karışımların tekerlek izi dirençleri artırabileceğini sonucunu doğurmuştur. Örneğin karışıma daha pürüzlü, köşeli yeni agreganın dahil edilmesi, agrega gradasyonunun kabalaştırılarak karışımın stabilitesinin artırılması, daha sert bir bitüm kullanılması vb. gibi değişikliklerle RAP'lı karışımların tekerlek izi performansları iyileştirilebilmektedir.

KAYNAKLAR

AASHTO TP 48, 1997. Standard test method for viscosity determination of asphalt binder using rotational viscometer, American Association of State Higway and Transportation Officials, Washington, USA.

Acar, G., 2011. Bitümlü sıcak karışım ve uygulamaları, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara.

Akbulut, H., İçağa, Y. ve Gürer, C., 2003. Atık agregaların asfalt yol kaplamalarında tekrar kullanım imkanları ve CEN standartları, Ill Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul, 272-276.

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

Arapoğlu, A.S., 2015. Bozulmuş asfalt kaplamaların geri dönüşüm maliyet analizi ve optimum geri kazanım mesafesinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Arık, A., 1998. Balıkesir ili çevresindeki karayollarında esnek üstyapı bozulmalarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

Arıkan, E., 2014. Sathi kaplamalı yollarda asfalt emülsiyonu kullanımının avantajları, Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Der., 29, 4, 251-260.

ARRA, 2001. Asphalt recycling and reclaiming association, asphalt recycling manual, USA, 269.

Asphalt Institute, 2014. Asphalt mix desing methods MS-2, Asphalt Institute, USA.

ASTM C-142M, 2017. Standard test method for clay lumps and friable particles in aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.

Byrne, D.A., 2005. Recycling of asphalt pavements in new bituminous, Degree of Doctor of Philosophy, Napier University, School of Built Environment, Scotland.

California Department of Transportation, 2001. Felexible pavement rehabilitation manual, USA, 154.

Çubuk, K., 1990. Use of reclaimed asphalt pavement as a bituminous base course, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Daniel, J.S., ve Lachance, A., 2005. Mechanistic and volumetric properties of asphalt mixtures with recycled asphalt pavement. Journal of the Transportation Research Board, 1929, Transportation Research Board of the National Academies, USA, 28–36.

Demirel, Z., Aray, S., Kadıoğlu, M. ve Orhan, F., 1991. Toprak ve stabilizasyon laboratuvarı el kitabı, KGM., Ankara, 180.

Doğan, O., 2006. Esnek üstyapılı devlet yollarındaki bozulmaların bulanık mantık ile tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Donn, E.H., 2009. Recycling bituminous pavements, Research Engineer Joint Highway Research Project School of Civil Engineering, Purdue University, Indiana, 91-96.

EAPA, 2011. Fit for tomorrow, asphalt paving: safe comfortable sustainable, USA, 256.

Falchetto, A.C., Moon, K.H. ve Wistuba, M.P., 2014. Microstructural analysis and rheological modelling of asphalt mixtures containing recycled asphalt materials 7, 6254, 80.

Güngör, A., Orhan, F., Kaşak, S., Çalışkol A. ve Yönter G., 2008. Kazınmış asfalt kaplamaların yeniden kullanımı KGM uygulamaları, Karayolları Genel Müdürlüğü AR-GE Dairesi Başkanlığı, Ankara, 10.

Güngör, A., Orhan, F., Demir, B., Sağlık, A., Kaşak, S. ve Demircan, N., 2013. Ilık karışım asfalt katkıları ve teknolojileri, KGM., Ankara, 156.

Gürer, C., Akbulut, H. ve Kürklü, G., 2004. İnşaat endüstrisinde geri dönüşüm ve bir hammadde kaynağı olarak farklı yapı malzemelerinin yeniden değerlendirilmesi, 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Bildiriler Kitabı, 28-36.

Hanlı, E., 2009. Esnek yol üstyapısında oluşan bozulmalar ve değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., 2001. Asfalt ve uygulamaları, İSFALT yayınları, İstanbul.

Irving, K., 1998. Asphalt materials and mix design manual, William Andrew Publishing, 249.

Izaks, R., Haritonovs, V., Klasa, I. ve Zaumanis, M., 2015. Hot mix asphalt with high rap content, Procedia Engineering, 114, 676-684.

Jones G.M., 2010. Recycling of bitumenous pavements on the road, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 48, 1979, 240-251.

KGM, 2013. Karayolları teknik şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 403, 525, 4.

KGM, 2016. Araştırma ve geliştirme projeleri, asfalt kaplamaların plentte geri kazanımı, Ankara.

Kuloğlu, N., Yılmaz, M. ve Kök, B.V., 2008. Farklı penetrasyon derecelerine sahip asfalt çimentolarının kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının ve

işlenebilirliklerinin incelenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 13, 1, 81-89.

Kuloğlu, N., 2000. Bitüm ve bitümlü sıcak karışımların rijitliğine etki eden parametreler, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Lav, A.H. ve Lav, M.A., 2004. Shell bitüm el kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, 3, 334 s.

Mallick, B.R., 2005. Lecture notes, a 3-day workshop on recycling and other pavement rehabilitation methods, IIT Kanpur, 8-10th February, 58-350.

Mazlum, M.S., 2014. Ekonomik ömrünü tamamlamış asfalt kaplamaların kazınarak bitümlü sıcak karışımlarda yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Miliutenko, S., Bjorklund, A. ve Carlsson, A., 2012. Opportunities for environmentally improved asphalt recycling: the example of Sweden Journal of cleaner production, Sweden, 43, 156-65.

Mogawer, W.S., 2007. Design of high percentage recycled asphalt pavement hma with warm mix technology fort hin mix applications, Annuel Conference, USA, 1-38.

Mosey, J.R., ve Defoe, J.H., 1979. In-place recycling of asphalt pavements, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, USA, 48, 261-272.

Orhan, F., 2012(a). Asfaltın yerinde soğuk yeniden kullanım, asfaltta geri dönüşüm teknikleri ve uygulamaları semineri, Ankara.

Orhan, F,. 2012(b). Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları, KGM, Ankara, 18-20.

Oruç, Ş., Yılmaz, B. ve Mazlum, M.S., 2017. Geri kazanılan asfalt kaplamaların sıcak asfalt karışımlarda yeniden kullanabilirliğinin araştırılması, Fırat Üniversitesi Mühendislik ve Bilim Dergisi, 30, 1, 87-93.

Önal, M.A. ve Kahramangil, M., 2012. Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı, Ankara, 200.

Pamuk, İ., 1986. Bozulmuş bitümlü yol kaplamalarının yeniden kullanılması yönteminin Türkiye'de uygulanabilirliği, Doktora Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

PIARC Technical Committee on Flexible Roads, 1999. Recycling of existing flexible pavements, July, 2-84060-139-7, 67.

Sağlık, A. ve Güngör, G.A., 2015. Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü AR-GE Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Sağlık, A., Demir, B. ve Güngör G.A., 2013. Kazınmış asfalt kaplamaların yerinde soğuk geri dönüşüm olarak kullanıma KGM uygulamaları, Karayolları Genel Müdürlüğü AR-GE Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Salta, İ., 2010. Bitümlü karışımların geri dönüşüm yöntemlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

State Of New York Department Of Transportation, 2015. Geotechnical engineering manual: design and construction guidelines for full depth reclamation of asphalt pavement, USA, 1-18.

Şengöz, B. ve Ağar, E., 2005. Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına etkisi, İTÜ Dergisi, D Müh., 4, 1, 71-82.

Tığdemir, M. ve Dhannoon, H.A., 2017. Irak karayolları için taguchi yöntemi kullanılarak geri kazanım asfalt malzemeleri ile binder tabakası dizaynı, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5, 2, 399-409.

TS EN 933-9, 2010. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - bölüm 9: ince malzeme tayini - metilen mavisi deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1367-2, 2010. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: magnezyum sülfat deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 15326, 2010. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - yoğunluk ve özgül kütle tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1097-1, 2011. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 1: aşınmaya karşı direncin tayin, (micro - deval), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 14769, 2012. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - basınçlı yaşlandırma kabı (pav) ile hızlandırılmış uzun süreli yaşlandırma işlemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 14771, 2012. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - eğilen kiriş reometresi (bbr), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 14770, 2012. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar- dinamik kesme reometresi (dsr), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1097-6, 2013. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12592, 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - çözünürlük tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12607-1, 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar – ısı ve hava etkisi altında sertleşme direncinin tayini – bölüm: rtfo yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1426, 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - iğne batma derinliği tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1427, 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - yumuşama noktası tayini - halka ve bilye yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 13108-1, 2016. Bitümlü karışımlar – malzeme özellikleri – bölüm 1: asfalt betonu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 13587, 2017. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - çekme deney yöntemiyle bitümlü bağlayıcıların çekme özelliklerinin belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN ISO 2592, 2017. Parlama ve yanma noktasının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Uluçaylı, M. ve Yavuz, A., 2002. Asfalt El Kitabı, İsfalt Bilimsel Yayınlar, İstanbul, 2, 570.

Umar, F. ve Ağar, E., 1985. Yol üstyapısı, 3. baskı, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

US Army Corps of Engineers, 2000. Hot-mix asphalt paving handbook, printed in the united states of america library of congress catalog card number LC 00-135314 ISBN 0-309-07157-7.

Ünsal, A. ve Şen, H., 2008. Beton ve beton malzemeleri laboratuvar deneyleri, Ankara, 237.

Van den bergh, W. ve Van de Ven, M., 2009. Hot recycling of asphalt: experiences in Flandersand the Netherlands Proc, Netherland.

Wallace, H.A. ve Martin, J.R., 1967. Asphalt pavement engineering, McGraw-Hill Inc., USA, 351.

Yılmaz, A.B., 2010. Eski asfalt kaplamaların ve lastik atıkların geri dönüştürülerek bitümlü sıcak karışımlarda yeniden kullanılması projesi TÜBİTAK sonuç raporu, Kocaeli.

Yılmaz, M., Kök, B.V. ve Kuloğlu, N., 2011. Karayolu esnek üstyapı malzemelerinin geri dönüşümünde köpük asfalt yönteminin kullanılması, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Elazığ, Bildiriler Kitabı, 81-85.

Yiğiter, H., 2011. Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi 1 Ders Kitabı 5-9.

Yoder, E.J. ve Witczak, M.W., 1975. Principles of pavement design, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication, Kanada.

URL-1 < http://www.asmud.org.tr/asfalt.php>, Erişim tarihi: 15.03.2018.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı **:** Mehmet Akif ERTAŞ

Adres **:** Büyük Sinan Mah. Ankara Cad. Kales Sitesi No:110/10

E-posta adresi **:** makifertas@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans **:** Selçuk Üniversitesi, 2004-2009

Yüksek Lisans **:** Aksaray Üniversitesi, 2012-

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2010-2011
2. Karayolları Genel Müdürlüğü 2011-

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER