

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GERİ KAZANILMIŞ ASFALT BETONU MALZEMESİNİN AŞINMA  
TABAKASINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Fadhil Sadeq AL-ALİ**

**Danışman  
Prof. Dr. Serdal TERZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA - 2016**



© 2016 [ Fadhil Sadeq AL-ALI ]

## TEZ ONAYI

**Fadhil Sadeq AL-ALİ** tarafından hazırlanan" **Geri Kazanılmış Asfalt Beton Malzemesinin Aşınma Tabakasında Kullanılabilirliğinin Araştırılması**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman**

**Prof. Dr. Serdal TERZİ**  
Süleyman Demirel Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Mehmet SALTAN**  
Süleyman Demirel Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT**  
Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Enstitü Müdürü**

**DOÇ.Dr.Yasin TUNCER**

|                            |    |
|----------------------------|----|
| ÖZET                       | 3  |
| ABSTRACT                   | 5  |
| TEŞEKKÜR                   | 7  |
| ÖZGEÇMİŞ                   | 9  |
| İÇİNDEKİLER                | 11 |
| 1. GİRİŞ                   | 13 |
| 1.1. Çalışmanın Amacı      | 13 |
| 2. YARARLANILAN KAYNAKLAR  | 15 |
| 2.1. Genel Kaynaklar       | 15 |
| 2.1.1. Kitaplar            | 15 |
| 2.1.2. Makaleler           | 16 |
| 2.2. Diğer Kaynaklar       | 17 |
| 2.2.1. İnternet Kaynakları | 17 |
| 2.2.2. Diğer Kaynaklar     | 18 |
| 3. SONUÇ                   | 19 |
| TAAHHÜTNAME                | 20 |

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Fadhil Sadeq AL-ALİ

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                  | sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| İÇİNDEKİLER.....                                                                                 | i     |
| ÖZET.....                                                                                        | iv    |
| ABSTRACT .....                                                                                   | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                                                                    | vi    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                            | vii   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                                          | ix    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİN .....                                                              | x     |
| 1. GİRİŞ.....                                                                                    | 1     |
| 1.1. Çalışmanın Önemi.....                                                                       | 9     |
| 2. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR .....                                              | 10    |
| 2.1. Bitümlü Bağlayıcılar .....                                                                  | 10    |
| 2.1.1. Katran .....                                                                              | 10    |
| 2.1.2. Asfalt .....                                                                              | 10    |
| 2.2. Bitümlü Karışımlar.....                                                                     | 12    |
| 2.2.1. Bitümlü karışım türleri .....                                                             | 12    |
| 2.2.2. Bitümlü karışımlardan beklenen özellikler .....                                           | 14    |
| 2.3. Bitüm Özelliklerinin Performansa Etkileri .....                                             | 18    |
| 2.3.1. Bitümün ısıya duyarlılığı.....                                                            | 19    |
| 2.3.2. Viskozitenin bitümün performans özelliklerine etkisi .....                                | 20    |
| 2.3.3. Kohezyonun bitümün performans özelliklerine etkisi.....                                   | 21    |
| 2.3.4. Adezyonun bitümün performans özelliklerine etkisi.....                                    | 21    |
| 3. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİNİN SİNİFLANDIRILMASI .....                       | 22    |
| 3.1. Sınıflandırma ve Tanımlar .....                                                             | 22    |
| 3.2. Dünyada Geri Dönüşüm Uygulamaları .....                                                     | 26    |
| 3.3. Asfalt Geri Dönüşüm Yöntemleri .....                                                        | 29    |
| 3.3.1. Soğuk düzeltme - Cold planing (CP) .....                                                  | 29    |
| 3.3.2. Sıcak geri dönüşüm - Hot Recycling .....                                                  | 33    |
| 3.3.3. Sıcak yerinde geri dönüşüm - Hot in-place recycling (HIR).....                            | 36    |
| 3.3.4. Soğuk geri dönüşüm -Cold Recycling (CR) .....                                             | 40    |
| 3.3.5. Tam derinlikten geri kazanma-Full Depth Reclamation .....                                 | 43    |
| 3.4. Geri Dönüşüm Uygulamaları Sonucunda Elde Edilecek Avantajlar.                               | 46    |
| 4. MATERYAL VE YÖNTEM.....                                                                       | 47    |
| 4.1. Malzeme ve Cihazlar .....                                                                   | 47    |
| 4.1.1. Asfalt betonu aşınma tabakasında kullanılan agrega .....                                  | 47    |
| 4.1.1.1. Aşınma tabakası için kaba agreganın özellikleri .....                                   | 48    |
| 4.1.1.2. Aşınma tabakası için ince agreganın özellikleri.....                                    | 49    |
| 4.1.2. Asfalt betonu aşınma tabakasında kullanılan mineral filler....                            | 50    |
| 4.1.3. Asfalt çimentosu .....                                                                    | 51    |
| 4.1.4. Geri kazanılmış asfalt betonu malzemesi (RAP).....                                        | 51    |
| 4.1.5. Cihazlar .....                                                                            | 52    |
| 4.2. Yöntem .....                                                                                | 52    |
| 4.2.1. Kazınmış asfalt kaplama malzemesinin gradasyonu ve bitümlü bağlayıcı miktarı tayini ..... | 52    |
| 4.2.1.1. Ekstraksiyon deneyi.....                                                                | 52    |

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.2. Kazınmış asfalt kaplama malzemesinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi .....                                        | 56  |
| 4.2.2.1. Birim hacim ağırlık deneyi.....                                                                                      | 56  |
| 4.2.3. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler .....                                                         | 57  |
| 4.2.3.1. Elek Analizi.....                                                                                                    | 57  |
| 4.2.3.2. İri agrega için özgül ağırlık deneyi.....                                                                            | 58  |
| 4.2.3.3. İnce agrega için özgül ağırlık deneyi.....                                                                           | 61  |
| 4.2.3.4. Mineral filler zahiri özgül ağırlığının tayini.....                                                                  | 63  |
| 4.2.4. Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak agrega gradasyonunun belirlenmesi.....                                | 65  |
| 4.2.5. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler .....                                                          | 66  |
| 4.2.5.1. Los Angeles (Aşınma) deneyi.....                                                                                     | 66  |
| 4.2.6. Asfalt çimentosunun fiziksel özelliklerinin belirlenmesi.....                                                          | 68  |
| 4.2.6.1. Bitümlü bağlayıcılar penetrasyon deneyi.....                                                                         | 68  |
| 4.2.6.2. Bitümlü bağlayıcılar-yumuşama noktası tayini-halka ve bilye metodu .....                                             | 71  |
| 4.2.6.3. Özgül ağırlık deneyi.....                                                                                            | 73  |
| 4.2.7. Marshall stabilite deney numunelerinin hazırlanması .....                                                              | 74  |
| 4.2.7.1. Marshall stabilite deneyi .....                                                                                      | 77  |
| 4.2.8. Kaplama karışım hesapları için gerekli bağıntılar .....                                                                | 77  |
| 4.2.8.1. Agrega efektif özgül ağırlığının tayini .....                                                                        | 77  |
| 4.2.8.2. Kaplama karışımının efektif bitüm yüzdesinin hesaplanması.....                                                       | 78  |
| 4.2.8.3. Farklı bitüm miktarlarında hazırlanan karışımın maksimum özgül ağırlığının tayini (Dt) .....                         | 79  |
| 4.2.8.4. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki boşluk hacmi yüzdesi .....                                                       | 79  |
| 4.2.8.5. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki hava boşluğu (Vh) ve asfalt dolu boşluk oranı (Vf) yüzdesinin hesaplanması ..... | 80  |
| 4.2.9. Optimum bitüm yüzdesi belirlenmesi.....                                                                                | 81  |
| 4.2.10. Geri kazanılmış asfalt betonu malzemesi kullanılan marshall stabilite deney numunelerinin hazırlanması.....           | 82  |
| 4.2.10.1. Geri Kazanılmış Asfalt Betonu Malzemesi Kullanılan Numunelerin Marshall Stabilite Deneyi .....                      | 86  |
| 4.2.11. İndirekt Çekme Mukavemeti.....                                                                                        | 86  |
| 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....                                                                                       | 90  |
| 5.1. Ekstraksiyon Deneylerinden Elde Edilen Araştırma Bulguları.....                                                          | 90  |
| 5.2. Kazınmış Asfalt Kaplama Malzemesinin(RAP) Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deney Bulguları .....        | 92  |
| 5.3. Mineral Agreganın Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deney Bulguları .....                                | 92  |
| 5.3.1. Numunelerde kullanılacak agrega gradasyonu .....                                                                       | 92  |
| 5.3.2. Özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi .....                                                                            | 94  |
| 5.4. Los Angeles (Aşınma) Deneyi Sonuçları .....                                                                              | 95  |
| 5.5. Asfalt Çimentosunun Özellikleri.....                                                                                     | 96  |
| 5.6. Optimum Bitüm Yüzdesi.....                                                                                               | 99  |
| 5.7. Sıcak Karışımın İçerisine Kazınmış Asfalt Kaplama Malzemesinin (RAP) İlave Edildiğinde Yapılan Deney Bulguları ....      | 107 |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.8. Sıcak Karışımın İçerisine RAP İlave Edildiğinde İndirekt Çekme |     |
| Deney Bulguları.....                                                | 109 |
| 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                        | 112 |
| KAYNAKLAR .....                                                     | 114 |
| EKLER.....                                                          | 117 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                      | 123 |



## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## GERİ KAZANILMIŞ ASFALT BETONU MALZEMESİNİN AŞINMA TABKASINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİ ARAŞTIRILMASI

Fadhil Sadeq AL-ALİ

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Serdal TERZİ

Genel olarak dünyada gün geçtikçe önem kazanan enerji kullanımının belirli seviyelerde tutulması, sürdürülebilirlik ve çevresel bozulmaları en alt seviyede tutma isteğinin yanında, son yıllarda karayollarında yapım, bakım, onarım ve kullanım alanında yeni teknolojilere doğru gidilmesine neden olmuştur. Bu yeni teknolojilerden birisi, hizmet ömrünü tamamlamış yol kaplamalarının geri dönüştürülerek yeniden kullanımda değerlendirilmesidir.

Mevcut bozulmuş asfalt kaplamaların iyileştirilmesinde geleneksel olarak uygulanagelen yeni asfalt takviye tabakalarının getirilmesi veya yeniden yapım yöntemleri yerine bozulmuş asfalt kaplama malzemesinin yerinde geri dönüştürerek yeniden kullanılması ekonomiklik, malzeme, çevre ve insan sağlığı yönünden daha iyi bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) numunelerinin içerisine çeşitli oranlarda kazanılmış asfalt betonu malzemesi (RAP) ilave edilerek, Stabilite, Akma ve İndirekt Çekme (ITS) dayanımları incelenmiştir. Öncelikle aşınma tabakası için optimum bitüm miktarı Marshall metodu ile bulunmuş ve daha sonra optimum bitüm içeriğinde hazırlanan asfalt betonu numunelerine %5 ila %50 oranlarında RAP ilave edilmiştir. Bunun yanında RAP ilave edilmemiş asfalt betonu numuneler de teste tabii tutulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Test sonuçları RAP ilave edilmiş BSK numunelerinin stabilite ve akma ve İndirekt Çekme Deneyi (ITS) yönünden Karayolları Teknik Şartnamesindeki limitler içerisinde Aşınma tabakasında kullanılabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** kazanılmış asfalt betonu malzemesi, Stabilite ve Akma dayanımları ve İndirekt Çekme Deneyi, bozulmuş asfalt kaplama malzemesi.

2016, 123 sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE USE OF RECYCLED ASPHALT CONCRETE MATERIAL TO THE SURFACE LAYERS**

**Fadhil Sadeq AL-ALİ**

**Süleyman Demirel University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Serdal TERZİ**

Overall worldwide day by day gaining importance keeping the energy consumption at reasonable levels, Sustainability issues and the effort to keep the environmental distortion at the minimum level, new technologies related to construction, maintenance and usage of highways have started to be accepted. One of those new technologies is reusing of bituminous pavements by employing various recycling methods.

In the improvement of damaged existing asphalt pavements , bringing the new asphalt reinforcements layers application or in instead of reconstruction methods , in place of the damaged asphalt layers materials by recycle it , it seems like it is a better alternative for economical reuse, Materials, environment and humans health .

In this study, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) were used in Hot Mix Asphalt (HMA) samples, stability and flow resistance and Indirect Tensile Test (ITS) of HMA samples were investigated. Initially, optimum bitumen content of wearing course was determined by Marshall Stability test method and then RAP, 5 to 50 % in terms of total asphalt concrete samples weight were added to HMA samples at the predefined optimum bitumen content. Besides, control samples were performed and compared with the RAP added samples. Test results show that Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) can be used in wearing course as an additive in accordance with Turkey General Directorate of Highways (TCK) specification limits.

**Keywords:** Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Stability and flow strength and Indirect Tensile Test, Impaired asphalt pavement material

**2016, 123 pages**

## TEŞEKKÜR

Çalışma boyunca her zaman yanımda olan, destek ve görüşlerini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Serdal TERZİ 'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yardım ve önerilerini esirgemeyen Arş. Gör. Şebnem KARAHENÇER'e, Arş. Gör. Ekinhan ERİŞKİN'e, Uzm. Buket ÇAPALI ve doktora yapan arkadaşım Süleyman GÖKOVA'ya teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Fadhil Sadeq AL-ALİ  
ISPARTA - 2016

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                          | sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1. Üstyapının Hizmet Kabiliyeti Eğrisi ve Rehabilitasyon alternatiflerinin etkisi.....           | 2     |
| Şekil 1.2. Performans ölçümü ile zaman arasındaki ilişki .....                                           | 3     |
| Şekil 1.3. Üstyapı iyileştirme yöntemleri .....                                                          | 4     |
| Şekil 1.4. Bozulmuş üstyapı üzerine asfalt kaplama serilir .....                                         | 4     |
| Şekil 1.5. Geosentetik rulo serilir .....                                                                | 6     |
| Şekil 1.6. Asfalt Kablaması serilir .....                                                                | 6     |
| Şekil 1.7. Tüm asfalt kaplamasının kazılması ve geri dönüşüm yapılmasıdır .....                          | 7     |
| Şekil 1.8. Bozulmuş tabakaların kaldırılarak yeni malzemelerle tekrar yapılmasıdır .....                 | 8     |
| Şekil 3.1 Geri dönüşüm yöntemlerinin sınıflandırılması .....                                             | 24    |
| Şekil 3.2. geri dönüşüm için aday yolları .....                                                          | 25    |
| Şekil 3.3. Soğuk düzeltme işleminden geçmiş yol yüzeyi örnekleri.....                                    | 30    |
| Şekil 3.4. Asfalt kazıma makinası .....                                                                  | 31    |
| Şekil 3.5. Soğuk Düzeltme (Cold Planing) Uygulamaları .....                                              | 32    |
| Şekil 3.6. Soğuk yerinde geri dönüşüm katarı .....                                                       | 42    |
| Şekil 4.1. Ekstraksiyon deneyi için örnekleme aşamaları .....                                            | 53    |
| Şekil 4.2. Ekstraksiyon deneyi uygulanma aşamaları .....                                                 | 54    |
| Şekil 4.3. Elek cihazı .....                                                                             | 57    |
| Şekil 4.4. Özgül ağırlık deneyi için RAP malzemesinin Ekstraksiyon kalıntısı iri agregalar tartılır..... | 59    |
| Şekil 4.5. Özgül ağırlık deneyi için normal iri agregalar tartılır .....                                 | 59    |
| Şekil 4.6. Bez üzerine yayılarak agrega daneleri kurulanır .....                                         | 60    |
| Şekil 4.7. İnce agrega için özgül ağırlık deneyi uygulanır.....                                          | 62    |
| Şekil 4.8. Mineral filler için Zahiri özgül ağırlık deneyi uygulanır .....                               | 64    |
| Şekil 4.9. Los Angeles aşınma deneyinde kullanılan cihaz .....                                           | 68    |
| Şekil 4.10. Normal bitüm için Penetrasyon deney aleti .....                                              | 70    |
| Şekil 4.11. Geri Kazanılmış Bitüm için Penetrasyon deney aleti.....                                      | 70    |
| Şekil 4.12. Yumuşama noktası cihazı .....                                                                | 72    |
| Şekil 4.13. Bilye ve halkalar .....                                                                      | 72    |
| Şekil 4.14. Marshall briket numuneleri hazırlanmasının aşamaları .....                                   | 75    |
| Şekil 4.15. Marshall deneyi uygulanma aşamaları .....                                                    | 76    |
| Şekil 4.16. RAP malzemesi kullanılan Marshall briket numuneleri hazırlanmasının aşamaları .....          | 83    |
| Şekil 4.17. RAP malzemesi kullanılan marshall deneyi uygulanır .....                                     | 85    |
| Şekil 4.18. İndirekt çekme deneyi uygulanma aşamaları .....                                              | 89    |
| Şekil 5.1. Örneklerin gradasyon eğrisi .....                                                             | 91    |
| Şekil 5.2. Aşınma tabakası gradasyon eğrisi .....                                                        | 93    |
| Şekil 5.3. Karışımın Dp-% Bitüm ilişkisi .....                                                           | 100   |
| Şekil 5.4. Karışımın Stabilite-% Bitüm ilişkisi .....                                                    | 101   |
| Şekil 5.5. Asfaltla dolu boşluk yüzdesi-bitüm ilişkisi .....                                             | 102   |
| Şekil 5.6. Karışımındaki hava boşluğu - bitüm ilişkisi .....                                             | 103   |
| Şekil 5.7. Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA%) - bitüm ilişkisi ...                                    | 104   |
| Şekil 5.8. Karışımın akma değeri-bitüm ilişkisi .....                                                    | 105   |

|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.9. Karışımın içerisine (%0 - %50) RAP ilave edildiğinde Marshall Stabiltesi sonuç grafiği ..... | 108 |
| Şekil 5.10. Karışımın içerisine (%0 - %50) RAP ilave edildiğinde Marshall Akma sonuç grafiği .....      | 108 |
| Şekil 5.11. RAP içeriklerine göre Çekme Mukavemeti Oranı (TSR) değerleri .....                          | 111 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                               | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 1.1. Düzgünsüzlük (IRI) Değerlerine Göre Yol Durumunun Sınıflandırılması, Bakım- Onarımda Öncelik Sıralaması .....                                                    | 1     |
| Çizelge 2.1. Kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri .....                                                                                                                      | 12    |
| Çizelge 3.1. Amerika Birleşik Devletlerinde uygulanmış bazı projeler ve Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplama (RAP) kullanım oranları .....                                       | 29    |
| Çizelge 3.2. Bozulma türüne göre geri dönüşüm yöntemi seçimi .....                                                                                                            | 45    |
| Çizelge 4.1. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri .....                                                                                                                   | 48    |
| Çizelge 4.2. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri .....                                                                                                             | 49    |
| Çizelge 4.3. İnce agreganın özellikleri .....                                                                                                                                 | 50    |
| Çizelge 4.4. Mineral Fillerin Gradasyon Limitleri .....                                                                                                                       | 51    |
| Çizelge 4.5. Aşınma Tabakası için Gradasyon Limitleri.....                                                                                                                    | 66    |
| Çizelge 4.6. Seçilen Granülometri .....                                                                                                                                       | 66    |
| Çizelge 4.7. Marshall metodu ile aşınma tabakası tasarım kriterleri .....                                                                                                     | 82    |
| Çizelge 5.1. Ekstraksiyon sonrası bitüm oranı .....                                                                                                                           | 90    |
| Çizelge 5.2. Ekstraksiyon sonrası elek analizleri .....                                                                                                                       | 91    |
| Çizelge 5.3. Kazınmış Asfalt Kaplama Malzemesinin (RAP ) Birim Hacim Ağırlık değeri veri çizelgesi .....                                                                      | 92    |
| Çizelge 5.4. Agreg granülometrisi .....                                                                                                                                       | 93    |
| Çizelge 5.5. Çalışmada agrega olarak kullanılan iri ve ince kireçtaşı ve mineral fillerin malzemesinin özellikleri .....                                                      | 94    |
| Çizelge 5.6. Çalışmada agrega olarak kullanılan kazanılmış asfaltın malzemesinden ekstraksiyon sonrası elde edilen iri ve ince kireçtaşı malzemesinin özellikleri (RAP) ..... | 95    |
| Çizelge 5.7. Normal Agregaların Kireçtaşı Los Angeles Deneyi Sonuç Tablosu .....                                                                                              | 96    |
| Çizelge 5.8. Ekstraksiyon Kalıntısının Agregalarının Los Angeles Deneyi Sonuç Tablosu .....                                                                                   | 96    |
| Çizelge 5.9. B50/70 asfalt çimentosunun fiziksel özellikleri .....                                                                                                            | 96    |
| Çizelge 5.10. Karışımdaki bitümün penetrasyonunun hesaplanması.....                                                                                                           | 97    |
| Çizelge 5.11. Karışımdaki bitümün yumuşama noktası değerinin hesaplanması .....                                                                                               | 98    |
| Çizelge 5.12. Aşınma Tabakası İçin Marshall Metodu Dizayn Değerleri....                                                                                                       | 99    |
| Çizelge 5.13. Optimum bitüm değerine göre dizayn verileri .....                                                                                                               | 106   |
| Çizelge 5.14. Geri Kazanılmış Asfalt Betonu Malzemesi Kullanılan Aşınma Tabakası İçin Marshall Metodu Dizayn Değerleri .....                                                  | 107   |
| Çizelge 5.15. ITS <sub>KURU</sub> ve ITS <sub>SISLAK</sub> deney sonuçları .....                                                                                              | 110   |
| Çizelge 5.16. Çekme Mukavemeti Oranı (TSR) deney sonuçları .....                                                                                                              | 110   |
| Çizelge A.1. %10 RAP Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım dizaynının hazırlanması .....                                                                                       | 118   |
| Çizelge A.2. %20 RAP Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım dizaynının hazırlanması .....                                                                                       | 119   |
| Çizelge A.3. %30 RAP Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım dizaynının hazırlanması.....                                                                                        | 120   |
| Çizelge A.4. %40 RAP Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım dizaynının hazırlanması .....                                                                                       | 121   |
| Çizelge A.5. %50 RAP Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım dizaynının hazırlanması .....                                                                                       | 122   |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                  |                                                                                            |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| AASHTO           | Amerikan devlet otoyolları ve resmi tasımacılık birliği.                                   |
| AC               | Asfalt çimentosu.                                                                          |
| ASTM             | Amerikan test ve materyaller topluluğu.                                                    |
| ARRA             | Asphalt Recycling and Reclaiming Association / Asfalt Geri Dönüşüm ve İyileştirme Birliği. |
| BSK              | Bitümlü sıcak karışım.                                                                     |
| CCPR             | Cold Central Plant Recycling/ Soğuk Plentte Geri Dönüşüm.                                  |
| CP               | Cold Planing / Soğuk Düzeltme.                                                             |
| CIR              | Cold In Place Recycling/ Soğuk Yerinde Geri Dönüşüm.                                       |
| DOT              | Department of Transportation                                                               |
| DT               | Kaplama karışımının maksimum özgül ağırlığı .                                              |
| Dp               | Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı .                                             |
| FDR              | Full Depth Reclamation / Tam Derinlikten Geri Kazanma.                                     |
| HIR              | Hot In-Place Recycling / Sıcak Yerinde Geri Dönüşüm.                                       |
| HRA              | Sıcak silindirlenmiş asfalt.                                                               |
| IRI              | International Roughness Index.                                                             |
| ITS              | İndirekt Çekme Mukavemeti.                                                                 |
| Ip               | Penetrasyon indisi.                                                                        |
| I <sub>RaB</sub> | Yumuşama noktası.                                                                          |
| KGM              | Karayolları Genel Müdürlüğü.                                                               |
| KTŞ              | Karayolları Teknik Şartnamesi.                                                             |
| KAK              | Kazınmış Asfalt Kaplama.                                                                   |
| MC               | Orta kür olan sıvı petrol asfaltları.                                                      |
| PCI              | Pavement Condition Index / Kaplama Durum İndeksi                                           |
| PSI              | The present serviceability index – Servis Kabiliyet İndeksi.                               |
| RAP              | Reclaimed Asphalt Pavement / Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplama.                            |
| SPA              | Sıvı Petrol Asfaltları.                                                                    |
| TSI              | Son Servis İndeksi.                                                                        |
| VMA              | Agregalar arasında boşluk değeri.                                                          |
| Vh               | Sıkıştırılmış Kaplama Karışımındaki Hava Boşluğu.                                          |
| Vf               | Asfalt Dolu Boşluk Oranı.                                                                  |

## 1. GİRİŞ

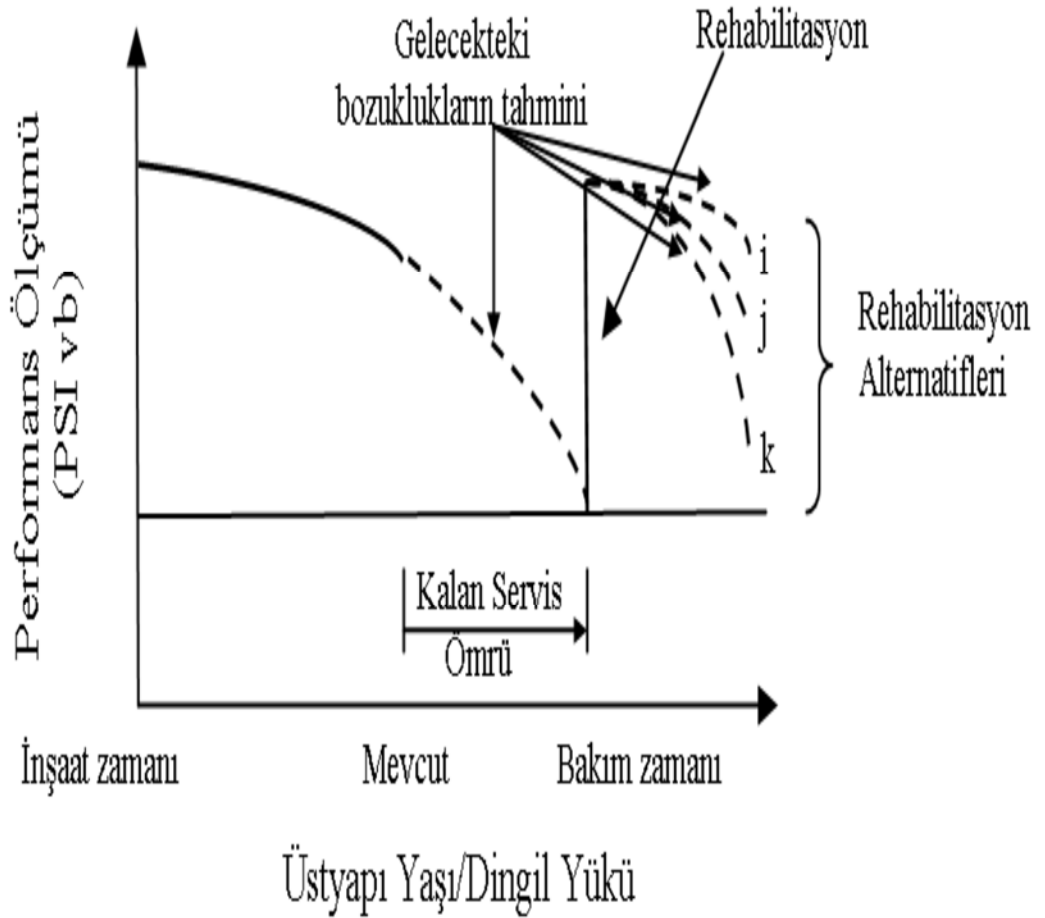
Karayolu üstyapıları esnek ve rijit olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Esnek üstyapı kaplama tabakalarında bağlayıcı olarak bitüm kullanılırken rijit üstyapılarda çimento esaslı bağlayıcılar kullanılmaktadır. Esnek üstyapılar 20 yıllık süre için projelendirilmekte ayrıca her 5 senede bir kaplamanın yenilenmesi gerektiği öngörülmektedir. Kaplamanın uygulama süresince üzerinden geçen trafiğe konforlu bir şekilde hizmet edebilme özelliği servis yeteneği olarak isimlendirilmektedir. Karayollarında servis yeteneği, (0 ila 5) arasında değişen servis yeteneği indeksi ile ifade edilmekte olup karayolu üstyapılarının projelendirilmesinde baz alınan servis yeteneği, Çizelge 1.1.'de görüldüğü En düzgün yüzey için (5) değeri verilir, (0) değeri ise en düşük servis kabiliyeti derecesini gösterir (Yoder, 1975).

Çizelge 1.1. Düzgünsüzlük (IRI) Değerlerine Göre Yol Durumunun Sınıflandırılması, Bakım-Onarımda Öncelik Sıralaması (Yoder, 1975)

| Düzgüns-<br>üzlük<br>Değeri<br>RN | Düzgüns-<br>üzlük<br>Değeri<br>(IRI-<br>m/km) | Düzgüns-<br>üzlük<br>Sınıflam-<br>ası | Bakım-<br>Onarım<br>Öncelik<br>Sıralam-<br>ası | Kaplamanın IRI Değerlerine<br>Göre Yapılması Gerekenler                         |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 4.0 – 5.0                         | 0 – 0.71                                      | Çok İyi                               | 6                                              | Yeni veya yeni sayılabilen kaplama; bir süre için iyileştirmeye ihtiyaç duymaz. |
| 3.0 – 4.0                         | 0.72 – 1.11                                   | İyi                                   | 5                                              | İyi durumdaki kaplama; yakın gelecekte iyileştirmeye ihtiyaç duymaz.            |
| 2.5 – 3.0                         | 1.12 – 1.58                                   | Orta İyi                              | 4                                              | Trafiğe bağlı olarak yakın gelecekte iyileştirmeye ihtiyaç duyacaktır.          |
| 2.0 – 2.5                         | 1.59 – 1.80                                   | Orta                                  | 3                                              | Mevcut kullanılabilirliğini sürdürürebilmek için yakında onarım gerektirir.     |
| 1.5 – 2.0                         | 1.81 – 2.13                                   | Kötü                                  | 2                                              | Eski hizmet kabiliyetini geri kazanabilmesi için hemen iyileştirme gerekir.     |
| 0.0 – 1.5                         | > 2.13                                        | Çok Kötü                              | 1                                              | Eski hizmet kabiliyetini geri kazanabilmesi için hemen iyileştirme gerekir.     |

Üstyapı yüzeyinin belirli fiziksel özelliklerinin (pürüzlülük, tekerlek izi, çatlak uzunluğu, yama miktarı vb.) ölçülmesi suretiyle ve bir formül yardımıyla hesaplanan sayıya "mevcut servis kabiliyeti indeksi" (PSI) denir .

Çalışmalar göstermiştir ki, yeni bir üstyapı yaklaşık olarak (4.2-4.5) arasında PSI değerine sahiptir. Trafik yüklerinin kümülatif toplamı üstyapının bozulmasına neden olur. Kaplamanın kabul edilebilir en düşük konfor seviyesi son servis yeteneği indeksi olarak isimlendirilmektedir. Bu değer yüksek trafik hacmine sahip otoyol veya devlet yollarında 2,5, il yollarında ise 2,0 olarak seçilmektedir. Servis yeteneği indeksinin son servis yeteneği indeksi değerine inmesi, kaplamada rehabilitasyon veya yeniden yapım gerektiğini ifade etmektedir (Sağlık ve Güngör, 2008).

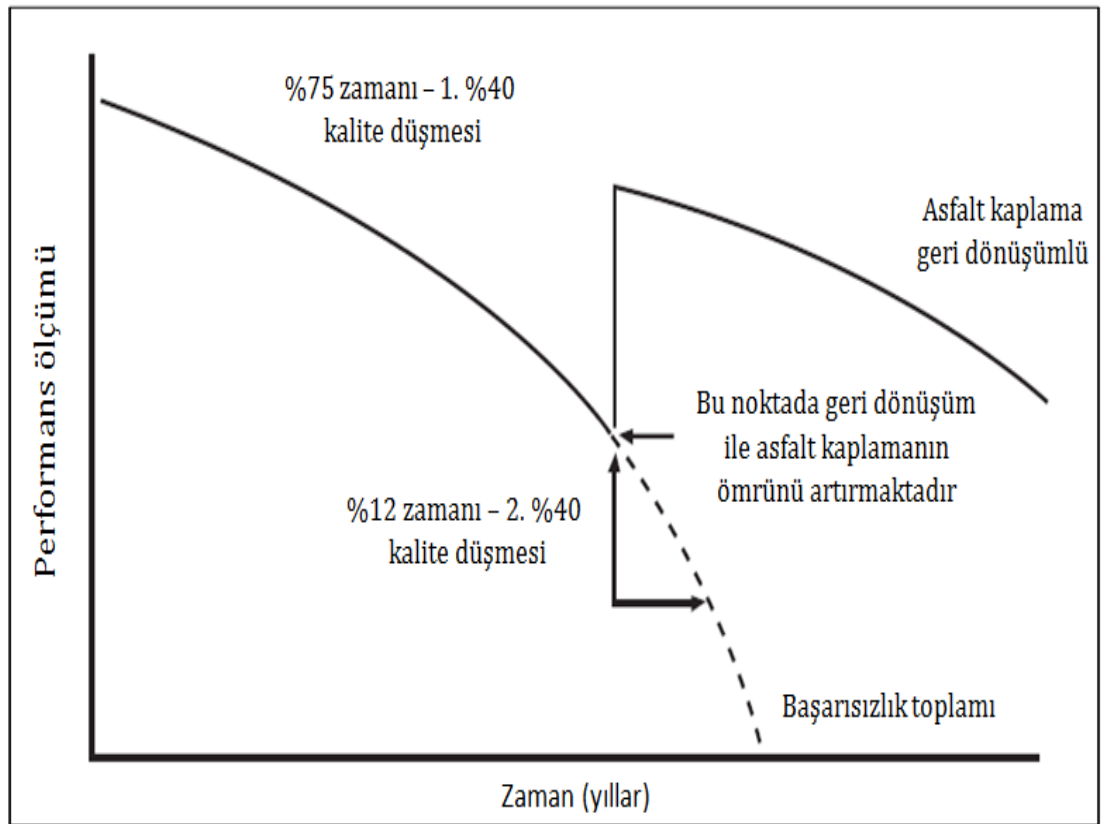


Şekil 1.1. Üstyapının Hizmet Kabiliyeti Eğrisi Ve Rehabilitasyon Alternatiflerinin Etkisi (Sağlık Ve Güngör, 2008)

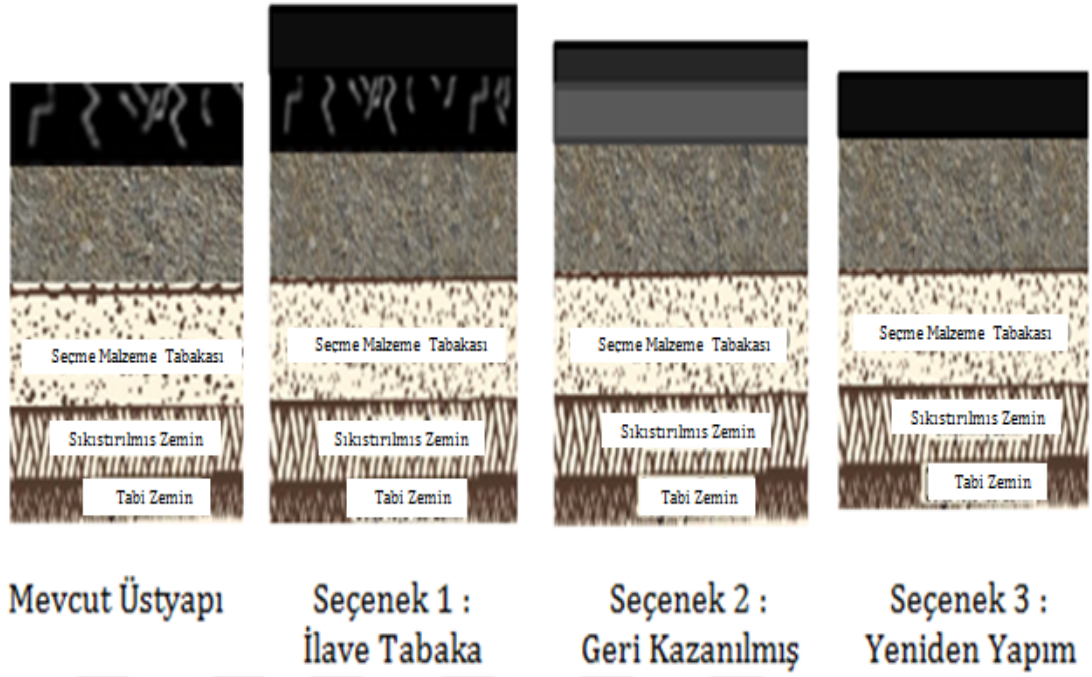
Ülkemizde ve Irak'ta en çok kullanılan üstyapı türü olan esnek üstyapılar ile yapılan karayollarında son servis kabiliyeti indeksi değerine ulaşıldığında kaplamadaki bozulmanın derecesine göre rehabilitasyon yapılmakta veya mevcut kaplama kaldırılarak yeniden yapım gerçekleştirilmektedir.

Şekil 1.2 ve 1.3'de görüldüğü gibi esnek üstyapılar ile yapılan karayollarında üstyapıda bozulma meydana geldiğinde ve son servis kabiliyeti indeksi değerine ulaşıldığında üç farklı yöntemle üstyapının iyileştirilmesi mümkündür (Windhagen, 2010).

1. Bozulmuş üstyapı üzerine ilave tabaka yapılmasıdır.
2. Üstyapı tabakalarında geri dönüşüm yapılarak ince bir ilave kaplama tabakası yapılmasıdır.
3. Bozulmuş tabakaların kaldırılarak yeni malzemelerle tekrar yapılmasıdır.

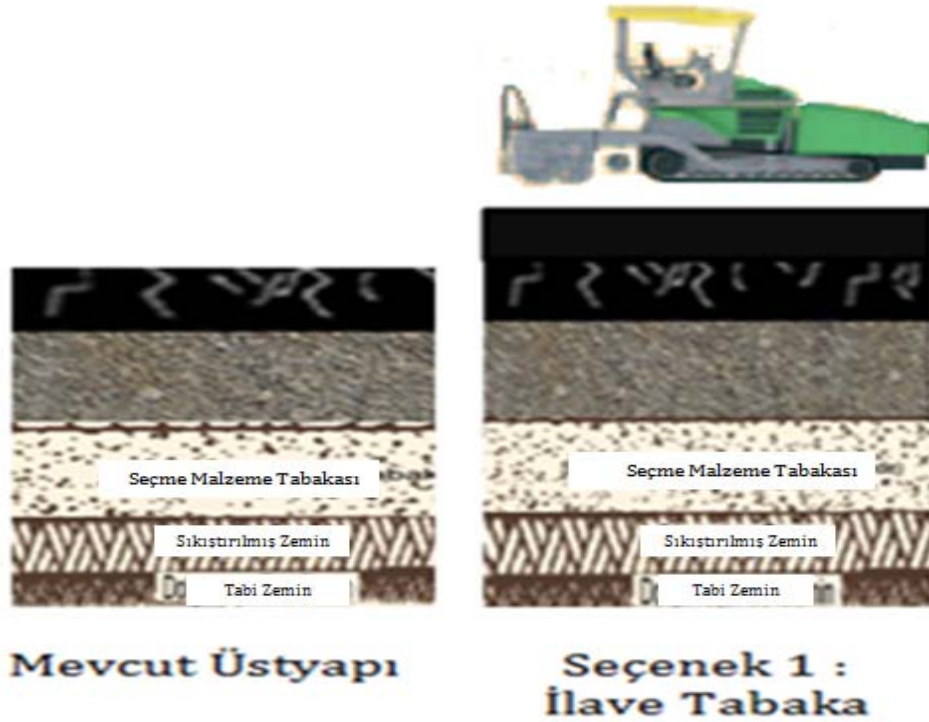


Şekil 1.2. Performans ölçümü ile zaman arasındaki ilişki (U.S.DOT, 2001)



Şekil 1.3. Üstyapı iyileştirme yöntemleri (Windhagen, 2010)

Birinci seçenekte: Şekil 1.4’de görüldüğü gibi Bozulmuş üstyapı üzerine ilave tabaka yapılmasıdır. Yansıma çatlaklarının oluşumunun önlenmesinde geosentetik malzemeler kullanılabilmektedir (Windhagen, 2010).



Şekil 1.4. Bozulmuş üstyapı üzerine asfalt kaplama serilir (Windhagen, 2010)

Karayolu üstyapısı bakım-onarım çalışmalarında karşılaşılan en önemli problemlerden birisi, onarımı yapılan bozulmuş üstyapıdaki mevcut çatlakların, üzerine getirilen takviye tabakasında gerilme yoğunlaşması meydana getirerek, bu çatlak düzeltmeleri boyunca kısa sürede yüzeye yansması ve takviye tabakasının öngörülenden çok daha kısa bir süre içerisinde bozulmasıdır.

Yansma çatlağı problemi özellikle çatlaklı eski kaplama tabakası üzerine ince takviye tabakası getirildiğinde büyük sorun teşkil etmektedir. Bu durumda, takviye tabakasının yansma çatlağı oluşumuna karşı dayanımı, çatlaklı eski üstyapı ile yeni takviye tabakası arasında bir ara tabaka kullanılarak artırılabilir.

Yansma çatlağına karşı, eski üstyapı ile yeni üstyapı arasında geosentetik malzemesi uygulanmaktadır. Geosentetik ara tabakaların kullanımının başlıca;

1. Üstyapının su geçirimsizliğini sağlamak,
2. Yansma çatlağı oluşumunu geciktirmek,
3. Takviye tabakasının ömrünü artırmak,
4. Üstyapının yorulma dayanımını artırmak,
5. Takviye tabakası kalınlığından,

tasarruf sağlamak gibi faydaları vardır.

Ayrıca Geosentetik, deformasyonu ve gerilmeyi azaltarak ya da yayarak istenilen malzemeyi korur. iki malzeme arasında yerleştirilen geotekstil (örneğin asfalt kaplama ile eski yol kaplaması arasında veya geomembran ile agrega arasında) malzemelerden birini korur.

Geosentetikler çekme direncine sahiptir. Geosentetik, geçirimsiz bir tabaka oluşturmak için bitüm veya plastik yalıtım malzemeleriyle doygun hale getirilir. Bir çeşit membran görevi görür. Özellikle yeni kaplama, yapılacak eski kaplamalı yolların üzerine serilir. Geotekstilin, yeterli miktarda bitümü tutma özelliği olması gerekir (Aksoy, 1993).

Geosentetik bir malzeme genellikle takviye tabakasının taşıma gücündeki bir zafiyeti karşılamak üzere kullanılmaz. Bununla beraber, üstyapının servis kabiliyetini artırarak yolun ömrünü artırır ve bakım maliyetini azaltır.



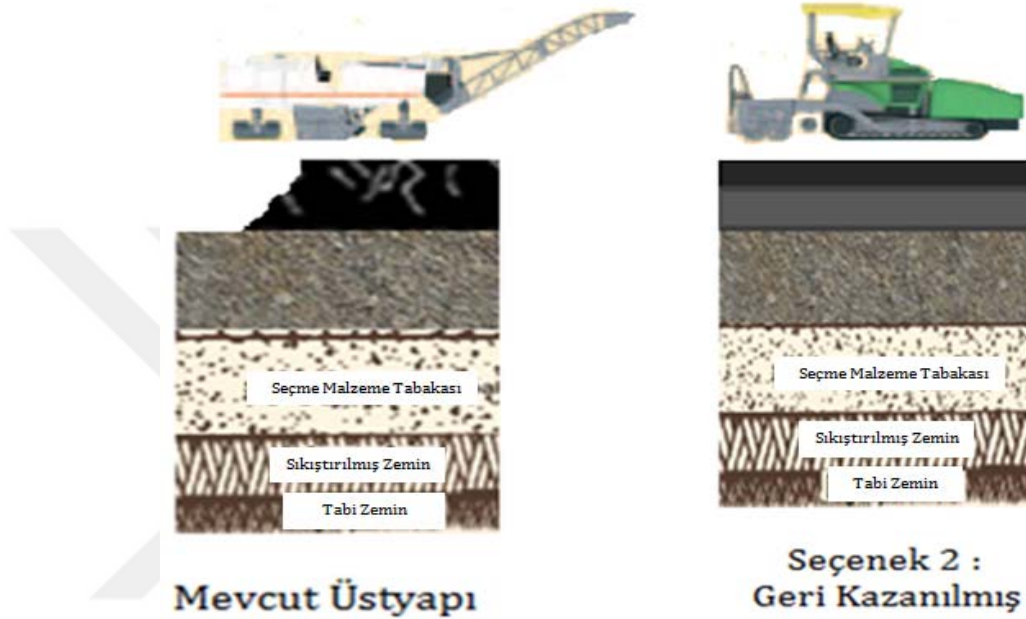
Şekil 1.5. Geosentetik rulo serilme (Aksoy, 1993)



Şekil 1.6. Asfalt Kaplaması serilme (Joe ve Button, 2003)

Zaman içinde bozulan yol üstyapısı bakım ve onarım faaliyetleri ile iyileştirilir. Buna rağmen trafik, çevre ve iklim koşulları altında bozulmalar artarak yol üstyapıları büyük onarımlar gerektirecektir.

İkinci seçenekte: Şekil 1.7’de görüldüğü gibi Üstyapı tabakalarında geri dönüşüm yapılarak ince bir ilave kaplama tabakası yapılmasıdır.



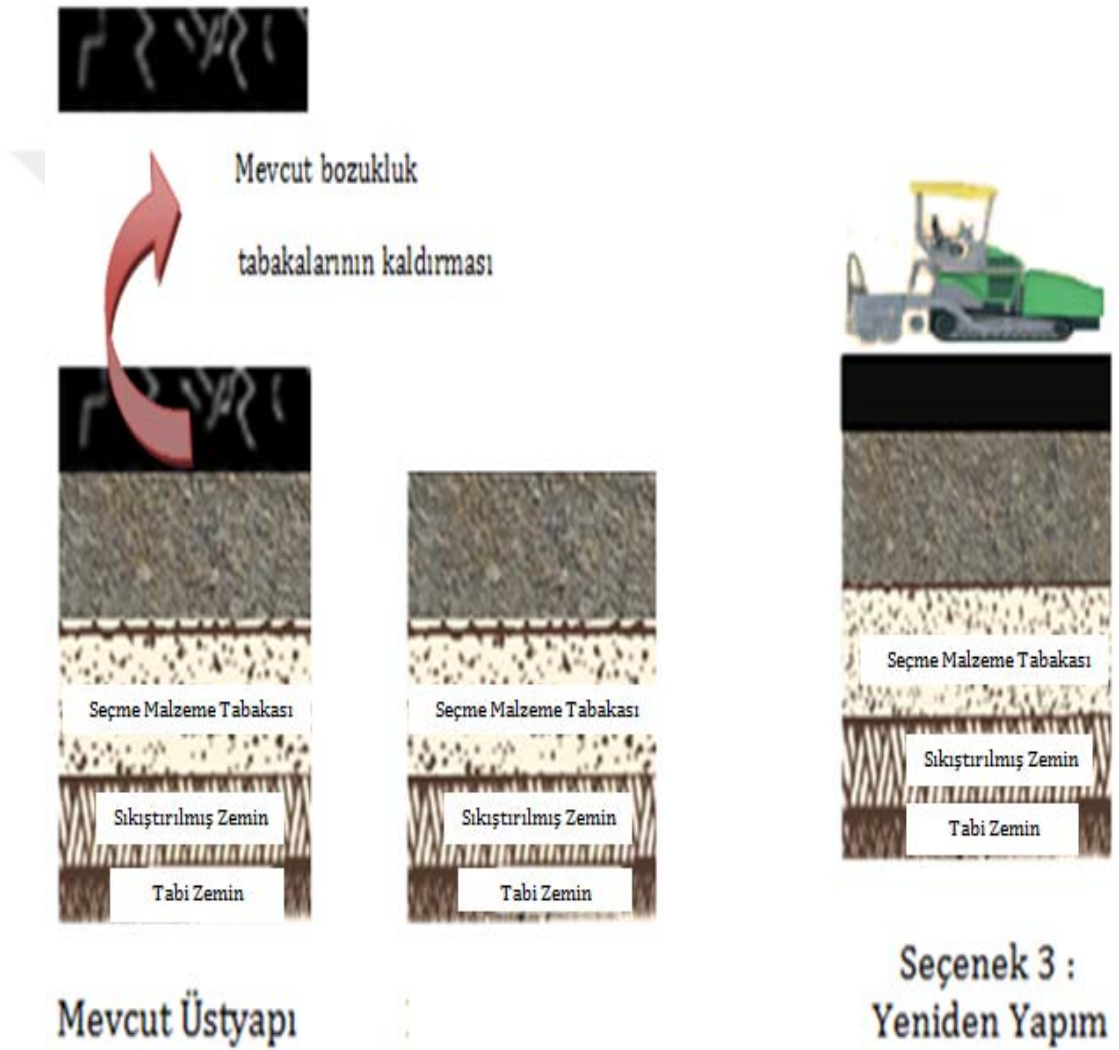
Şekil 1.7. Tüm asfalt kaplamasının kazılması ve geri dönüşüm yapılmasıdır (Windhagen, 2010)

Genel olarak beş bölüme ayrılan bitümlü karışımların geri dönüşüm yöntemleri; Soğuk Düzeltme, Sıcak Geri Dönüşüm, Sıcak Yerde Geri Dönüşüm, Soğuk Geri Dönüşüm ve Tam Derinlikli Geri Dönüşüm olarak adlandırılmaktadır (Güngör ve Orhan, 2008).

Dünya nüfusu sürekli artış göstermektedir. Buna paralel olarak tüketim de artmakta ve kısıtlı miktarda olan hammadde kaynakları gün geçtikçe azalmaktadır. Dolayısıyla mevcut kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılması ve kullanılan malzemelerin yeniden ekonomiye kazandırılması önemli bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır (Ahmed, 1993, Huang, 2007).

Karayolu yapımında karşılaşılan; kaliteli agrega azlığı, taşıma maliyetlerindeki fazlalık, kalifiye insan gücü yetersizliği, yapım-bakım-onarım maliyetlerinin çokluğu gibi toplam bütçeyi direkt olarak etkileyen sorunlar; agrega, bağlayıcı, ekipman, insan gücü ve enerji kullanımının optimize edilmesiyle çözülebilir.

Üçüncü seçenekte: Şekil 1.8’de görüldüğü gibi bozulmuş tabakaların kaldırılarak yeni malzemelerle tekrar yapılmasıdır.



Şekil 1.8. Bozulmuş tabakaların kaldırılarak yeni malzemelerle tekrar yapılmasıdır (Windhagen, 2010)

### 1.1. Çalışmanın Önemi

Atıkların değerlendirilmesi ve yeniden ekonomiye kazandırılması hem çevre kirliliğinin önlenmesi açısından hem de ekonomik nedenlerden dolayı araştırılması gereken önemli konulardan birisidir. Bu çalışmada, tüm dünyada her yıl büyük miktarlarda ortaya çıkan RAP malzemelerinin aşınma tabakasında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan çalışma atıkların yeniden değerlendirilmesi ve enerji verimliliği açısından büyük bir öneme sahiptir.

Bozulan yol üstyapının onarımında kazılan malzemelerin çevreye olumsuz etkilerinin azaltılması yanında ekonomiye yeniden kazandırılması amacıyla yeniden kullanımın yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Ayrıca, ekonomik değeri olan malzemelerin geri dönüşümü için çeşitli yöntemler geliştirilerek, ekonomik kazanç ve enerji tasarrufu sağlamak hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında, geleneksel bakım-onarım yöntemlerinin yerine bozulmuş yol kaplamalarının geri kazanılması konusu incelenmiştir.

Bu amaca yönelik olarak ilk bölümde genel bir giriş yapıldıktan sonra çalışmanın ikinci bölümünde bitümlü bağlayıcılar ve bitümlü karışımlarına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde bitümlü karışımlarda geri dönüşüm yöntemleri ve özellikleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde Materyal ve Yöntem anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise, araştırma bulguları ve tartışmaları açıklanmıştır. Çalışmanın sonucunda, sonuçların değerlendirilmesi açıklanmıştır ve öneriler verilmiştir.

## **2. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR**

### **2.1. Bitümlü Bağlayıcılar**

Bitümlü bağlayıcılar esas olarak katran ve asfalt olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadırlar. Asfaltlar da doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar (rafineri asfaltları) olarak iki gruba ayrılabilir (Orhan, 2005).

#### **2.1.1. Katran**

Katran, başlıca odunun veya kömürün kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılması sonucu elde edilir. Bu halde katrana ham katran denir. Katran, yapısındaki bitüm oranının düşük olması, sıcaklığa karşı duyarlılığının yüksek olması ve sağlık açısından tehlike yaratması nedenlerinden dolayı esnek kaplama yolların inşaatında doğrudan kullanılmaz. Katran-bitüm karışımları olarak genelde yüzeysel kaplamalarda kullanılır. Taşıtlardan sızan yağ ve mazot dökülmelerinden oluşan olumsuz etkilere karşı bitümden daha dirençli olduğundan taşıtların park vb. yerlerde kullanılır.

#### **2.1.2. Asfalt**

Asfalt, doğal kökenli veya petrolün işlenmesinden elde edilen bitümlerdir. Rengi, koyu kahverengi ile siyah arasında değişen bağlayıcı bir malzemedir. Genellikle, petrolün damıtılmasından elde edilen rafineri asfaltı yol yapımında en yaygın kullanılanıdır. Ayrıca, doğada mineral maddeler ile karışmış durumda doğal olarak da bulunabilmektedir (Kurtis, 2003).

#### **Doğal asfaltlar**

Doğal asfaltlar, genellikle tabiatта mineral maddelerle karışmış halde bulunurlar ve en önemlisi Trinidad göl asfaltıdır. Gölden kazılan malzeme üzerlerinde bir takım işlemler yapıldıktan sonra yol inşaatında kullanılabilir (Kurtis, 2003). Ancak, yol kaplamasında ve endüstride bu tür asfaltlar çok az kullanılmaktadır.

Bu asfaltlar çeşitli şekillerde yol kaplamasında ve endüstride çok az kullanılmaktadır. Bu kullanım genelde, bitümlü sıcak karışımı modifiye etmek için karışıma katkı maddesi olarak katılmaları şeklindedir. Karışımlarda plastik deformasyonlara karşı dayanımı ve bitüm agrega adezyonunu artırmaktadır (Orhan, 2005). Doğal asfaltlar, mastik asfalt, poröz asfalt ve asfalt betonu yapımında kullanılabilmektedir.

### **Yapay asfaltlar (rafineri asfaltları)**

Yapay asfaltlar rafineride petrolün distilasyonu ile elde edilmekte olup, genel olarak üç gruba ayırmak mümkündür. Bunlar:

1. Asfalt çimentosu (AC)
2. Sıvı petrol asfaltları (SPA)
3. Asfalt emülsiyonları

Asfalt çimentoları doğal asfaltın işlenmesi veya petrolün rafine edilmesi ile elde edilirler. Katı asfalt veya penetrasyon asfaltları olarak da nitelendirilirler ve penetrasyon veya viskozite değerlerine göre sınıflandırılırlar.

Sıvı petrol asfaltları, ısıtılmış bitümlere benzin, gazyağı veya bakiye yağ karıştırılması ile üretilir. Benzin ilavesi ile çabuk kür olan (RC), gazyağı ilavesi ile orta hızda kür olan (MC), bakiye yağ ilavesi ile yavaş kür olan (SC) sıvı petrol asfaltları elde edilir.

Asfalt emülsiyonları ise bitüm küreciklerinin su içinde dağıtılmasından oluşur. Bitümün su içerisinde dağıtılması ile üretilen emülsiyon uzun ömürlü olmaz, kısa bir süre sonra bitüm kürecikleri birbirine yapışarak sudan ayrılır. Emülgatörler kullanılarak bitüm küreciklerinin birbiri ile birleşmeleri önlenir ve emülgatör cinsine bağlı olarak anyonik ve katyonik asfalt emülsiyonları üretilir.

Asfalt uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri Çizelge 2.1.'de verilmiştir. Bu bitümlerden B40/60, B50/70 ve B70/100 sınıfı bitümler sıcak karışım asfalt imalatında, B100/150 ve B160/220 sınıfı bitümler ise sathi kaplama uygulamalarında kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1. Kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri( Karayolları Teknik Şartnamesi, Ankara, 2013).

| Özellik                                | Bitüm sınıfları |            |             |              |              |
|----------------------------------------|-----------------|------------|-------------|--------------|--------------|
|                                        | B<br>40/60      | B<br>50/70 | B<br>70/100 | B<br>100/150 | B<br>160/220 |
| Penetrasyon 25 °C'da 0,1mm             | 40-60           | 50-70      | 70-100      | 100-150      | 160-220      |
| Yumuşama noktası °C                    | 48-56           | 46-54      | 43-51       | 39-47        | 35-43        |
| Frass kırılma noktası <b>a</b> °C maks | -7              | -8         | -10         | -12          | -15          |
| Parlama noktası °C min                 | 230             | 230        | 230         | 230          | 220          |
| Çözünürlük % min                       | 99              | 99         | 99          | 99           | 99           |
| Parafin mumu içeriği <b>b</b> % maks   |                 |            |             |              |              |
| TSEN 12606-1                           | 2,2             | 2,2        | 2,2         | 2,2          | 2,2          |
| TSEN 12606-2                           | 4,5             | 4,5        | 4,5         | 4,5          | 4,5          |
| İnce film halinde ısıtma deneyi        |                 |            |             |              |              |
| Kütle değişimi % maks                  | 0,5             | 0,5        | 0,8         | 0,8          | 1,0          |
| Kalıcı penetrasyon % min.              | 50              | 50         | 46          | 43           | 37           |
| Yumuşama noktası °C min                | 49              | 48         | 45          | 41           | 37           |
| Yumuşama nok.yüksel. °C maks           | 9               | 9          | 9           | 10           | 11           |

**a)** Soğuk bölgelerde kullanılacak bitümlere yapılacaktır. **b)** Gerek duyulduğunda yapılacaktır.

## 2.2. Bitümlü Karışımlar

### 2.2.1. Bitümlü karışım türleri

Agregalar ile bitüm, istenilen düzeyde bir kaplama karışımı elde etmek amacıyla bünyesinde ilgili tüm bileşen malzemelerin oranlandığı, karıştırıldığı ve gerektiğinde ısıtıldığı bir karışım tesisinde (plant) bir araya getirilmektedirler. Bitümlü karışımlar geniş bir yelpazeyi kapsamakta olup, genel anlamda asfaltlar ve makadamlar olarak ikiye ayırmak mümkündür.

## **Asfaltlar**

Asfaltlar, 230°C'ye ulaşan sıcaklıklarda asfalt plantlerinde hazırlanan, mineral agrega, filler ve bitümden oluşan karışımlardır. Sıcak silindirlenmiş asfalt (HRA) ve mastik asfalt en çok kullanılan asfalt tiplerine örnek olarak verilebilir.

Mastik asfalt, bitüm ve ince agrega ile belli bir oranda iri agrega harcından oluşmaktadır. Mastik asfalt içerisindeki yüksek ince agrega yüzdesi, düşük sürtünme katsayısı ile birlikte pürüzsüz bir yüzey özelliği sağlar.

Sıcak silindirlenmiş asfalt esas olarak, otoyollar, ana arterler ve kent içi caddeleri gibi yoğun trafiğin olduğu yerlerde kullanılan yüksek kaliteli bir malzemedir. Sıcak silindirlenmiş asfaltın en önemli özelliği kesintili gradasyona sahip olması, yani çok az miktarda orta boyutlu (2,36 mm ila 10 mm arası) agrega içermesi, bunun yanında da ince agrega, dolgu maddesi (filler) ve iri agregadan oluşmasıdır (Çubuk, 2007).

## **Asfalt betonu**

Asfalt betonu karışımlar, sürekli gradasyona sahip, daha yüksek oranda ve daha sert bir bitüm ile daha az iri agrega ve daha fazla ince agrega ile filler içermektedir. Asfalt betonu, mukavemet ve stabilitesini öncelikle agregaların kenetlenmesinden, bir miktarını da ince agrega-filler-bitüm harcından sağlamaktadır.

## **Makadamlar**

Bitümlü makadamların bu yüzyılda kullanımı yaygınlaşmaya başlanmış olup, hem iri agrega hem de daha küçük boyutlu agregalar ve bitüm kullanılarak hazırlanan bir malzemedir. Filler ise bağlayıcı maddenin viskozitesini artırmak suretiyle bitümün akmasını engellemek ve bitüm ile birlikte küçük boşlukların doldurulmasına yardımcı olmak amacıyla kullanılmaktadır.

Kaplanmış makadam türleri karışımda kullanılan bitüm miktarı ve karışımın gradasyonuna göre çeşitlilik arz etmektedir. Bunlardan bazıları açık ve orta gradasyonlu makadamlar, yoğun ve üniform gradasyonlu makadamlar, ince gradasyonlu makadamlardır.

### **2.2.2. Bitümlü karışımlardan beklenen özellikler**

Hazırlanan ve yol üzerine serilen bitümlü karışımın bazı özellikleri sağlaması istenmektedir. Bunlar,

- Stabilité
- Durabilite (dayanıklılık)
- Geçirimsizlik
- İşlenebilirlik
- Esneklik
- Yorulma mukavemeti
- Kayma direnci

olarak belirtilebilir (Önal ve Kahramangil, 1993).

#### **Stabilité**

Bitümlü sıcak karışımın stabilitesi, kaplamanın trafik yükleri altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak adlandırılır. Yani karışımın stabilitesi trafik yüklerini karşılayabilecek kadar yüksek olmalıdır.

Stabilité ne kadar düşük olur ise trafik altında oluşabilecek deformasyonlar da o kadar fazla olacaktır. Stabil bir kaplama, tekrarlı trafik yükleri altında orjinal şeklini ve düzgünlüğünü sürdürebilmektedir. Stabil olmayan bir kaplamada ise tekerlek izleri ve sökûlmeler oluşmaktadır (Kurtis, 2003). Ancak, çok düşük stabilite ne kadar istenmez ise çok yüksek stabilite de istenilmemektedir. Çünkü çok yüksek stabilitede esneklik kaybolacağından gerilmeler sonucu çatlaklar oluşmaktadır.

Karışımın stabilitesi, agregalar arasındaki içsel sürtünmeye ve bağlayıcının kohezyonuna bağlıdır. Agregalar arasındaki içsel sürtünme agregaların şekilleri ve yüzey yapısı ile ilgili olup, bağlayıcının kohezyonu ise, yükleme hızı arttıkça, bitümlü bağlayıcının viskozitesi arttıkça ya da kaplamanın sıcaklığı düştükçe artar.

Stabilite, karışımdaki bitüm miktarı belli bir seviyeye kadar artırıldıkça artar ve bu seviyenin üstüne çıkıldığında bitüm agregalar üzerinde çok kalın bir film oluşturur ve malzemeler arasındaki içsel etkileşimin düşmesine neden olur (Kentucky, 1996).

### **Durabilite (dayanıklılık)**

Bir karışımın durabilitesi, karışımın orjinal özelliklerini koruyabilme özelliğidir. Yani, yük ve çevre şartlarına karşı direnç gösterme kabiliyetidir. Asfalt, sert ve kırılğan hale geldiği zaman üzerine gelen gerilmelere çatlamadan karşı koyamadığında ve agrega yüzeyinden bitümün ayrılması sonucunda karışımın dayanımının düşmesiyle yük taşıma özellikleri azalır (Skok ve Chadbourn, 2000).

Karışımdaki bağlayıcı miktarı arttıkça durabilite artmaktadır çünkü agregaları saran bitüm film kalınlığı ne kadar yüksek olursa, geçirimsizlik o kadar artacaktır ve dolayısıyla yaşlanma direnci artacaktır. Ancak, yapılan bir çalışmada, bitüm film kalınlığının belli bir değerin altında yaşlanmanın etkisinin arttığı, bu değerin üzerindeki değerlerde ise yaşlanmanın etkisinin değişmediği belirtilmiştir (Sengöz ve Agar, 2005).

Karışımın yüzeyde tekerlerin sıkıştırdığı suyun etkisinde oluşan aşınma ise, karışımdaki boşluklar su ve hava girişine izin verecek kadar büyükse ve giren havadan dolayı karışım sertleşiyorsa, karışımda kullanılan bitüm ve agrega kimyasal olarak uyumlu değil ise ve bitüm film kalınlığı, karışımı tekerleklerin ve suyun aşındırıcı etkisinden koruyacak miktarda değil ise yüzeydeki aşınma olayı artmaktadır (Skok ve Chadbourn, 2000).

Karışımında ince agrega miktarı fazla olduğunda bitüm, bu ince agregaları emmektedir. Kaba agregalar ise yeterince bitüm ile sarılamamaktadır ve bu da durabilite sorununu yaratmaktadır. Bitüm film kalınlığı arttıkça durabilite artmaktadır. Ancak, bitümlü karışımın kusmasına neden olmadan, yeterli bir bitüm film kalınlığına ulaşmak için uygun seviyede mineral agregalar arasında boşluk değeri (VMA) temin edilmesi gerekmektedir.

### **Geçirimsizlik**

Geçirimsizlik, karışımın içine hava ve su girişine karşı koyma direncidir ve karışımın içindeki hava boşluklarının oranı ile ilişkili olup, boşluk oranı ve bu boşlukların birbiri ile irtibatı geçirimsizlik için önemlidir. Burada boşlukların boyutu, boşlukların birbiri ile bağlantı seviyeleri ve bunların kaplama yüzeyine ulaşp ulaşmadıkları su ve hava girişini etkiler. Geçirimsizlik arttıkça hava ve suyun etkisi ile bitümün yaşlanması hızlanır ve soyulma mukavemeti azalır (Tunç, 2004).

### **İşlenebilirlik**

İşlenebilirlik, karışımın karıştırılması ve sıkıştırılması sırasında karşılaşılan kolaylığın ölçüsü olarak ifade edilebilir ve karışımında kullanılan agrega granülometresi, agrega cinsi, bağlayıcı oranı, bağlayıcı sertliği, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı, karıştırma ve sıkıştırma sırasındaki bağlayıcı viskozitesi gibi birçok etkene bağlıdır (Çelik, 2004).

İşlenebilirlik, karışım dizayn parametrelerinde, agregaların özellikleri ve bitümün viskozitesinde yapılacak değişikliklerle yükseltilebilir. Genelde her bitümlü sıcak karışımında, bitüm oranı arttıkça karışımın işlenebilirlik özelliğinin de arttığı ve bitüm viskozitesinin karışımın işlenebilirliğine oldukça etkisi olduğu bilinmektedir (Çelik, 2004).

Yapılan bazı araştırmalarda, bitümlü karışımlar ne kadar çok işlenebilir ise o kadar kolay sıkıştırılabilmekte, kolay sıkışan karışımların da trafik altında o kadar çabuk oluklanmakta olduğu tespit edilmiştir (Uluçaylı, 1998).

### **Esneklik**

Esneklik, karışımının çatlamadan, eğilebilme ve temel ile alttemel tabakalarının uzun dönemli oturmalarına uyum sağlayabilme yeteneğini ifade etmektedir. Farklı oturmalar veya aşırı oturmalar kaplamaya yansıtacağından çatlamalar meydana gelecektir.

Genel olarak, bir kaplama karışımının esnekliğı, yüksek bitüm içeriğı ve nispeten açık boşluklu (gradasyonlu) agregalar ile geliştirilebilmektedir. Ancak, kaplamanın esnekliğı artarsa stabilitesinin azalacağı, düşük esnekliğinde aşırı çatlamalar ile parçalanmalara neden olacağı göz önünde bulundurulmalıdır (Tunç, 2004).

### **Yorulma mukavemeti**

Bir karışımın yorulma mukavemeti, trafik yüklerinden kaynaklanan tekrarlı eğilmelere çatlamadan karşı koyabilme direnci olarak ifade edilebilir.

Farklı yüklerden dolayı oluşacak farklı gerilmelerin yaratacağı farklı deformasyonlar karşısındaki yorulmanın tespiti stabil gerilme veya sabit deformasyon altında yapılmalıdır.

Kaplamanın yeterli sıkışması yorulma mukavemetini artıran önemli bir unsurdur. Çünkü bitümlü kaplamanın rijitliğı arttıkça yorulma mukavemeti de artmaktadır. Yetersiz sıkıştırma veya dizayn hatalarından dolayı yüksek hava boşluğına sahip kaplamaların yorulma ömürleri düşüktür. Kaplamanın, yaşlanması sonucu sertleşmesi de, yorulmaya mukavemetini azaltmaktadır (Harold ve Paul, 1995).

Kaplamada meydana gelen yorulma çatlağı yavaş yavaş ve çok sayıda tekrür eden trafik yükleri altında oluşmaktadır. Kaplama kalınlığının yetersiz olması ve zayıf alt tabakalar olması halinde ağır yük altında aşırı deformasyon kaplama altındaki yanal çekme gerilmelerine neden olacağından yorulma çatlakları oluşacaktır. Bu nedenle, kalın ve iyi destek alan kaplamalar ve çekme mukavemeti yüksek malzeme kullanmak yorulma çatlaklarını önleyecektir. Dolayısıyla yumuşak bitüm sert bitüme nazaran daha iyi yorulma özelliğine sahiptir.

Karışımın rijitliği, yoğunluğu, kohezyonu, filler ve bitüm miktarı arttıkça yorulma mukavemeti önemli ölçüde artmakta ve yorulma çatlakları azalabilmektedir (Tunç, 2004).

### **Kayma direnci**

Kayma direnci, kaplama ile teker arasında gerekli sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. Agregalar arası içsel sürtünme ve bitümün kohezyonu ve viskozluğu kayma mukavemetini belirler. Uygun bitüm içerikleri ve pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar, yüksek kayma direncine katkıda bulunan faktörlerdir.

Sıkıştırılmış kaplama içindeki boşlukları dolduracak derecede bitümce zengin olan karışımlar, kismaya yatkındırlar. Kusma olayı ise bitümlü malzemenin trafik etkisi, iklim şartları ve uygulama hatalarından dolayı kaplamanın yüzeyine çıkması ve burada tamamen bitümden oluşan bir film tabakasının oluşmasıdır (Kuloglu, 2004). Kusma olayı kaplama yüzeyini ıslatmasından dolayı kayma direncinin aşırı düşmesine neden olurlar.

### **2.3. Bitüm Özelliklerinin Performansa Etkileri**

Mühendislikte kullanılan malzemeler yüke ve zamana bağlı olarak gerilme deformasyon yönünden üç gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar;

- Elastik malzemeler
- Viskoz malzemeler
- Visko-elastik malzemeler

Elastik malzemeler gerilmeye tabi tutulduklarında yükün miktarı ile doğru orantılı olarak deformasyon miktarı artar ve tatbik edilen gerilme ortadan kalktığıında deformasyon da ortadan kalkar. Viskoz malzemeler de, gerilme tatbik edildiğinde deformasyon başlar ve gerilme tatbik edildiği sürece deformasyon yükün tatbik süresine bağlı olarak artar. Ancak, gerilme kalktığıında deformasyon kalkmaz yani kalıcı deformasyon oluşmaktadır (Tunç, 2004).

Viskoelastik malzemeler ise ne tam elastik ne de tam viskoz davranış gösterirler. Ayrıca hızlı yüklendiklerinde elastik davranış gösterirken yavaş yüklendiklerinde ise viskoz davranış gösterirler. Yükleme hızının ne hızlı ne de yavaş olduğu durumlarda ise viskoz ve elastik davranışların bileşimi şeklinde davranırlar (Tunç, 2004).

Bitüm viskoelastik malzeme olduğundan, sıcaklığa ve yükleme süresine bağlı olarak davranışları tam viskozdan elastik hale kadar değişiklik göstermektedir. Bu tip malzemeler yüksek yükleme hızlarında (hızlı taşıtlar) elastik, düşük yükleme hızlarında (yavaş ya da duran taşıtlar) viskoz, orta yükleme hızlarında ortak elastik ve viskoz davranış gösterirler.

### **2.3.1. Bitümün ısıya duyarlılığı**

Bitümlü bağlayıcının sıcaklığa hassaslığının göstergesi penetrasyon indisi ile belirlenmekte olup, yumuşama noktası ve penetrasyon değerine bağlıdır. Penetrasyon indisi ( $I_p$ ) aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanır (TS 1081 EN 12591)

$$I_p = \frac{20 \times I_{RaB} + 500 \times \log P - 1952}{I_{RaB} - 50 \times \log + 120} \quad (2.1.)$$

Burada;

$I_{RaB}$  : Yumuşama noktası °C

P : 25 °C 'daki penetrasyon, \* 0,1 mm

Penetrasyon indisi, sıcaklık hassasiyeti yüksek olan bitümler için -3 civarında bir değer ile sıcaklık hassasiyeti düşük olan oksitlendirilmiş bitümler için +7 civarında bir aralıkta değişir (Whiteoak, 2004).

### 2.3.2. Viskozitenin bitümün performans özelliklerine etkisi

Viskozite, sıvının akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Akış karakteristiklerinin (kivamlılığın) bir ölçüsüdür. Bu nedenle bitümün katıldıkları sıcak karışımların önemli özelliklerini (reolojik) etkilemektedir.

Farklı hava sıcaklığı aralıklarında bitümün viskozitesi değişmektedir. Bu değişikliğin bitümlü kaplamada sebep olduğu sorunlar ise tekerlek izi, çatlak ve yorulma olarak karşımıza çıkmaktadır.

Hizmet aşamasında kaplama sıcaklığı yaklaşık, -25°C ile 0°C arasında iken, karışımın viskozitesi oldukça yüksektir ve bu sıcaklık aralığında düşük ısılardan dolayı, kaplamada düşük sıcaklık çatlakları oluşumu gözlenmektedir.

Kaplama sıcaklığı yaklaşık 10°C ile 40°C arasında olduğunda, karışımın viskozitesi azalarak, karışım yumuşamaktadır. Bu sıcaklık aralıklarındaki karışımda, trafik yükü etkisi ile oluşan yorulma döngülerinin oluşumu artmaktadır. Kaplama sıcaklığı yaklaşık, 40°C nin üstüne çıktığında ise karışımın viskozitesi daha da azalmakta ve kaplamada taşıtların etkilerinden dolayı tekerlek izi oluşumu hızlanmaktadır (Balta, 2004).

### **2.3.3. Kohezyonun bitümün performans özelliklerine etkisi**

Bitümlü karışımın stabilitesi agregalar arasındaki içsel sürtünmeye ve bağlayıcının kohezyonuna bağlıdır. Kohezyon bir malzemenin kopmaya karşı koyan moleküller arası çekimi, içsel sürtünme veya içsel bağ olarak ifade edilmektedir. Bitümlerin kohezyon mukavemeti düşük ısıdaki düktiliteleri (sünme) ile karakterize edilmektedir. Düktilite standart bir kalıp içinde şekillendirilen bitüm numunesinin düktilite cihazı ile belli bir ısıda belirli bir hızla çekilerek sünmeye tabi tutulduğunda kopmanın olduğu uzunluk miktarıdır.

Kohezyon, yükleme hızı (trafik hızı) arttıkça, bitümlü bağlayıcının viskozitesi arttıkça yada kaplamanın sıcaklığı düştükçe artmaktadır (Kentucky, 1996).

### **2.3.4. Adezyonun bitümün performans özelliklerine etkisi**

Bitümün adezyon özelliği bitümün kohezyon özelliğinden farklıdır. Fakat bitümlü kaplamaların kohezyon özelliği, bitümün agregaya yapışma yeteneğine yani bitümün adezyonuna bağlıdır. Bitümün adezyonu agregaya yapışabilme yeteneği olarak adlandırılırken, bitümün kohezyonu ise yük altında aynı cins malzeme içerisinde kopmadan uzayabilme yeteneğidir.

Esnek kaplamaların yüzeylerindeki kusurların büyük kısmı genellikle adezyon eksikliği veya bitümün soyulmasından kaynaklanmaktadır. Agregayı saran bitüm filmi bir takım etkenlerle birlikte su tarafından soyulmaya başlamakta ve trafiğin etkisiyle de soyulma artmaktadır.

Soyulmayı önleyici katkıları agrega ile bitüm arasındaki adezyonu artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Soyulmayı önleyici katkı maddesinin kullanılması halinde ıslak ortamda agrega yüzeyine yapışan bitüm küreciğinin temas açısı giderek artmakta yani bitüm küreciği agrega yüzeyine tamamen yapışarak güçlü bir adezyon oluşturmaktadır (Tunç, 2004).

### **3. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI**

#### **3.1. Sınıflandırma ve Tanımlar**

Bozulmuş eski asfalt kaplama malzemesinin yeni kaplama tabakalarının yapımında kullanılması asfaltta geri dönüşüm olarak bilinmektedir. Geri dönüşüm uygulamasıyla, mevcut kaplamada hali hazırda bulunan kaliteli agrega ve bitüm yeniden kullanılmakta, böylece hem agraga ocak işletmeciliği, bitüm gideri, nakliye, kazılmış malzeme için depo yeri vb. harcamalardan ekonomik tasarruf elde edilmekte, hem de kazılmış malzeme atık olarak çevreye verilmediği, doğaya verilen tahribatı ve insan sağlığına zararlı malzemelerin kullanımını azalttığı için çevre ve insan dostu bir çözüm olmaktadır.

Geri Kazanma: Tabii kaynakların sınırsız olmadığı, dikkatlice kullanılmadığı takdirde bir gün bu kaynakların tükeneceği şüphesizdir. Kaynak israfını önlemenin yanında, hayat standartlarını yükseltme çabaları ve ortaya çıkan enerji krizi ile bu gerçeği gören gelişmiş ülkeler atıkların geri kazanılması ve tekrar kullanılması için yöntemler aramış ve geliştirmişlerdir. Aynı gerçeğin ışığı altında Avrupa Ekonomik Topluluğu (Avrupa Birliği) üye ülkelerde atıkların geri kazanılması şartını getirmiştir(Curi ve Kocasoy, 1982).

Çevresel kaygılar, ekonomi ve yenilenemez enerji kaynaklarından tasarruf düşüncesi ile bütün atık malzemelerde olduğu gibi karayolu esnek üstyapı malzemelerinin geri dönüşümü ile ilgili çalışmalar hızla artmaktadır. Geri dönüşüm yönteminde genel olarak, bozulmuş aşınma tabakası veya gerekli ise, aşınma tabakasının altındaki tabakaların bir kısmı veya tamamı kazılmakta, elde edilen malzemeye dizaynla belirlenecek miktarda yeni agrega, bitümlü bağlayıcı ve zaman içerisinde sertleşmiş yaşlı bitümün viskozitesini düşürmek amacıyla, katkı ilave edilmekte, elde edilen karışımdan istenilen kalınlıkta asfalt kaplama yapılarak geri dönüşüm uygulaması tamamlanmış olmaktadır (Güngör ve Orhan, 2008).

Ne yazık ki ülkemizde şu an için yaygın olarak kullanılmayan fakat Arupa'daki birçok ülkede ve Amerika'da sıkça kullanılan geri dönüşüm uygulamalarından birisi de asfalt geri dönüşümüdür. Son yıllarda petrol ürünlerinin fiyatındaki büyük artış, kaliteli agrega temininin güç olması asfalt kaplamalardaki malzemelerin yeniden değerlendirilmesine olan ilgiyi oldukça artırmıştır. Bu uygulamanın önemli bir avantajı da yeni kaplamalarda özellikle şehir içi yollarda büyük problem olan kot artmalarını engellemesidir. Geri dönüşüm işlemleri kaplamanın kazınıp santrale götürüldükten sonra, yeniden işlemde geçirilip tekrar kaplama malzemesi haline dönüştürülmesiyle gerçekleşir.

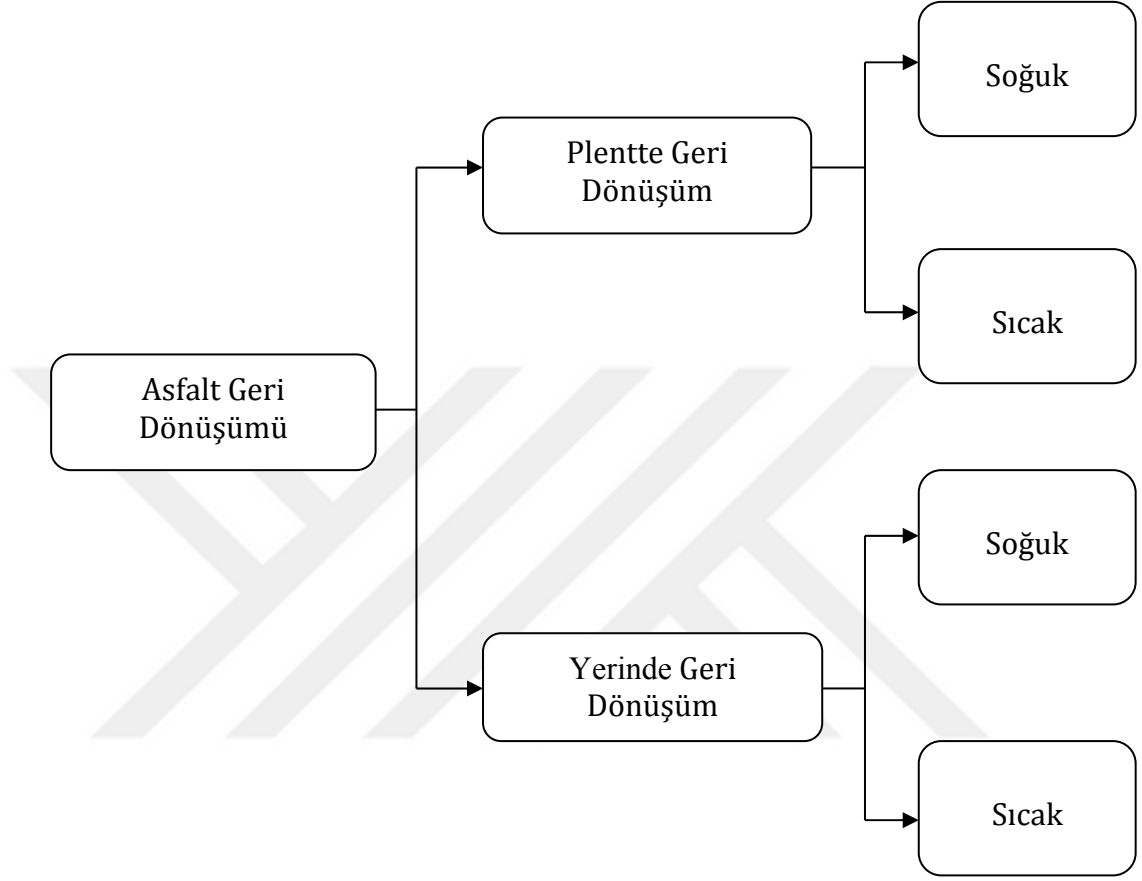
Karayolları geri dönüşüm için elverişli ve oldukça yüksek ekonomik artılar sağlayan bir sektördür ve dünyada karayolları alanında geri dönüşüm yönündeki çalışmalar uzun yıllardan beri devam etmektedir.

Kazınmış Asfalt Kaplama (KAK) malzemesi plentte veya yerinde (yolda) sıcak veya soğuk olarak yeni yapılan BSK imalatlarında kullanılabilmekte, böylece hem bitüm hem de agrega malzemesinden ekonomik tasarruf sağlanabilmektedir. Ayrıca arta kalan KAK malzemesi alttemel tabakasında belli bir oranda kullanılarak üstyapı tabanı iyileştirmesinde de kullanılabilir.

Kaldırılan kaplamanın derinliğine bağlı olarak sınıflandırmaya katılan; yüzeysel geri dönüşüm ve tam derinlikli geri dönüşüm olmak üzere iki ana başlık daha bulunmaktadır. Kaplamanın üst tabakaları aşındığında, bu üst tabakaların kaldırılıp yeniden serilmesi yöntemi, yüzeysel geri dönüşüm olarak bilinir. Ancak aşınma ve bozulmalar taban tabakalarına kadar inmişse, tabanın üzerinde bulunan tüm tabakalar kaldırılıp tekrar serilir. Bu işleme de, tam derinlikli geri dönüşüm adı verilmektedir (Aravind ve Das, 2007).

Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama malzemesi (RAP), kaplama, temel ve alttemel tabakalarının her birinde kullanılabilir. Yoldaki trafik yoğunluğu kullanılacak işlemi seçmede etkili bir faktördür.

Örneğin sıcak uygulama, yüksek trafik hacimli yollarda kullanılabilirken soğuk karışım, daha çok orta ve düşük trafik yoğunluğu olan yollarda tercih edilir (Jacobson, 2002).



Şekil 3.1 Geri dönüşüm yöntemlerinin sınıflandırılması (Basic asphalt recycling manual, 2001).



(a)



(b)

Şekil 3.2. geri dönüşüm için aday yolları (U.S.DOT,2001)

### 3.2. Dünyada Geri Dönüşüm Uygulamaları

Geri kazanım (recycling) tekniği yeni bir teknik değildir. Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa ülkelerinde özellikle Almanya ve Fransa'da yaygın olarak geri kazanılmış asfalt kaplama karışım teknikleri uygulanmaktadır. Günümüzde asfalt kaplamaların kazılması sonucu elde edilen geri kazanım malzemelerinin yeni yapılacak kaplama tabakasındaki kullanım oranları, geliştirilen teknik ve uygulama yöntemleri sayesinde % 80'e varan oranlara çıkabilmektedir (Magazine, 2002)

Araştırmalar, karayollarında geri dönüşüm yöntemlerinin ilk kez Amerika Birleşik Devletleri'nde 1977 yılında denendiğini ve o günden bu yana yapılan uygulamalar sonucunda optimum geri dönüştürülmüş malzeme kullanım oranlarına ulaşıldığını ve bu değerlere göre uygulamalara şartnameler ile bazı kısıtlama ve kurallar getirildiğini, bu sayede büyük ekonomik ve çevresel kazançlar sağlandığını göstermektedir.

Dünya genelinde 30 yılı aşkın geçmişi olan mevcut asfalt kaplamaların geri dönüşümü uygulamalarının; Amerika, Kanada, Fransa, Almanya, Hollanda, Japonya, İngiltere, İspanya gibi ekonomik olarak güçlü, teknolojik altyapısı gelişmiş ve çevre bilinci daha üst düzeyde olan ülkelerde kabul görmesi ve pratikte uygulamaya geçişi çok daha hızlı olmuş, devlet kurumları ve yerel idarelerce adaptasyonu için yasal ve finansal destek sağlanmıştır. Avrupa'nın diğer ülkelerinde de giderek artan oranda geri dönüşümlü asfalt kaplama uygulamasına geçiş başlamıştır.

Geri dönüştürme işleminin ilk uygulandığı yer olan Florida'da 30 yılı aşkın süredir devam eden süreci incelersek; karayollarında geri dönüşümlü asfalt kaplama kullanmanın sayısız faydası olduğunun bilincindeki Florida Ulaşım Departmanı (FDOT) malzeme maliyetinden yapılan tasarrufun daha çok yol yapılmasına olanak sağlamasının yanı sıra, yeni agrega üretimi, işlemesi ve nakliyesi gibi çok konuda enerji tasarrufu yapıldığının bilincine çok erken vararak geri dönüşümlü asfalt kaplamalar konusunda ilk adımları atmışlardır.

Florida West Palm Beach'te ilk kez 1977'de uygulanan bu geri dönüşümlü asfalt kaplama uygulama projesinde, %25 RAP içeren bir ağırlıklı tip plentten üretilen 25.000 ton sıcak asfalt karışımı kullanılmıştır. 1978'de Panama City'de yeni yol yüzeyi oluşturmak için yapılan başka bir projede modifiye edilmiş bir ağırlıklı tip plentten %30 RAP içeren karışım kullanılmıştır. Daha sonra 1979 yılında, Ocala'da yeni bir deneme yapılmış sürekli tip plentte üretilen yüksek RAP içerikli 31.500 ton malzeme kullanılmıştır. O zamanın şartları içinde yapılan uygulamanın her aşamasında planlı ve bilinçli hareket etmediklerini kurumun kendisinde ifade etse de uygulanan kaplamanın 12-13 yıl kadar dayandığı bilinmektedir (Michelle, 2007).

Yeterli miktarda denemeler sonucunda oluşturulan sıcak asfalt karışımı (HMA) 1980 şartnamelerinde, %60 a kadar RAP kullanımına izin verilmiş ve bu malzeme Florida'da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. İlerleyen yıllarda, yol kaplamalarında şiddetli tekerlek izleri göze çarpmış ve sonuç olarak RAP kullanımına bir sınır getirme kararı alınmıştır. 1990'larda Superpave şartnameleri oluşturulduğunda, mazeme gradasyonu konusunda yeni ve karşılması daha zor sınırlamalar ortaya çıkmış ve karışıma katılacak geri dönüşümlü asfalt kaplama (RAP) kullanım oranının azaltılması gerektiği belirlenmiştir.

2000'li yıllardan sonra, Florida'da artan nüfus, yeni yolların yapılmasını gerektirmiş, dolayısıyla yeni yapılacak yollar için gereken agrega, bitüm ihtiyacı baskı oluşturmuştur. Bu baskı sonucunda Florida Ulaşım Departmanı, yeni ekipman ve malzeme teknolojilerinin yardımıyla, geri dönüşümlü malzeme kullanımını tekrar gözden geçirmiş ve kullanım oranının artırılması yolunda karar almıştır (Michelle, 2007).

1980'lerde %50'den %20'ye düşürülmesine rağmen Florida'nın mevcut karayollarında bugün, karışımında %60 oranında geri dönüştürülmüş asfalt malzeme (RAP) bulunan sıcak karışımlı yollar yapılmaktadır.

Diğer bir önemli konu ise başlangıçta RAP malzemenin içindeki agrega kalitesinin belirlenememesi nedeniyle cilalanma etkisi konusunda şüphelerin oluşması idi. Yeni ekipmanlar, malzeme teknolojisi ve üretimindeki gelişimler, bitüme polimer ilave edilerek üretilen Polimer Modifiye Bitüm (PMB), güçlü adhezyon kabiliyetleri ile suyun bağlayıcı malzeme olan bitüm ile agrega arasına girmesini önlemiş, kaplamanın sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetini azaltmış, karışımın kalıcı deformasyonlara ve yorulmaya karşı direncini artırmıştır. Bu gelişmeler sayesinde 1970 ve 1980'lerdeki ilk denemelerde sıkça karşılaşılan çatlama ve tekerlek izi problemlerinden endişe etmeden, RAP malzeme yüksek kaliteli aşınma tabakasında dahi kullanmaya olanak sağlamaktadır.

Geri dönüşümlü asfalt kaplama uygulamaları dünya genelinde artmaya başladıkça iyileştirilmek istenen mevcut asfaltın sökümü ve uygulamanın daha seri ve sağlıklı biçimde yapılabilmesi için kaplamayı istenen derinlikte ve profilde kazıyan asfalt kazıma makineleri kullanılmaya başlanmıştır. Asfalt kaplamanın kazıma işleminin bu özel ekipmanlarla yapılması kalite ve zaman açısından belirgin avantajlar sağladığı gibi geri dönüştürülecek malzemenin de daha efektif kullanılmasına izin vermektedir.

Bu konuda ilk uygulama yapılan yer olmasının yanında araştırma, geliştirme ve uygulama anlamında yeni gelişmeleri takip eden Florida Karayolları, Amerika dahilinde en kaliteli kaplamaya sahip olan yollarıyla bu çabalarının sonucunu almış bulunmaktadır.

Amerika Ulusal Karayolları FHWA araştırmacıları, 2008 yılından sonra bitüm maliyetlerindeki (Petrol fiyatının artması nedeniyle) aşırı artışlar, RAP kullanımında tekrar artışa neden olabileceğini vurgulamaktadırlar. Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulanan bazı geri dönüşüm uygulamalarında kullanılan RAP miktarlarını gösteren Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi, 2007 ve 2008 yıllarında, karışımlarda %50'lere varan oranda RAP kullanılmaktadır (Michelle, 2007).

Çizelge 3.1. Amerika Birleşik Devletlerinde uygulanmış bazı projeler ve Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplama (RAP) kullanım oranları (www.fhwa.dot.gov).

| Bölge              | % RAP     | Yapım Tarihi |
|--------------------|-----------|--------------|
| Kuzey Carolina     | 40 %      | Eylül 2007   |
| Güney Carolina     | 30 - 50 % | Ekim 2007    |
| Wisconsin          | 25 %      | Kasım 2007   |
| Florida            | 45 %      | Aralık 2007  |
| Kansas             | 30 - 40 % | Mayıs 2008   |
| Delaware           | 35 %      | Yaz 2008     |
| Minnesota(Mn Yolu) | 30 %      | 2008         |
| Illinois           | 10 - 50 % | 2008         |

### 3.3. Asfalt Geri Dönüşüm Yöntemleri

Çeşitli kaplama bozulma türleri ve yapısal gereksinimler için günümüzde çeşitli geri dönüşüm metotları mevcuttur. Asfalt geri dönüşüm ve rehabilitasyon birliği (Asphalt Recycling and Reclaiming Association-ARRA) beş farklı geri dönüşüm tekniği tarif etmektedir. Şöyle özetlenebilir: (Güngör vd., 2008).

- Soğuk düzeltme - Cold planing (CP).
- Sıcak geri dönüşüm - Hot recycling.
- Sıcak yerinde geri dönüşüm - Hot in-place recycling (HIR).
- Soğuk geri dönüşüm -Cold Recycling (CR).
- Tam derinlikten geri kazanma-Full depth reclamation (FDR).

#### 3.3.1. Soğuk düzeltme - Cold planing (CP):

Soğuk düzeltme mevcut kaplamanın istenilen derinlik, boykesit ve enine eğimde kontrollü olarak olduğu yerden kaldırılmasıdır. Bu işlem sonucunda ortaya çıkan yüzey dokusu; işlem biter bitmez yolun trafiğe açılmasına imkan verebildiği gibi, diğer asfalt geri dönüşüm yöntemlerinden biriyle müdahale edilebilmesine ya da mevcut tabaka kaldırıldıktan sonra temizlenip asfalt tabakalarının birbirine daha iyi yapışmasını sağlayan yapıştırma (tack coat) tabakası atıldıktan sonra standart sıcak karışım asfalt kaplama veya geri

dönüşümlü asfalt tabakasıyla kaplanmasına izin verecek şekilde üç farklı çözüm yöntemi sunar.

Bunların dışında soğuk düzeltme (cold planing) işlemi yolun kayganlığını azaltmak amacıyla ve yolun pürüzlülüğünü ve dolayısıyla sürtünmesini artırmak amacıyla da uygulanabilir. Şekil 3.3.'de görülen yol yüzeyleri bu amaçla yapılan uygulamalara örnek olarak gösterilmiştir (U.S.DOT, 2001).



Şekil 3.3. Soğuk düzeltme işleminden geçmiş yol yüzeyi örnekleri (U.S.DOT,2001)

Soğuk düzeltme işleminde kullanılan kazıma makineleri kaplama yüzeyini istenen derinlikte ve enine eğimde kesebilen kendinden yürür ekipmanlardır. İşlem sırasında gerek makinede kullanılan parçaların olası yıpranma paylarını azaltmak, dolayısıyla servis ömrünü uzatmak, gerekse işlem sırasında ortaya çıkacak tozu kontrol edebilmek amacıyla su kullanılır. Gereken su, kesici uçların bulunduğu bölgeye çok sayıda enjektör aracılığıyla iletilmektedir.

Son yıllarda üretilen tüm kazıma makinelerinde otomatik eğim kontrolü seçeneğiyle istenilen yüksekte ve eğimde kazı yapmak çok kolay bir işleme dönüşmüştür. Uygulamalarda yolun bozulma derecesine göre en üstteki tabaka ya da tabakalar kaldırıldığı gibi tüm bitümlü tabakalarında kazınarak yolun temel seviyesinede ulaşılabilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Asfalt kazıma makinası (Randy C. West, 2010).

Soğuk düzeltme (Cold Planing) işlemi sırasında kazıyıcı tarafından yoldan sökülen asfalt kaplama malzemesi konveyörler aracılığıyla direkt olarak kamyonlara yüklenerek sahadan uzaklaştırılır (Şekil 3.5a,b).



(a)



(b)

Şekil 3.5. Soğuk Düzeltme (Cold Planing) Uygulamaları

Geri dönüştürülecek olan malzeme (RAP) pek çok yerde değişik amaçlarla kullanılabilir; geri dönüşüm işlemlerinden soğuk plentte geri dönüşüm (CCPR) veya sıcak geri dönüşüm aşamalarından geçirilip yeni yapılacak asfalt karışımlarına katılabileceği gibi yol inşaatında temel gövdesini oluşturmada, hendek kaplamalarında, yol tamir işlerinde veya direkt olarak stabilize yol yapımında kullanılabilir.

**Soğuk düzeltme (CP) işleminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:**

- Sürüş konforunu çok olumsuz etkileyen tekerlek izlerinin, bozulmuş kaplama yüzeylerinin ve /veya okside olmuş asfaltın kaldırılması.
- Boyuna profil ve enine eğimlerin istenildiği gibi düzenlenmesi.
- İsteniyorsa yolun yüzeySEL drenajının yeniden modellenmesi.
- İleriye yönelik olarak yolun yeniden yapımı ya da banket genişletilmesi gibi projelerin daha rahat uygulanabilmesi için yolun mevcut asfalt tabakalarının kaldırılması.
- Yama ya da tamir işlerinde çatlaklı ya da bozuk kesimlerin sağlıklı şekilde kaldırılarak ön hazırlık yapılması.
- Sürtünmenin artırılması.
- Diğer yeniden yapım yöntemlerine göre daha az enerji tüketimi.
- Kamuyu daha az rahatsız edip daha verimli çalışma (ARRA Asphalt Recycling and Reclaiming Association Basic Manual, 2001).

**3.3.2. Sıcak geri dönüşüm - Hot Recycling.**

Sıcak geri dönüşüm, hizmet ömrünü tamamlamış kaplamadan sökülen asfalt malzemesinin merkezi bir plente taşınarak yeni agrega, bitüm ve gerekirse özel katkı malzemeleriyle karıştırılmasıyla yapılan geri dönüşüm işlemidir. Özel tasarlanmış veya modifiye edilmiş harman tipi veya tambur tipi sıcak karışım plentleri geri kazanılmış karışımlar üretmek için kullanılabilir. Sıcak geri dönüşümde araziden sökülen malzeme soğuk bir şekilde plentin mikserine ilave edilebilmektedir.

Bu durumda atık malzemeden faydalanma oranı düşük olmaktadır. Özel plantlerin fiyatı yüksek olduğundan bu yeni teknoloji ülkemiz şartnamelerine soğuk besleme yöntemiyle girmiştir.

Klasik yöntemlerde olduğu gibi RAP malzemeleri öğütme veya sökme ve kırma operasyonları ile elde edilebilir. KGM teknik şartnamesi en fazla %25 oranında atık malzemenin sıcak geri dönüşümde kullanılabileceğini belirtmiştir (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013).

Asfalt kaplamaların geri dönüşümü uygulamalarında sıcak geri dönüşüm yöntemi (hot recycling) bazı ülkelerde en fazla tercih edilen yöntemdir. Birçok ülkede sıcak geri dönüşüm uygulamasında kullanılan geri dönüştürülecek asfalt kaplama (RAP) yüzdesi farklı değerlerde karışıma katılmaktadır. Birçok farklı kurumun yaptığı incelemeler ve teknolojideki gelişmelerle geri dönüştürülecek malzemenin sıcak geri dönüşümdeki karışım yüzdesinin artırılması ve yolun sadece bitümlü temel ya da binder değil son kat olan aşınma tabakasında da kullanılabilmesi konusunda ilerlemeler sağlanmıştır.

Sıcak geri dönüşüm yönteminde; geri dönüştürülecek malzeme (RAP) ile karışıma girecek olan yeni agrega arasında ısı transferi yaşanacağından geri dönüştürülecek malzemenin (RAP) karışıma girmeden önceki rutubet değerinin minimumda kalacak şekilde hazırlıklı olunması önemlidir. Fazla olan rutubet karışıma girecek olan yeni agreganın rutubetini de arttıracığından yumuşatma işlemi için kullanılması gereken ısı enerjisi agrega karışımının kurutulmasına harcanacak ve dolayısıyla plant üretim kapasitesini olumsuz etkileyecektir.

Sıcak geri dönüşüm aşamasından geçen karışımın, standart bitümlü sıcak karışımdan (BSK) taşıma, serme ve sıkıştırma aşamalarında bir farkı olmadığı gibi yıllardır yapılan performans gözlemleri sonucunda kalite ve dayanım özellikleri açısından da farkı bulunmamaktadır (ARRA Asphalt Recycling and Reclaiming Association Basic Manual, 2001).

Sıcak karışım asfalt üretiminde sıcak karışım geri dönüşüm yöntemi kullanımı, enerji tasarrufu sağlamak, doğal agrega kaynaklarının tükenmesine engel olmak ve ekonomik yararlar sağlamak gibi nedenlerle gündeme gelmiştir (Eren, 2001).

Bu işlemin yerinde yapılan geri dönüşümden farkı ısıtma işleminin plentte yapılmasıdır. Mevcut kaplamadan kazınan ve daha sonra kullanılmak üzere depolanan malzeme, ağırlıklı tip ya da sürekli tip sıcak asfalt plentinde işlem görür. Geri dönüştürülen malzeme, bu uygulamada kullanılan çeşitli yöntemlerle, çevreye fazla miktarda duman ve zararlı emisyon yaymadan ısıtılabilir. Sıcak karışım geri dönüştürme işlemi için yapılan çeşitli laboratuvar deneyleri, bu yöntemle elde edilen karışımın, yeni malzeme kullanılarak hazırlanan bitümlü karışımlarla aynı performans düzeyinde olabildiğini göstermektedir (Whiteoak, 1990).

#### **Geri Kazanılmış Bitümlü Sıcak Karışımlar İçin Gençleştirici:**

Geri kazanılmış bitümlü sıcak karışımlar için gençleştiriciler, yoldan kazınarak elde edilen karışımdaki yaşlanmış bitümün kimyasal ve fiziksel özelliklerini modifiye ederek iyileştirmek için kullanılır. Kazınmış asfalt ile üretilerek yeniden serilen kaplamanın daha esnek olmasını sağlar. Plentte veya yerinde hazırlanan ve kazılmış malzeme kullanılan her türlü bitümlü sıcak karışımda kullanılır. Agrega ile bitümen birbirine daha iyi yapışmasını sağlar, viskoziteyi düşürür ve antioksidan etkisi yaşlanma ile kaybedilen bitümün özelliklerini geri kazandırır.

#### **Sıcak Geri Dönüşüm işleminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir :**

- Yenilenemeyen kaynakları koruması.
- Diğer geleneksel metotları ile karşılaştırıldığında daha az enerji tüketimi.
- Geleneksel metotlarında ki doğal atık sorunları ortadan kalkması.
- Ortaya çıkan yükseklik durdurması ve asma açıklık sağlanması

- Enerji tasarrufu sağlamaktadır.
- Doğal agrega kaynaklarının tükenmesine engel olmak sağlamaktadır.
- Ekonomik yararlar sağlamaktadır.

### **3.3.3. Sıcak yerinde geri dönüşüm - Hot in-place recycling (HIR).**

Sıcak yerinde geri dönüşümde katar olarak isimlendirilen birbiri ardına dizilen iş makineleriyle arazide geri dönüşüm işlemi gerçekleşmektedir. Yerinde sıcak geri dönüşüm (HIR) uygulamasının önemli bir özelliği geri dönüştürülmek üzere olduğu yerden kazılan mevcut asfalt kaplamasının % 100'ünün işleme girmesidir. Uygulamanın ilk yıllarında tipik iyileştirme derinliği (20-50) mm arasında değişmekle birlikte bu kazıma ve geri dönüştürme derinliği günümüzde geliştirilen özel ekipmanlarla 75 mm ye kadar çıkabilmektedir.

Sıcak yerinde geri dönüşüm yönteminde mevcut asfalt kaplama ısıtma düzeneği kullanılarak yumuşatılır. Isıyla işlenebilir ve kolay müdahale edilebilir hale getirilen asfalt kaplama tabakası; kazıma ve agrega tanelerinin kaplama tabakasından ayrışması işlemlerinden (scarification, milling) geçirilir. Kazınan ve gevşek hale geçen asfalt kaplama çok iyi biçimde harmanlanıp homojen bir karışım oluşturularak yeni karışımın tekrar yola serilmesi ve sıkıştırılması işlemleri gerçekleştirilir. Zaman kaybı olmadan birbirini takip eden bu aşamalar sırasında gerek duyulduğu takdirde karışıma yeni agrega, yeni bitüm, katkı malzemeleri ve/veya yeni bitümlü sıcak karışım ilavesi yapılabilir.

Genelde yeni agrega ya da yeni bitümlü sıcak karışımın ana karışıma eklenme oranları ana karışımın ağırlıkça % 30'unun altında kalır. Katkı oranları mevcut asfalt kaplamanın laboratuvar ortamında belirlenen özellikleri ve yeni karışımda hedeflenen tasarım kriterleri göz önüne alınarak belirlenir (ARRA Asphalt Recycling and Reclaiming Association Basic Manual, 2001).

Bu işlemin yerinde yapılması daha az zaman aldığından, trafikte oluşacak aksamlar ve malzeme taşınmasına gerek kalmadığından, taşıma maliyetleri azalmaktadır. Ancak bu işlemin yapılmasında kullanılan ekipmanlar hayli büyük olduğundan, çalışma alanını oluşturmak için yolda şerit kısıtlamasına gitmek gerekmektedir. Şehir içinde uygulanan yerinde geri dönüşümlerde bu unsuru göz önünde bulundurmakta fayda vardır (Aravind ve Das, 2007).

### **Sıcak yerinde geri dönüşüm yöntemi 3 alt başlıkta incelenebilir ;**

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

Yüzeysel Geri Dönüşüm en eski sıcak yerinde geri dönüşüm yöntemidir. Isıtılarak yumuşatılan mevcut asfalt kaplama kazınarak gevşek hale getirilir daha sonra gerekiyorsa katkı malzemesi ilave edilir. Gevşek halde bulunan geri dönüştürülecek karışım iyice karıştırıldıktan sonra standart asfalt serim ekipmanlarıyla yerine yerleştirilir. Serilen malzemenin sıkıştırma işlemi geleneksel lastik tekerlekli, düz çelik bandajlı ve/veya vibrasyonlu çelik bandajlı silindirler yardımıyla gerçekleştirilir.

Yüzeysel geri dönüşüm yönteminde yeni bitümlü sıcak karışım veya yeni agrega işleme girmez. Dolayısıyla kaplamanın işlem sonundaki kalınlığı aynı kalır. Yüzeysel geri dönüşüm yöntemi çoğunlukla yeni yapılacak bitümlü sıcak karışım kaplama tabakasının alt yüzeyini oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. BSK kaplama tabakası (aşınma) yerine chipping (chip seal) adı verilen bitümlü emülsiyon malzemenin ince film halinde yol yüzeyine püskürtüldükten sonra maksimum tane çapı 10-12 mm arasında ince taneli agregaların (fine aggregate) serpiştirilmesi de kullanılan bir yöntemdir.

Düşük trafik hacimli yollarda yüzeysel geri dönüşüm yönteminden sonra herhangi bir sıcak karışım kaplama ya da chipping uygulamasına gerek kalmadan karışımın yeterli sıkışma yüzdesine erişmesi sağlandıktan sonra ilgili yol kesimi trafiğe açılabilir (ARRA Asphalt Recycling and Reclaiming Association Basic Manual, 2001).

- **Yeniden Karıştırma (Remixing)**

Yeniden karıştırma yöntemi mevcut kaplamanın ciddi iyileştirme, yenileme gerektirdiği durumlarda uygulanır. Bu yöntemde yüzeysel geri dönüşüm yönteminden farklı olarak ısıtılarak yumuşatılan ve kazınan kaplamaya yeni agrega, yeni bitüm, katkı malzemesi ve/veya yeni bitümlü sıcak karışım malzemesi ilavesi yapılır. Genel uygulamada yeniden karıştırma işleminden geçirilen ve tekrar serilip sıkıştırılan yol aşınma tabakası olarak kullanılır. Bunun yanında chipping veya yeni bitümlü sıcak karışım kaplamasının ayrıca uygulandığı örnekler de görülmektedir (ARRA Asphalt Recycling and Reclaiming Association Basic Manual, 2001).

- **Yeniden Kaplama (Repaving)**

Yeniden kaplama yöntemi yüzeysel geri dönüşüm ve yeniden karıştırma yöntemlerinin birleştirilmesiyle yeni bitümlü sıcak karışım tabakasının serilmesinin eşzamanlı olarak yapılmasıyla meydana gelir. Yüzeysel geri dönüşüm veya yeniden karıştırma aşamasından geçen mevcut kaplama ve yeni serilecek olan (BSK) bitümlü sıcak karışım kaplama tabakası birlikte sıkıştırılır. Bu iki tabakanın birbiri ardına vakit kaybetmeden serilmesi ve eşzamanlı olarak sıkıştırılması sağlandığı takdirde yeni kaplama tabakasının kalınlığı standart uygulamalardan daha ince olabilir. Yeni serilecek bitümlü sıcak karışım tabakasının aşınma tabakası olarak davranacağı uygulamalarda, yüzeysel geri dönüşüm işleminden geçen tabaka düzeltme tabakası (levelling course) görevini yerine getirir.

Yeniden kaplama yöntemi de tek geçişli ve çok geçişli olarak ikiye ayrılabilir. Çok geçişli yöntemde; yüzeysel geri dönüşüm işleminden geçen tabaka kazıma makinesinin tablası ve kot ayarlama sistemiyle boyuna profil ve enine eğim ayarlamaları yapılarak ilk tabaka serimi tamamlanır. Sonrasında yeni bitümlü sıcak karışım standart asfalt sericiler aracılığıyla alttaki yüzeysel geri dönüşüm aşamasından geçmiş ve sıkıştırılmamış tabakanın üzerine serilir. İki tabaka eş zamanlı olarak lastik tekerlekli ve demir bandajlı titreşimli silindirler yardımıyla sıkıştırılır.

Tek geçişli yöntemde ise iki parçalı bir ünite yardımıyla tüm işlemler yapılmaktadır. Bir taraftan ısıtılıp yumuşatılan asfalt tabakayı kazıyıp gerektiği miktarda gençleştirici katkıyı kazıdığı malzemeyle harmanlarken, diğer parça yeni bitümlü sıcak karışımı bünyesine alır ve işlemde geçirilerek yeniden serilen geri dönüştürülmüş tabaka üzerine ikinci kat olan yeni bitümlü sıcak karışımın uygulanmasını sağlar. Sonraki aşamada diğer yöntemde olduğu gibi iki tabakanın aynı anda sıkıştırma işlemine başlanır (ARRA Asphalt Recycling and Reclaiming Association Basic Manual, 2001).

**Sıcak yerinde geri dönüşüm işleminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir :**

- Yenilenemeyen kaynakları koruması
- Diğer geleneksel metotları ile karşılaştırıldığında enerji korumasını sağlamaktadır.
- Rehabilitasyon metotları ile karşılaştırıldığında kamyonların taşımalarını azaltılmaktadır.
- Geleneksel metotlarında ki doğal atık sorunları ortadan kalkması.
- Karayolların genişliğini tam çözmek veya sadece sürüş şeridi.
- Yüzey düzensizlikleri ve çatlakları kesilip ve doldurulması.
- Sürüş kalitesini geliştirmektedir.
- İnşaat yerinde trafik aksamalar ve kullanıcı rahatsızlığı azaltmaktadır.
- Ekonomik tasarrufu sağlamaktadır.

### 3.3.4. Soğuk geri dönüşüm -Cold Recycling (CR).

Soğuk yerinde geri dönüşüm yönteminde mevcut kaplamanın tamamının geri dönüşümü sağlanmaktadır. Onarım derinliği 75 mm'den 100 mm'ye Kadar değişmektedir. Katkı maddesi olarak asfalt emülsiyon veya emülsifiye geri dönüşüm katkısı kullanıldığında 50-100 mm kalınlıkta, portland çimentosu, kireç gibi kimyasal katkıları kullanıldığında ise 125-150 mm kalınlıkta geri dönüşüm sağlanabilmektedir. Soğuk geri dönüşüm uygulamaları iki alt başlıkta toplanmaktadır;

- Soğuk Yerinde Geri Dönüşüm (Cold In-Place Recycling)
- Soğuk Plentte Geri Dönüşüm ( Cold Central Plant Recycling)

Soğuk yerinde geri dönüşüm uygulamaları kamyon, asfalt kazıyıcı, kırma ve eleme üniteleri, karıştırıcı, serim makineleri ve silindir gibi çok sayıda ekipmanın birlikte kullanıldığı kombine sistemlerdir. Bu ekipmanların tıpkı sıcak yerinde geri dönüşüm yönteminde olduğu gibi uygulama gereği birbirine yakın mesafede seyretmesi gerektiğinden ekipmanların toplu halde olduğu görüntü de dikkate alınarak tüm bu makine ekipman topluluğu için tren tabiri kullanılmaktadır.

Soğuk yerinde geri dönüşüm; bozulmuş kaplama tabakasının, bazı durumlarda temel tabakasını da içine alacak derinlikte, yerinde veya kaldırılarak soğuk olarak karıştırılarak yeniden işlenmesidir. Oluşturulan soğuk karışım, temel tabakası olarak kullanılabilirdiği gibi, daha yüksek mukavemetli bir temel olması için, asfalt ve/veya diğer katkı maddeleri (kireç, çimento gibi) eklendiği uygulamalarda vardır. Genelde katkı malzemesiyle yapılan karışımlar , bir aşınma tabakası veya kaplama tabakası serilmesi gereken durumlarda uygulanmaktadır (Pamuk, 1986).

Soğuk geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalı yollarda mühendislik gerekliliklerini karşılamak amacıyla, viskoziteyi düşürmek ve/veya penetrasyonu artırmak için genellikle bitümlü bağlayıcıyı güçlendirmek ya da artırmak önemlidir.

Bu durum, emilsüfiye edilmiş ya da köpürtülmüş bitümden oluşan bir veya daha fazla maddenin eklenmesiyle gerçekleştirilir. Bir miktar ilave agrega da karışımın derecelenmesini ya da hava boşlukları içeriğini ayarlamak için eklenebilir.

Soğuk asfalt karışımlar, kaplama yüzeylerinin zemin ve zemin altı için kullanılabilirler. Her ne kadar soğuk karışım geri dönüşümü için herkesçe kabul görmüş tasarım yöntemleri bulunmasa da, Asfalt Enstitüsünün önerdiği ve çoğu firmanın kullandığı yöntem Marshall karışım tasarım yönteminin bir varyasyonudur. Asfalt soğuk karışımı için herkes tarafından kabul edilmiş yapısal tabaka katsayı değeri yok iken, soğuk karışım asfaltın sıcak karışımın yapısal eşdeğeri olmadığı fakat kırma taş ya da çakıldan daha üstün olduğu kabul edilmektedir. Asfalt soğuk karışımının temel tabakalarında yapısal anlamda ve yolun dayanıklılık süresinin uzatılması açısından kaplama yüzeyi olarak kullanılması tavsiye edilmemektedir. Geri dönüştürülmüş soğuk karışımın yapısal dayanım kapasitesi, geleneksel soğuk karışım kaplama malzemesi ile eşit olarak düşünülebilir (John, 2009).

Şekil 3.6'da düşük trafik yoğunluğu olan bir yolda uygulanan yerinde soğuk geri dönüşüm uygulaması görülmektedir. Trafik yoğunluğu düşük olsa dahi, yerinde geri dönüşüm uygulamaları sırasında trafik güvenliği açısından ek önlemler alınması, gerek uygulamanın sağlıklı yapılması gerekse akan trafiğin engellenmemesi açısından oldukça önemli bir konudur.



Şekil 3.6. Soğuk yerinde geri dönüşüm katarı ( Aksoy, 1993)

Soğuk yerinde geri dönüşümün avantajları; önemli bir yapısal iyileştirmeyi içermesi, çoğu kaplama bozulmalarını onarması, seyahat konforunu artırması ve minimum nakliye maliyeti olarak sıralanabilir( Aksoy, 1993).

Soğuk yerinde geri dönüşüm yönteminde sıcak yerinde karışım yönteminde olduğu gibi birbirini belirli aralıklarla takip eden tankerler, kazıma makinesi, parçalama ve eleme birimleri, karıştırıcı, serici ve sıkıştırıcıdan oluşan katar kullanılmaktadır

### **Soğuk Geri Dönüşüm işleminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir :**

- Yeni agrega kullanımını önler veya azaltır.
- Kullanılan bitüm miktarında azalma olur.
- Depolama maliyetlerini ortadan kaldırır.
- Malzeme nakliyesi en aza indirilmiş olur. Böylece enerji ve yakıt tüketimi ve trafik yükünün yola verdiği hasarlarda da azalma olur.
- Ocak ve plent işletmesine ihtiyaç kalmaz.
- Üretimde ısıtma işlemi olmadığı için enerjiden tasarruf sağlanır.
- Soğuk uygulama olması nedeniyle üretim, serme ve sıkıştırma işlemlerinde çevreye verilen zararlı emisyon gazları en aza indirilir.
- Kaplama çapraz eğimi ve profili iyileştirilebilir.
- Önemli yapısal muamele ve sürüş kalitesini geliştirmektedir.
- İnşaat yerinde trafik aksamalar ve kullanıcı rahatsızlığı azaltmaktadır.
- Ekonomik tasarrufu gerçekleştirilmektedir.

#### **3.3.5. Tam derinlikten geri kazanma-Full Depth Reclamation (FDR).**

Tam derinlikten geri kazanım, stabilize bir temel tabakası oluşturmak için asfalt kaplama tabakalarının tamamının ve taban malzemesinin önceden tespit edilen miktarının işleme alındığı geri dönüşüm metodu olarak tarif edilir. İyileştirme sırasında bitüm emülsiyonu, portland çimentosu, uçucu kül ve kireç gibi kimyasal katkıları eklenebilir. Bu süreçteki beş temel adım kazıma-ufalama, katkının uygulanması, karıştırma, serme ve sıkıştırma. Bu geri dönüşüm metodu normalde 100mm'den 305mm kalınlığa kadar yapılır. Bu yöntemini sıcak geri kazanıma göre daha az mukavemetli olması, yerinde yapılan geri kazanımların daha az kontrol dışında olması gibi dezavantajları olsa da; hafif trafikli yollarda uygulanmasında, eski kaplamalardaki yüzey bozukluklarının giderilmesi, taşıt işletme maliyetlerinin azaltılması, tüm eski malzemenin nakliye yapılmadan yeniden kullanılması, trafiğe kısa sürede açılması, çevre kirliliği olmaması gibi önemli avantajları bulunmaktadır (Gürer vd., 2004).

Bu yöntemde soğuk yerinde geri dönüşüm yönteminde olduğu gibi ısı kullanılmamaktadır. Eğer mevcut gradasyon hedeflenen gradasyonu sağlamıyorsa ilave granüler agrega karışıma eklenebilmektedir. Tam derinlikten geri kazanma yöntemi ile temel tabakası elde edilmektedir.

**Tam derinlikten geri kazanma işleminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir :**

- Yenilenmeyen kaynakların korunması.
- Diğer geleneksel metotları ile karşılaştırıldığında enerji korumasını sağlamaktadır.
- Ekipman için az parça gerekmektedir.
- Tümsekler, yığılmalar, tekerlek izi, çukurları ve çatlakların ortadan kaldırılması.
- Mevcut agrega granülometrik problemleri, granül malzemelerinin uygun seçimi ile çözülebilir.
- Yüzeyi, profili ve kanalizasyonu (drenaj) restore edilmesi için bozulan zemin yeniden şekillenir.
- İnşaat yerinde trafik aksamalar ve kullanıcı rahatsızlığını azaltmaktadır.
- Ekonomik tasarruf gerçekleştirilmektedir.

ARRA tarafından bozulma türleri önceliklerine göre (1) yüzey kusurları, (2) deformasyonlar, (3) çatlama, (4) bakım yamaları, (5) temel/alttemel problemleri, (6) seyahat konforu/pürüzlülük olarak sıralanmaktadır. Bu bozulma türlerine göre ARRA alternatif geri kazanım yöntemini seçmek için Çizelge 3.2'yi önermektedir. Bu çizelge, sıcak karışım geri dönüşümünün temel ve alttemel problemleri hariç bütün bozulmaların onarılmasında kullanılabildiğini göstermektedir (Güngör, Orhan, 2008).

Çizelge 3.2. Bozulma türüne göre geri dönüşüm yöntemi seçimi (Güngör, Orhan, 2008)

| KAPLAMA BOZULMA<br>TİPİ                                                                                                             | SOĞUK<br>DÜZELT<br>ME<br>(CP) | SICAK<br>GERİ<br>DÖNÜŞÜ<br>M | SICAK<br>YERİN<br>DE<br>GERİ<br>DÖNÜŞ<br>ÜM<br>(HIR) | SOĞUK<br>YERİNDE<br>GERİ<br>DÖNÜŞÜM<br>(CR) | TAM<br>DERİNLİKT<br>EN<br>GERİ<br>KAZANIM<br>(FDR) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Yüzey kusurları<br>- Sökülme<br>- Cilalanma                                                                                         | X<br>X                        | X<br>X                       | X<br>X                                               |                                             |                                                    |
| Kalıcı Deformasyon<br>- Tekerlek izi-sığ<br>- Tekerlek izi-derin                                                                    | X                             | X<br>X                       | X                                                    | X                                           | X                                                  |
| Çatlaklar/trafikten<br>kaynaklanan<br>-Timsah sırtı<br>- Boyuna çatlaklar<br>- Kaplama kenarı<br>çatlakları<br>- Yansıma çatlakları |                               | X<br>X<br>X<br>X             | X<br>X                                               | X<br>X<br>X                                 | X<br>X<br>X                                        |
| Çatlaklar/trafikten<br>kaynaklanmayan<br>- Blok tipi çatlaklar<br>- Boyuna çatlaklar<br>- Enine çatlaklar                           |                               | X<br>X<br>X                  | X                                                    | X<br>X                                      | X<br>X                                             |
| Yamalar<br>- Yüzeysel yamalar<br>- Derin yamalar                                                                                    |                               | X<br>X                       |                                                      |                                             | X<br>X                                             |
| Problemli<br>temel/alttemel                                                                                                         |                               |                              |                                                      |                                             | X                                                  |
| Seyahat<br>konforu/pürüzlülük<br>- Genel olarak pürüzlü<br>- Çukur                                                                  | X<br>X                        | X<br>X                       | X<br>X                                               |                                             | X                                                  |

### 3.4. Geri Dönüşüm Uygulamaları Sonucunda Elde Edilecek Avantajlar

Bozulmuş asfalt kaplamaların kazılarak bitümlü sıcak karışımlarda yeniden kullanılması ile genel olarak aşağıdaki faydalar sağlanabilmektedir.

- Yapım maliyetlerinin azaltılması: Geri dönüşüm ile yeniden yapım maliyetlerinin azaltılması sağlanmaktadır.
- Geri dönüşüm, geleneksel yapım teknikleriyle karşılaştırıldığında büyük miktarda enerji tasarrufu sağlayabilir.
- Agreg ve bitüm kaynaklarının korunumu: Yeniden yapım için gerekli doğal kaynakların korunumu sağlanmaktadır.
- Var olan kaplama geometrisinin korunması: Mevcut kaplama tabakasının üzerine yapılabilecek yeni kaplama tabakaları yüksekliğin artması sonucu şehir içi yollarda yeniden bordür ve kaldırım yapımı gibi ilave işlere neden olabilir.
- Çevrenin korunumu: Bazı geri dönüşüm yöntemleri çevreye daha az emisyon salınmasını sağlamaktadır.
- Karayolu kullanıcılarının gecikmelerinin azaltılması: Bazı geri dönüşüm yöntemleri ile karayolları daha kısa sürede kullanıcıların hizmetine açılmaktadır.
- Mevcut kaplamanın üzerine yeni kaplama yapılması halinde yansıma çatlaklarının önlenememesi, kot yükselmesi vb. sorunlar giderilebilir.
- Karışım özelliklerini iyileştirir.
- Mevcut kaplama yapısı üzerine kalın bir tabaka eklenmeksizin geri dönüştürülerek daha mukavim bir tabaka elde edilir.

## **4. MATERYAL VE YÖNTEM**

### **4.1. Malzeme ve Cihazlar**

Bu bölümde, deney numunelerinin hazırlanabilmesi için kullanılan mineral agregası, mineral filler, asfalt çimentosu, geri kazanılmış asfalt betonu malzemesi ve deneyler sırasında kullanılan cihazlar ile ilgili bilgiler verilmiştir.

#### **4.1.1. Asfalt betonu aşınma tabakasında kullanılan agregası**

Asfalt betonu genel anlamı ile aşınma tabakasını, binder tabakasını veya bunların her ikisini birden kapsar. Binder ve aşınma tabakaları; agregası kırmatas çakıl veya bunların karışımından ibaret olacaktır.

Karışım içindeki kırma taş temiz sağlam sert ve dayanıklı danelerden ibaret olacak, bütün malzemede kil toprakları, bitkisel maddeler ve diğer zararlı maddeler serbest veya agregası tanelerini sarmış halde bulunmayacaktır. Aşınma tabakası için Karayolları şartnamesinde belirlenmiş olan gradasyon limitleri Çizelge 4.1' de verildiği gibidir.

Çalışmada kullanılan agregalar Isparta belediyesi asfalt şantiyesinden elde edilmiştir. Karışımlar için nominal maksimum agregası boyutu 9.5 mm ve Karayolu Teknik Şartnamesi aşınma tabakası standartları kullanılmıştır. Aşınma direnci "agregası aşınma kaybı için (Los Angeles) standart test yöntemi" su emme için "agregası su emme standart test yöntemleri, özgül ağırlık" nın belirlenmesi için testler karışımda kullanılan agregası malzemesi üzerine yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013)

| Elek No | Elek Boyu |       | Tip1     |
|---------|-----------|-------|----------|
|         | İnch      | mm    |          |
| 1       | (3/4")    | 19    | 100      |
| 2       | (1/2")    | 12.5  | 88 – 100 |
| 3       | (3/8")    | 9.5   | 72 – 90  |
| 4       | (No:4)    | 4.75  | 42 – 52  |
| 5       | (No:10)   | 2.00  | 25 – 35  |
| 6       | (No:40)   | 0.425 | 10 – 20  |
| 7       | (No:80)   | 0.180 | 7 – 14   |
| 8       | (No:200)  | 0.075 | 3 – 8    |

#### 4.1.1.1. Aşınma tabakası için kaba agreganın özellikleri

Kaba agregası; kırmataş, kırma çakıl veya bunların karışımından oluşacaktır. Kaba agregası; agregası karışımının 4.75 mm (No:4) lik elek üzerinde kalan kısmından meydana gelmektedir. Kaba agregasının uyması gereken şartname değerleri aşınma tabakası için Çizelge 4.2' de verildiği gibidir.

Çizelge 4.2. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013).

| Deney                                                                                                                                                                          | Şartname Limitleri <sup>c</sup> |                       | Deney Standardı                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                | Binder                          | Aşınma                |                                           |
| Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp                                                                                                                                      | ≤ 30<br>(LA30)                  | ≤ 27<br>(LA27)        | TSEN 1097-2 <sup>a</sup><br>(AASHTO T 96) |
| Aşınma Direnci (Micro-Deval)b, % Kayıp                                                                                                                                         | ≤ 25<br>(MDE 25)                | ≤ 20<br>(MDE 20)      | TS EN 1097-1                              |
| Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO <sub>4</sub> ile kayıp), %                                                                                                          | 18<br>(MS18)                    | 16<br>(MS16)          | TS EN 1367-2                              |
| Kırılmışlık, ağırlıkça %<br>(Tüm yüzeyi kırılmış – tüm yüzeyi yuvarlak)                                                                                                        | ≥ 95 - ≤ 0<br>(C95/0)           | ≥ 95 - ≤ 0<br>(C95/0) | TS EN 933-5                               |
| Yassılık İndeksi, %                                                                                                                                                            | ≤ 30                            | ≤ 25                  | BS 812                                    |
|                                                                                                                                                                                | ≤ 25<br>(FI25)                  | ≤ 20<br>(FI20)        | TS EN 933-3 <sup>a</sup>                  |
| Cilalanma Değeri, %                                                                                                                                                            | ≥ 35<br>(PSV35)                 | ≥ 50<br>(PSV50)       | TS EN 1097-8                              |
| Su Emme, %                                                                                                                                                                     | ≤ 2,5<br>(WA242,5)              | ≤ 2,0<br>(WA242,0)    | TS EN 1097-6                              |
| Soyulma Mukavemeti, % Bitümle Kaplı Yüzey<br>(24 saat 60 °C suda bekletmeden sonra)                                                                                            | ≥ 60                            | ≥ 60                  | TS EN 12697-11<br>(Kısım 403 EK-A)        |
| Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, %                                                                                                                                       | ≤ 0,3                           | ≤ 0,3                 | ASTM C 142<br>AASHTO T 112                |
| <sup>a</sup> Referans metot.<br><sup>b</sup> Gerek görüldüğünde yapılacaktır.<br><sup>c</sup> Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043 'deki sınıfını gösterir. |                                 |                       |                                           |

#### 4.1.1.2. Aşınma tabakası için ince agreganın özellikleri

Kırılmış taş, çakıl veya kum ile bunların karışımından oluşacaktır. İnce agrega agrega karışımının 4.75 mm (No:4) lik elekten geçip 0.075 mm (No:200) elek üzerinde kalan kısmı olup temiz, sağlam ve dayanıklı olacaktır. Aşınma tabakası için istenen ince agreganın özellikleri Çizelge 4.3' de belirtildiği gibidir.

Çizelge 4.3. İnce agreganın özellikleri (Karayolları teknik şartnamesi, 2013)

| Deney                                                                                                                                              |                                                        | Şartname Limitleri               |                                 | Deney Standardı         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
|                                                                                                                                                    |                                                        | Binder                           | Aşınma                          |                         |
| Plastisite İndeksi %                                                                                                                               |                                                        | NP                               | NP                              | TS 1900-1               |
| Organik Madde, (% 3 NaOH ile)                                                                                                                      |                                                        | Negatif                          | Negatif                         | TS EN 1744-1 Madde 15.1 |
| Su Emme, %                                                                                                                                         |                                                        | ≤ 2,5<br>(WA242,5)               | ≤ 2,0<br>(WA242,0)              | TS EN 1097-6            |
| Metilen Mavisi, g/kg                                                                                                                               | İnce agreganın 0/2 mm kısmına                          | ≤ 1,5 (MB1,5)<br>≤ 3,0 (MB3,0) * | ≤ 1,5 (MB1,5)<br>≤ 3,0 (MB3,0)* | TS EN 933-9             |
|                                                                                                                                                    | Öğütülmüş magmatik TS EN 933-9 agreganın 0/2mm kısmına | ≤ 3,0 (MB3,0)*                   | ≤ 3,0 (MB3,0)*                  |                         |
| * Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanamaması durumunda bu şart aranacaktır. |                                                        |                                  |                                 |                         |

#### 4.1.2. Asfalt betonu aşınma tabakasında kullanılan mineral filler

Çalışmada mineral filler olarak taştuzu (kireçtaşı tozu) kullanılmıştır. Deney numunelerinin hazırlanmasında, mineral agrega olarak da kullanılan Isparta Gümüşgün taş ocağına ait malzeme, 200 nolu elekten elenerek mineral filler olarak kullanılmıştır.

Mineral filler, genel anlamı ile 0.425 mm (No:40) elekten geçip, ağırlıkça en az % 70 'i 0.075 mm (No:200) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır. Aşınma tabakaları için, mineral fillerin gradasyon limitleri Çizelge 4.4' de belirtildiği gibi olmalıdır.

Mineral filler; taş tozu, mermer tozu, sönmüş kireç veya benzeri maddelerden oluşacak; kil, toprak, organik ve zararlı madde içermeyecektir.

Çizelge 4.4. Mineral Fillerin Gradasyon Limitleri (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013).

| Elek Boyu | Elek No  | Ağırlıkça % Geçen |
|-----------|----------|-------------------|
| 0.425 mm  | (No:40)  | 100               |
| 0.075 mm  | (No:200) | 70-100            |

Çalışmada, şartname değerlerinde istenen niteliğe uygun agrega kullanılmıştır.

#### 4.1.3. Asfalt çimentosu

Çalışmada TS 1081 EN 12591 standardına göre Karayolları Genel Müdürlüğünün yol ağındaki bitümlü sıcak kaplamalarda en çok kullanılan 50/70 sınıfı bitümü kullanılmıştır. Ayrıca Marshall dizaynında kullandığımız bitüm Isparta Belediyesinden temin edilmiştir.

#### 4.1.4. Geri kazanılmış asfalt betonu malzemesi (RAP)

Bozulmuş bitümlü sıcak karışım tabakalarının kazınıp ilave yeni agrega ve bitüm ve gerekiyorsa yeniden kullanım katkıları ile uygun oranlarda karıştırılarak yeniden sıcak karışım tabakalarında kullanımını kapsar.

Kazınmış asfalt kaplamanın yeniden kullanımı ile hazırlanan sıcak karışımlar yüzey tabakası yapımında kullanılmayacaktır.

Yeni yapılacak bitümlü sıcak karışım imalatında ağırlık olarak % 25'den fazla kazınmış asfalt kaplama kullanılmayacaktır.

Ancak, kazınmış asfalt kaplamanın yeni yapılacak bitümlü sıcak karışımında kullanım oranı kullanılacak plent tipi ve gençleştirici katkılara bağlı olarak ağırlıkça daha yüksek oranda olabilecektir. Bu durumda, kazınmış malzemenin kullanılacağı bitümlü sıcak karışım tabakasının istenilen özelliklerine uygun işlemlerin yapılmasını açıklayan teknik raporun hazırlanarak İdare onayına sunulması gereklidir (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013).

Bu çalışmada kullandığımız geri kazanılmış asfalt betonu malzemeler Isparta Belediyesinden temin edilmiştir.

#### **4.1.5. Cihazlar**

Deney numunelerinin hazırlanabilmesi ve ilgili deneylerin yapılabilmesi için Süleyman Demirel Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne ait Ulaştırma laboratuvarlarında bulunan Marshall deney aleti, Marshall sıkıştırıcısı, İndirekt Çekme cihazı, Marshall numune kalıpları, su banyosu, etüv, penetrasyon deney aleti, penetrasyon numune kapları, hassas terazi, Elek cihazı, Yumuşama noktası cihazı, Ekstraksiyon deney cihazı, hidrometre deney aleti, Los Angeles deney aleti kullanılmıştır.

#### **4.2. Yöntem**

Bu bölümde, deney numunelerini oluşturan malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi ve deney numunelerinin test edilmesi için kullanılan deney metotları hakkında bilgiler verilmiştir. Optimum Bitüm Yüzdesi belirlemek için Marshall dizaynı, geri kazanılmış asfalt betonu malzemesinin aşınma tabakasında kullanılabilirliğini belirlemek için Marshall deneyi ve indirekt çekme deneyi, yapılmıştır.

##### **4.2.1. Kazınmış asfalt kaplama malzemesinin gradasyonu ve bitümlü bağlayıcı miktarı tayini**

###### **4.2.1.1. Ekstraksiyon deneyi**

Bitümlü karışımların içindeki bitüm oranının saptanması amacıyla yapılmıştır. Karışımların bitüm yüzdesi, karışımın fiziksel karakteristiklerini belirlemek ve kaplamanın uzun ömürlü olması için önemlidir. Fazla bitüm stabilite problemlerine neden olurken, az bitüm de karışımın dayanıklılığını düşürmektedir.

**DeneyinYapılışı:** Çalışmada kullanılan kazınmış asfalt kaplama malzemeler Isparta belediyesinden elde edilmiştir. Beş numune alınmıştır Aynı zamanda Geri kazanılmış asfalt betonu malzemesinden numune alma, ekstraksiyon Deneyi için örnekleme aşamaları Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, sonra numune etüvde yaklaşık 60 dakika bekletilmiştir. Amaç numunenin yumuşatılarak daha kolay bitümden ayrılmasını sağlamaktır. 60 dakika bekletildikten sonra Ekstraksiyon cihazına yerleştirilmiştir. Yaklaşık 1,25-1,5 lt trikolor etilen kullanarak bitüm agregadan ayrılmıştır. Trikolor etilen bitümün rengi sarıya dönene kadar ekstraksiyon cihazına konulmaya devam edilmiştir. Agrega etüvde her yarım saatte bir ağırlığı alınarak bekletilmiştir. Şekil 4.2.’de görüldüğü gibi ekstraksiyon deneyi uygulanma aşamaları ASTM D 2172 standardı uygulanır.

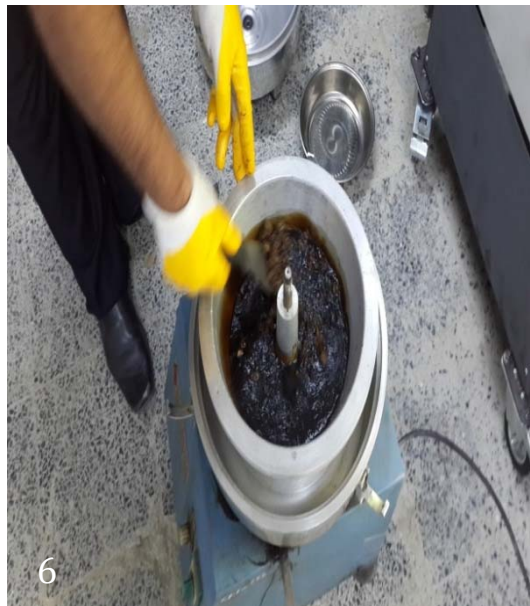
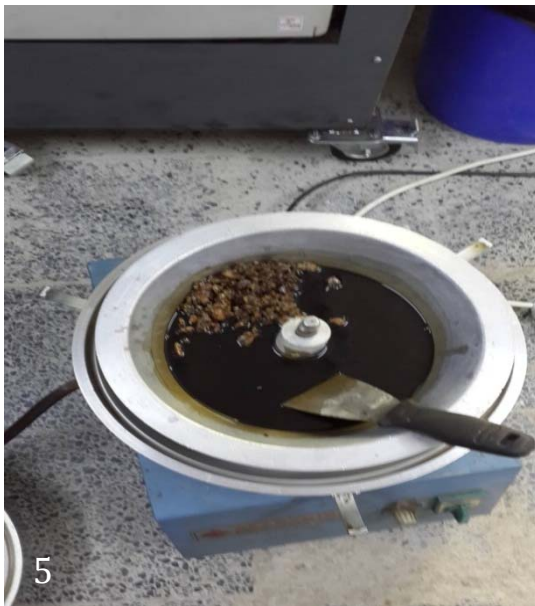


(a)

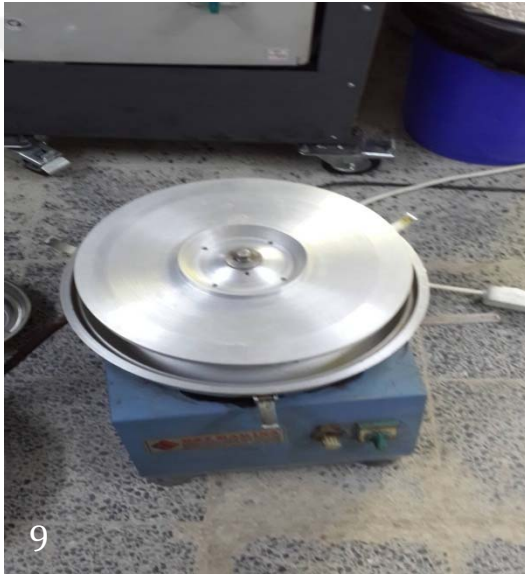


(b)

Şekil 4.1. Ekstraksiyon deneyi için örnekleme aşamaları



Şekil 4.2. Ekstraksiyon deneyi uygulanma aşamaları



Şekil 4.2. Ekstraksiyon deneyi uygulanma aşamaları (devam)

#### 4.2.2. Kazınmış asfalt kaplama malzemesinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi:

##### 4.2.2.1. Birim hacim ağırlık deneyi:

Kazınmış üstyapının kapladığı hacmin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.

Şöyle özetlenebilir:( ASTM D3203-94 & D3549-93a)

1. Kuru asfalt tartılır (yaklaşık olarak her numune için 500 gr).
2. Boş cam kap tartılır.
3. Daha sonra boş cam kap kısmı işaret çizgisine kadar su ile doldurulur ve tartılır. Su yükseklik ölçülür (h1).
4. Su içine numune atılır, sonra tekrar su yükseklik ölçülür (h2).
5. Hacim hesaplanmak için cam kap (silindir) çap yarı ölçülür (r) .
6. Deney oda sıcaklığında yapılmıştır(25°C) . Birim hacim ağırlık değerleri eşitlik 4.1. ,4.2.' de verildiği gibi hesaplanır.

$$V = \pi r^2 (h2 - h1) \quad (4.1)$$

$$\gamma = \omega / v \quad (4.2)$$

Burada;

V: Numune Hacimi (cm<sup>3</sup>).

r: cam kap (silindir) çap yarı (cm).

h1: Numunesiz cam kabının su yükseklik ölçülür (cm).

h2: Su içine numune atıldıktan sonra cam kabının su yükseklik ölçülür(cm).

$\gamma$ : Birim hacim ağırlık değeri (kN/cm<sup>3</sup>).

$\omega$ : Kuru numune ağırlığı (kg).

#### 4.2.3. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler

Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan hem normal mineral agreganın hem de RAP malzemesinin ekstraksiyon kalıntısı mineral agregaların fiziksel özelliklerinin tayininde iri ve ince agregalar için özgül ağırlık, mineral filler özgül ağırlık, elek analizi, su emme için aşağıdaki deneyler yapılmıştır.

##### 4.2.3.1. Elek Analizi

Elek analizi, ince ve kaba agreganın gradasyonunu tayin etmek için yapılır. Agreganın içermiş olduğu her sınıf malzemenin birbirini dolduracak nitelikte olması gerekmektedir. Bu nedenle gradasyonun belirlenmesi için elek analizi deneyi önemli bir deneydir. Ayrıca elek analizi deneyi ile incelik modülü ve iri agreganın maksimum dane boyutu tespit edilir. Elek analizi deneyinde, araziden alınan tüvenan agrega havada kurutulduktan sonra, agrega numunesi önce 4 nolu elekten elenerek iri ve ince agrega olarak ikiye ayrılır. 4 nolu elek üzerinde kalan çakıl boyutundaki malzeme 1 1/2, 1, 3/4, 3/8 nolu kare delikli elekten geçirilir (4 nolu elek üzerinde kalan malzeme buna dahildir). Eleme işlemi bitikten sonra elekler tel fırçayla temizlenerek her elek üzerinde kalan malzeme tartılır. 4 nolu elek altında kalan ince agrega (kum) 10, 40, 80, 200 nolu eleklerden elenerek artanı tepsi içinde kalmak suretiyle her elek üzerinde kalan malzeme tartılır ve % kalan miktarları hesaplanır. % kalan miktar Eşitlik 4.3'den hesaplanır. Çalışmalarda Amerikan Elek sistemi kullanılmıştır.

$$\% \text{ Kalan} = (\text{Elekte Kalan} / \text{Toplam Numune Miktarı}) \times 100 \quad (4.3)$$



Şekil 4.3. Elek cihazı

#### 4.2.3.2. İri agregâ için özgül ağırlık deneyi

Özgül ağırlık değeri, portland çimentosu betonu, asfalt betonu ve diğeri karışımlarda kullanılan iri agreganın özelliklerini belirlemede genellikle kullanılır (ASTM C 128- 88, 1989).

Agreganın özgül ağırlık değeri; betonda yer alabilecek malzeme miktarlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu deneyde numunenin karışım gradasyonunu temsil etmesine dikkat edilmelidir. Deney şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

1. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, kullanılan agregâ örneğinden yaklaşık 1 kg alınır.
2. Hazırlanan numune yıkanarak su içinde 24 saat bekletilir.
3. Su içerisinde çıkarılan numune emici özelliğe sahip olan bir bez üzerine yayılarak agregâ daneleri teker teker kurulanır. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, yüzey kuru-suya doymuş hale gelmiş agregâ numunesi tartılır.
4. Tel sepete konulan agregâ numunesinin  $25 \pm 1$  °C sıcaklıktaki suda tartımı yapılır.
5. Numune tel sepet içinden bir tepsiye boşaltılarak  $110 \pm 5$  °C'lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulur. Etüvden çıkartılan numune 1 ile 3 saat arasında oda sıcaklığında soğutularak tartılır.
6. Özgül ağırlık değeri ve su absorpsiyon yüzdesi Eşitlik 4.4, 4.5, ve 4.6'da verildiği gibi hesaplanır.



Şekil 4.4. Özgöl ağırlık deneyi için RAP malzemesinin ekstraksiyon kalıntısı iri agregalar tartılır.



Şekil 4.5. Özgöl ağırlık deneyi için normal iri agregalar tartılır.



Şekil 4.6. Bez üzerine yayılarak agrega daneleri kurulanır.

$$\text{Hacim Özgöl Ağırlık (kN/cm}^3\text{)} = A / B - C \quad (4.4)$$

$$\text{Zahiri Özgöl Ağırlık (kN/cm}^3\text{)} = A / A - C \quad (4.5)$$

$$\text{Su emme yüzdesi (\%)} = B - A / A \quad (4.6)$$

Burada;

A =Kuru numune ağırlığı (gr).

B =Yüzey Kuru-Suya Doygun numune ağırlığı (gr).

C = Yüzey Kuru-Suya Doygun numunenin sudaki ağırlığı (gr).

#### 4.2.3.3. İnce agreganın özgül ağırlık deneyi

(TS 3526, 1980) metodu kullanılarak ince agreganın su absorpsiyonu ve özgül ağırlığı şu şekilde belirlenir:

1. Karışım gradasyonunu temsil edecek şekilde en az 500 gr agreganın kullanılır.
2. 200 nolu elekten yıkanan malzeme bir tepsi içine alınarak üzeri su ile kaplanır ve 24 saat bekletilir. Daha sonra ince malzeme kaybına neden olmayacak şekilde suyu süzülür ve absortif olmayan düzgün bir yüzey üzerine serilir.
3. Numuneyi yüzey kuru-suya doymuş hale getirebilmek için sıcak hava akımı karşısında devamlı karıştırılarak kurutma işlemine tabi tutulur. Bu işleme malzeme serbest dökülebilir hale gelinceye kadar devam edilir. Bu anı tespit etmek için koni metodu uygulanır.
4. Yüzey kuru suya doymuş hale gelen yaklaşık 500 gr numune piknometre içine konarak tartılır ( $C_i$ ).
5. Üzerine numune yüzeyini kaplayacak seviyede su ilave edilir. Hava kabarcıklarının çıkması için piknometre her iki yönde 15-20 dakika çalkalanır.
6. Daha sonra piknometrenin boş kısmı işaret çizgisine kadar su ile doldurulur.  $25 \pm 1$  °C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Su ve malzeme sıcaklığı 25 °C'ye ulaştığında piknometre su banyosundan çıkarılıp kurulanır ve tartılır ( $D_i$ ).
7. İnce agreganın piknometreden bir tepsiye boşaltılır ve  $110 \pm 5$  °C'lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulur. Etüvden çıkarılan numune soğutulup tartılır ( $E_i$ ) (Şekil 4.7).
8. İnce agreganın özgül ağırlık ve su absorpsiyon yüzdesi Eşitlik 4.7, 4.8, ve 4.9' da verildiği gibi hesaplanır.

$$\text{Hacim Özgül Ağırlık (kN/cm}^3\text{)} = E_i / (B_i + C_i - A_i - D_i) \quad (4.7)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık (kN/cm}^3\text{)} = E_i / (B_i + E_i - D_i) \quad (4.8)$$

$$\text{Absorbsyon Yüzdesi \%} = (C_i - A_i - E_i / E_i) \times 100$$

(4.9)

Burada;

A<sub>i</sub>: Piknometre ağırlığı (gr).

B<sub>i</sub>: 25 °C deki su dolu piknometre ağırlığı (gr).

C<sub>i</sub>: Piknometre ve doygun-yüzey kuru numune ağırlığı (gr).

D<sub>i</sub>: 25 °C deki numune ve su dolu piknometre ağırlığı (gr).

E<sub>i</sub>: Kuru numune ağırlığı (gr).



Şekil 4.7. İnce agregâ için özgül ağırlık deneyi uygulanır.

#### 4.2.3.4. Mineral filler zahiri özgül ağırlığının tayini

Filler malzemelerinin zahiri özgül ağırlıkları (TS 3526, 1980) metodu kullanılarak şu şekilde belirlenir:

1. 110±5'lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulan filler malzemesi 4 – 5 saat kuruttuktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulur.
2. Özgül ağırlık şişesi ve kapağı temiz ve kuru olmalıdır. Bir huni yardımı ile filler şişeye boşaltılır. Şişenin üçte biri dolacak şekilde piknometrenin içerisine konularak tartılır ve kayıt edilir ( $C_f$ ).
3. Piknometre yarısına kadar su doldurulur. Ağzı kapatılmış şişe birkaç kez tezgaha vurulduktan sonra en az 5 dakika kadar yaklaşık 50 mbar vakum sağlayan vakum trombu ile hava çıkarılır. Hiçbir hava kabarcığı kalmayıncaya kadar bu işlem tekrarlanır.
4. Daha sonra piknometre tamamen su ile doldurularak 25±1 °C'lik su banyosunda en az 60 dak. bekletilir. Su banyosundan çıkarılır ve kurularak tartılır ( $D_f$ ).
5. Fillerin zahiri özgül ağırlığı eşitlik 4.8' de verildiği gibi hesaplanır ( $G_f$ ).

$$\text{Fillerin Zahiri Özgül Ağırlığı} = \frac{C_f - A_f}{(B_f - A_f) - (D_f - C_f)} \quad (4.10)$$

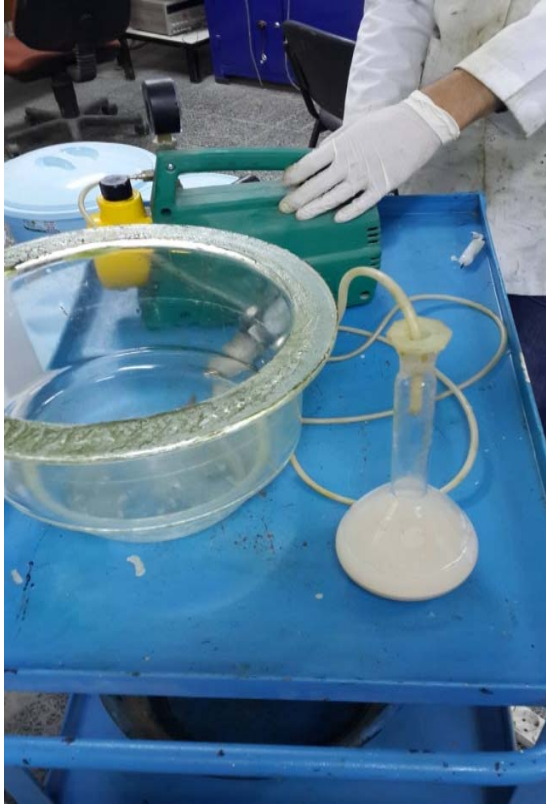
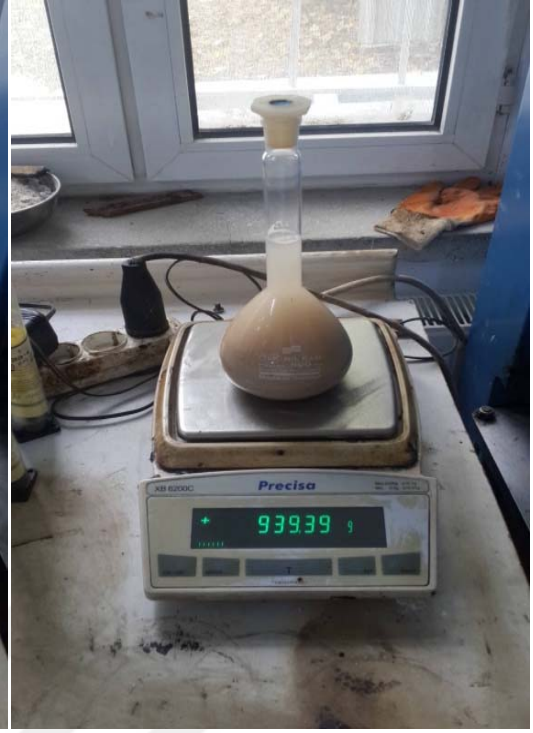
Burada;

A<sub>f</sub>: Piknometre ağırlığı (gr).

B<sub>f</sub>: 25 °C deki su dolu piknometre ağırlığı (gr).

C<sub>f</sub>: Piknometre ve doygun-yüzey kuru numune ağırlığı (gr).

D<sub>f</sub>: 25 °C deki numune ve su dolu piknometre ağırlığı (gr).



Şekil 4.8. Mineral filler için Zahiri özgül ağırlık deneyi uygulanır.

#### **4.2.4. Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak agregada gradasyonunun belirlenmesi**

Agrega, kırılmış çakıl veya taş, kum ve mineral fillerden oluşur. Yolun yapıldığı yörede bulunan malzemeden faydalanmak uygun bir çözümdür. Kaplama tabakası kendine gelen yükleri sabit bir deformasyona uğramadan temel tabakasına geçirecek kadar kararlı olmalıdır. Bu da agreganın granülometrik bileşimine, danelerin şekline ve direncine bağlıdır (Umar ve Ağar, 1991).

Kaplamanın stabilitesine ve yoğunluğuna etki eden önemli özelliklerden birisi de agregada gradasyonudur. Her katman için ayrı bir gradasyon geliştirilmiştir. Dolayısıyla, değişik boyutlardaki agregada danelerinin hangi oranlarda bulunması gerektiği şartnamelerde alt ve üst limitlerle belirtilmiştir. Her katman için ayrı bir gradasyon geliştirilmiştir. Agregalar konkasörlerde 0-5, 5-15, 15-20 olmak üzere değişik boyutlandırılır. Bu agregada gruplarından her birinde ayrı ayrı elek analizi yapılmak ve belirli oranlarda karıştırılmak suretiyle nihai gradasyon elde edilir.

Ülkemizde karayolu kırmataşlarında 1", 3/4", 1/2", 3/8", No:4, No:10, No:40, No:80, No:200 standart elekleri kullanılır. Elekler büyükten küçüğe doğru sıralanır ve malzeme en üst elekten başlanarak elenir. Elek üstü kalan malzemeler yığılımlı olarak 0,1 gr hassasiyetinde bir terazi ile tartılır. Daha sonra yüzde geçenler, toplam yüzde kalanlar ve belli boyutlardaki yüzdelere toplam ağırlığın % 0,1'i yakınlığında hesaplanır.

Agregada granülometrisine ve diğer özelliklerine ait şartname sınırları Çizelge 4.5'de verilmiştir. Çizelge 4.6'da seçilen agregada granülometrisi değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.5. Aşınma Tabakası için Gradasyon Limitleri (KTŞ, 2013)

| <b>Elek Boyu<br/>Mm(in,No)</b> | <b>Tip - 1</b> | <b>Tip - 2</b> | <b>Tip - 3<br/>Çok İnce Aşınma</b> |
|--------------------------------|----------------|----------------|------------------------------------|
| 19 (3/4")                      | 100            |                |                                    |
| 12,5 (1/2")                    | 88 - 100       | 100            | 100                                |
| 9,5 (3/8")                     | 72 - 90        | 80 - 100       | 90 - 100                           |
| 6,0 (1/4")                     | -              | -              | 25 - 33                            |
| 4,75 (No.4)                    | 42 - 52        | 55 - 72        | 23 - 31                            |
| 2,00 (No.10)                   | 25 - 35        | 36 - 53        | 20 - 27                            |
| 0,425 (No.40)                  | 10 - 20        | 16 - 28        | 12 - 18                            |
| 0,180 (No.80)                  | 7 - 14         | 8 - 16         |                                    |
| 0,075 (No.200)                 | 3 - 8          | 4 - 8          | 7 - 11                             |

Çizelge 4.6. Seçilen Granülometri

| <b>Elek Boyu<br/>Mm(in,No)</b> | <b>Tip - 1</b> | <b>Geçen%</b> | <b>Üstte kalan<br/>agrega</b> |
|--------------------------------|----------------|---------------|-------------------------------|
| 19 (3/4")                      | 100            | 100           | 0                             |
| 12,5 (1/2")                    | 88 - 100       | 90            | 120                           |
| 9,5 (3/8")                     | 72 - 90        | 80            | 120                           |
| 4,75 (No.4)                    | 42 - 52        | 48            | 384                           |
| 2,00 (No.10)                   | 25 - 35        | 33            | 180                           |
| 0,425 (No.40)                  | 10 - 20        | 13            | 240                           |
| 0,180 (No.80)                  | 7 - 14         | 10            | 36                            |
| 0,075 (No.200)                 | 3 - 8          | 6             | 48                            |
|                                |                |               | 72                            |

#### 4.2.5. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler

Mekanik özelliklerin belirlenmesi için Los Angeles, Aşınmaya Karşı Direncin Tayini (Mikro deval) yapılmıştır.

##### 4.2.5.1. Los Angeles (Aşınma) deneyi

Los Angeles (aşınma) deneyi, iri agregaların parçalanma direncinin tayini için uygulanan deney yöntemini kapsar (ASTM C 131 (1992)). Los Angeles (aşınma) deneyinde kullanılan cihaz iki tarafı kapalı, eksenini etrafında dönebilen, içi boş çelik silindirden oluşmaktadır.

Bu deneyde, 14 mm deney eleğinden geçen ve 10 mm deney eleğinde kalan agregalara uygulanır. Deney kısmının kütlesi (5000±5) gr'dır. Deney için 31 devir/dk ile 33 devir/dk arasında dönme yapabilen, 11 adet çelik bilye ile aşındırma yapabilen bir tambur kullanılır.

Los Angeles Deneyi ASTM C 131 (1992)'e göre şu şekilde yapılmıştır:

1. Tamburun içinin temizliği kontrol edildikten sonra, önce bilyeler daha sonra agrega numunesi tambur içine yerleştirilir ve tamburun kapağı sıkıca kapatılır.
2. 500 devir dönme işlemi tamamlandıktan sonra, tamburun açıklık kısmı tepsinin tam ortasına getirilerek agregalar tepsiye dökülür.
3. Tambur temizlenir, ince tanelerin raf etrafında kalmamasına dikkat edilir.
4. Bilyeler tepside alindikten sonra 1.6 mm'lik elek kullanılarak ıslak eleme yapılır.
5. 1,6 mm elekte kalan kısım 110±5 °C'deki etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulur.
6. Şekil 4.9' da tipik bir Los Angeles Aşınma test cihazı ve bir numunenin deneyden önce ve deneyden sonraki halleri görülmektedir.

Los Angeles aşınma yüzdesi katsayısı (LA) aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$LA = (\text{ilk ağırlık} - \text{son ağırlık}) / (\text{ilk ağırlık}) \quad (4.11)$$

Deney her bir numune için üçer adet yapılmış ve numuneler 500 devirlik aşınma işlemine tabi tutulmuştur. ASTM C 131-89'a göre yol kaplamalarında kullanılacak malzemelerde aşınma %30 değerinden küçük olmalıdır.



Şekil 4.9. Los Angeles aşınma deneyinde kullanılan cihaz

#### **4.2.6. Asfalt çimentosunun fiziksel özelliklerinin belirlenmesi**

##### **4.2.6.1. Bitümlü bağlayıcılar Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426)**

Nispeten rijit (katı) bitümlerdir. Penetrasyonlarına göre derecelendirilirler (standart bir iğnenin, standart yükleme, zaman ve sıcaklık altında batma derinliği). Bitüm ne kadar yumuşaksa, iğnenin bitüme batma derinliği yüksek ve penetrasyon sayısı büyüktür.

Soğuk havaların hakim olduğu yerlerde yüksek penetrasyonlu, sıcak havaların hüküm sürdüğü alanlarda düşük penetrasyonlu AC lerin kullanılması tavsiye olunur. Zira esneklik ve plastik deformasyona karşı dayanım için bu bir önkoşuldur.

Yarı katı veya akıcı olmayan bağlayıcıların kıvamlarının viskozimetre ile ölçülmesi mümkün değildir. Bu durumda penetrasyon deneyi yapılır. Penetrasyon ölçmek için kullanılan alete penetrometre denir ve Şekil 4.10'da verilmiştir.

#### **Numune hazırlama:**

Penetrasyon deneyi uygulanacak bitümlü bağlayıcı aşırı ısınmalara sebebiyet vermeden kolay dökülebilecek kıvama gelinceye kadar ısıtıldıktan sonra, penetrasyon kabına dökülür. Penetrasyon kabının ağzı toz girmeyecek şekilde kapatılarak 1-1,5 saat süreyle oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Soğuduktan sonra taşıma kabı ile birlikte su banyosuna batırılır. Burada da 1-1,5 saat bekletildikten sonra numune deney için hazır hale gelmiştir.

#### **Deneyin yapılışı:**

Deneyde öncelikle penetrasyon cihazı (penetrometre) düzgün bir yere yerleştirilir ve gösterge sıfıra getirilir. İçi bitüm numunesi dolu olan penetrasyon kabı, içi su dolu olan taşıma kabı ile birlikte penetrasyon cihazının tablasına yerleştirilir. Numune istenen sıcaklıkta olmalıdır (genellikle 25 °C'de). İstenilen ağırlıkla yüklenilen iğne (genellikle 100 gr) numunenin yüzeyine değecek şekilde ayarlanır. İğne belirli bir zaman aralığında (5 saniye) serbest bırakılır. Zaman bitiminde penetrasyon değeri göstergeden okunur. Kabın kenarından ve birbirlerinden 1'er cm uzaklıkta en az 3 okuma yapılır. Bu okumalar en kısa zamanda arka arkaya yapılır. İğne, her seferinde uygun bir çözücü ile (Karbon tetra klorür, tri klor etilen, benzin) ısıtılmış bezle silinir. Sonra kuru bezle temizlenir. Deneyin sonunda kabul edilecek penetrasyon, bu üç okuma değeri arasındaki farkın şartnamelerde belirtilen en yüksek ve en düşük değerler arasındaki fark sınırını aşmaması durumunda bu üç değerlerin ortalamasıdır. Eğer ölçüm sonucunda bulunan değerlerin, en yükseği ile en düşüğü arasındaki fark şartnamelerde belirtilen sınırı aşıyorsa deney ikinci bir numune ile tekrarlanır (Şekil 4.10 ve 4.11).

Viskozite ve penetrasyon derecesi benzer sayılarla verilir. Örneğin 80-100 penetrasyonlu asfalt, 50-100 viskoziteli asfalt gibi. Fakat bunlar farklı şeylerdir. Bunların benzer şekilde ifade edilmesi yanılgılara yol açar. Penetrasyon derecesi yükseldikçe daha yumuşak bağlayıcı söz konusudur. Buna karşılık viskozitede durum terstir. Normal yol işlerinde kullanılan asfaltların penetrasyonu 30 ile 300 arasında değişir. Penetrasyonu aynı olan iki asfalttan yumuşama noktası yüksek olan sıcağa daha dayanıklıdır (Umar ve Ağar, 1991).



Şekil 4.10. Normal bitüm için Penetrasyon deney aleti



Şekil 4.11. Geri Kazanılmış Bitüm için Penetrasyon deney aleti

#### **4.2.6.2. Bitümlü bağlayıcılar-yumuşama noktası tayini-halka ve bilye metodu (TS 120 EN 1427- ASTM D36)**

Bitümün sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılıklarını ve hangi sıcaklıkta akmaya başladığını ölçmek için uygulanan deneydir. En kısa ve basit yöntem yüzük ve bilye yöntemi ile yumuşama noktasının bulunmasıdır.

##### **Numune hazırlama:**

16 mm (5/8 inç) çapında ve 6,4 mm (1/4 inç) kalınlığında pirinç bir yüzük vazelinle yağlandıktan sonra, deneye tabi tutulacak bitümlü malzeme eritilerek pirinç yüzüğe doldurulur. Bir saat süre ile soğutulduktan sonra taşan kısımları ısıtılmış bir spatula ile kesilip alınır. Numune ve 9,5 mm (3/8 inç) çapındaki çelik top, 5 °C'ye kadar soğutulmuş saf su ile tabandan yaklaşık 9 cm yüksekliğe kadar doldurulmuş olan beherin içine yerleştirilir. Numuneyi taşıyan halkanın alt yüzü beherin tabanından 2,5 cm (1 inç) yukarıda olacak şekilde yerleştirilir. Termometre civa haznesinin ucu halkanın alt yüzü ile aynı düzeyde ve halkadan 0,5 cm uzaklıkta bulunacak şekilde behere sarkıtılır. Beherdeki suyun sıcaklığı 15 dakika süreyle 5 °C'de sabit tutulur. Daha sonra bilye uygun bir masa yardımı ile halka içindeki numunenin tam ortasına yerleştirilir.

##### **Deneyin yapılışı:**

Beherdeki suyun sıcaklığı ilk 3 dakikadan sonra dakikada 5°C yükselecek şekilde ısıtılır. Sıcaklığın artması ile yumuşayan malzeme, beherin tabanına değdiği anda termometreden okunan sıcaklık, yumuşama noktası değeri olarak kaydedilir. Yumuşama noktası tayini iki numune üzerinde yapılır ve sonuç bu iki değerlerin ortalaması olarak alınır.



Şekil 4.12. Yumuşama noktası cihazı



Şekil 4.13. Bilye ve halkalar

#### 4.2.6.3. Özgöl ağırlık deneyi

Bir bağlayıcının özgöl ağırlığı bunun belli bir hacminin ağırlığının aynı hacimde su ağırlığına oranıdır. Bir bağlayıcının özgöl ağırlığı başlıca iki bakımdan önemlidir. Birincisi; çok defa ağırlıkla hacim arasındaki bağıntının bilinmesi faydalıdır. Bitümlü kaplamalara ait şartnamelerde oranlar ağırlıkça yüzde cinsinden belirtilir. Buna karşılık bağlayıcılar çok defa hacimce ölçülür. Sıcak karışımlarda ise bağlayıcının genleşme katsayısının belirlenmesi faydalıdır. Böylece herhangi bir sıcaklıktaki özgöl ağırlık hesaplanabilir. İkincisi; hidrokarbonlu bağlayıcının cinsinin bilinmesi açısından özgöl ağırlık yararlıdır (Umar ve Ağar, 1991).

##### Deneyin yapılışı:

Özgöl ağırlık tayini için piknometre metodu kullanılır. Bu metotta, önce boş piknometre kabı kuru olarak tartılır, daha sonra su ile doldurulur ve tekrar tartılır. Piknometre kabı boşaltılır, kurutulur, içine uygun miktarda bağlayıcı genellikle 2/3 yüksekliğine kadar ya küçük parçalar halinde veya eritilmiş malzeme akıtılarak konur. Eğer ısıtılmış malzeme akıtılacak ise malzeme içinde hava kabarcıkları kalmamasına dikkat edilmesi gereklidir. Piknometre içinde kalan boşluk su ile doldurulur ve tartılır. Deneyde kullanılacak su saf su olmalıdır. Deney, genellikle 25 °C’de yapılır. Farklı sıcaklıklarda yapılacaksa 25°C’ye çevirmek için çeşitli abaklardan yararlanılır (Umar ve Ağar, 1991).

$$\text{Özgöl ağırlık} \left( \frac{\text{kN}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (4.12)$$

Burada;

A= Piknometre ağırlığı (gr)

B= Su ile dolu piknometre ağırlığı (gr)

C=Piknometre ve asfalt ağırlığı (gr)

D=Piknometre, asfalt ve su ağırlığı (gr)

#### 4.2.7. Marshall Stabilite deney numunelerinin hazırlanması

Aynı agrega karışımına farklı oranlarda bağlayıcı karıştırarak maksimum stabiliteyi veren optimum bağlayıcı miktarının saptanmasında, bitümlü karışımdaki boşluk oranları ve kuru agree karışımdaki boşlukların bağlayıcı ile doldurulma oranların hesaplamaya yarayan bir serbest basınç deneyidir.

Deney numuneleri; granülometrik şartlara uygun yaklaşık 1200g agrega hazırlanır. Filler malzemesi ve miktarı önceden belirlenmiştir. Ayrıca %3.74, 4.24 , 4.74 , 5.24 , 5.74 , 6.24 , 6.74 oranlarında yedi adet bitüm hazırlanır. Hazırlanan agrega karışımı etüvde 165 °C ye kadar bitüm ise 145 °C ye kadar ısıtılır. Isıtılmış malzeme etüvden alınarak yukarıda belirlenen oranlarda hazırlanan bitümle karıştırılarak yedi tür bitümlü karışım hazırlanır. Farklı bağlayıcı yüzdesine sahip karışımlardan üçer adet numune hazırlanır. Hazırlanan farklı bağlayıcı yüzdesine sahip karışımlardan ısıtılmış kalıplara doldurulur. Her numunenin üzerine ilgili numuneye ait etiket yerleştirilir. Karışım 101,6 mm (4 inç.) çapında ve 63,5 mm (2,5 inç.) yüksekliğinde numune kalıbına yerleştirilerek 457,2 mm (18 inç.) den düşen 4536g (10 lb.) ağırlığındaki özel bir tokmakla sıkıştırılır. Numunenin her iki yüzüne trafik durumuna göre orta trafik için 50, yüksek trafik için 75 darbe vurulur. Tokmaklanması biten numune kalıptan çıkarılarak soğumaya bırakılır.

Bu çalışmada yüksek trafik dikkate alınarak numune, her iki yüzüne 75 tokmak vurularak sıkıştırılmıştır. Marshall deney numuneleri bir gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra boyları ölçülerek havada, suda ve doymuş yüzey kuru ağırlıkları tartılır ve deneye alınır.



Şekil 4.14. Marshall briket numuneleri hazırlanmasının aşamaları



Şekil 4.15. Marshall deneyi uygulanma aşamaları

#### **4.2.7.1. Marshall stabilite deneyi (ASTM D-1559)**

Deneyin numuneleri 60 °C sıcaklığa getirmek için 30-40 dakika su banyosunda veya 2 saat etüvde bekletilir. Klavuz çubuğu ve deney kafaları temizlenip, üst kafa çubukta rahatça kayacak şekilde klavuz çubuğu yağlanır. Briket banyodan veya etüvden çıkarılarak kırma kafasının alt kısmına yerleştirilir. Numunenin su banyosunda çıkartılıp maksimum yük saptamasına kadar geçen süre 30 sn den fazla olmamalıdır. Kafanın üst parçası da briketin üstüne yerleştirilerek, her şeyin deney pozisyonunda olması sağlanır. Flowmetre yerleştirilerek sıfıra ayarlanır ve yük uygulanırken flowmetre kolu kırma kafasının üst parçası karşısında tutulur.

Maksimum yüke erişinceye kadar 50,8 mm lik (2 inç.) bir yükleme yapılır. Numunenin kırılma anında maksimum yük değeri ve akma değeri ölçülür. Numunenin yüksekliği 63,5 mm den farklı ise Marshall stabilitesi düzeltme katsayısı ile çarpılarak yüke düzeltme faktörü uygulanır (Önal ve Karaca, 1984).

#### **4.2.8. Kaplama karışım hesapları için gerekli bağıntılar**

Kaplama karışım hesapları için, agrega efektif özgül ağırlığının tayini, kaplama karışımının efektif bitüm yüzdesinin hesaplanması, bitüm absorpsiyon yüzdesinin hesaplanması, kaplama karışımının efektif bitüm yüzdesinin hesaplanması, farklı bitüm miktarlarında hazırlanan karışımın maksimum özgül ağırlığının tayini hesapları yapılmıştır.

##### **4.2.8.1. Agrega efektif özgül ağırlığının tayini**

Agrega tarafından absorbe edilen asfalt hacmi, absorbe edilen suyun hacminden daha azdır. Bunun sonucu olarak agreganın efektif özgül ağırlık değeri, hacim ve zahiri özgül ağırlık değerleri arasında olmalıdır.

Efektif özgül ağırlık bu limitlerin dışına düştüğünde değerin yanlış olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda ASTM D 2041'e göre yapılan teorik özgül ağırlık deneyi yeniden gözden geçirilmelidir.

Bu deneyin yapılamadığı durumlarda, hacim özgül ağırlık ve zahiri özgül ağırlık değerlerinin ortalaması alınarak bulunan efektif özgül ağırlık değeri hesaplarda kullanılabilir. Agreganın efektif özgül ağırlığı eşitlik 4.13'de verildiği gibi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G_{ef} = \frac{100}{\left(\frac{100+W_a}{D_t}\right) - \left(\frac{W_a}{G_b}\right)} \quad (4.13)$$

Burada;

$G_{ef}$  = Agreganın Efektif Özgül Ağırlığı (asfalt absorbe eden boşluklar hariç tüm boşlukları içerir. )

$W_a$  = Agreganın Yüzdesi Olarak Bitüm

$D_t$  = Gevşek Kaplama Karışımının Boşluksuz Maksimum Özgül Ağırlığı

$G_b$  = Bitüm Özgül Ağırlığı

#### 4.2.8.2. Kaplama karışımının efektif bitüm yüzdesinin hesaplanması

Efektif bitüm yüzdesi, toplam bitüm miktarının agreganın tarafından absorbe edilen bitüm miktarı kadar eksiktir. Bu, toplam bitüm miktarının agreganın dışını kaplayan kısımdır ve kaplama karışımının performansına etki edecek bitüm miktarıdır. Eşitlik 4.14'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$P_{bc} = W_a - P_{ba} \quad (4.14)$$

Burada;

$P_{bc}$ : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak efektif bitüm miktarı.

$W_a$ : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm.

$P_{ba}$ : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak absorbe edilen bitüm.

#### 4.2.8.3. Farklı bitüm miktarlarında hazırlanan karışımın maksimum özgül ağırlığının tayini (Dt)

Her bir bitüm yüzdesindeki hava boşluğu hesaplanırken, farklı bitüm yüzdelerindeki maksimum özgül ağırlığa ihtiyaç duyulur. ASTM D 2041'e göre deney yapılırken en sağlıklı sonucu alabilmek için optimuma yakın bitüm yüzdesinde hazırlanmalı ve Dt için iki veya üç deney yapılmaya çalışılmalıdır.

Bitüm miktarının değişmesi bitüm absorpsiyonunu önemli ölçüde değiştirmez, bu sebeple maksimum özgül ağırlık (DT), Eşitlik 4.15 kullanılarak bitüm yüzdesi ile her bitüm yüzdesi için ayrı ayrı hesaplanabilir.

$$\text{Max. Teorik Özgül Ağırlık } D_t = \frac{100 + W_a}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (4.15)$$

Burada;

DT = Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (kN/cm<sup>3</sup>)

Wa =Agrega ağırlığının yüzdesi olarak bitüm ağırlığı (gr)

Gef =Agreganın efektif özgül ağırlığı (kN/cm<sup>3</sup>)

Gb =Bitüm özgül ağırlığı (kN/cm<sup>3</sup>) ( Uzun, 2011)

#### 4.2.8.4. Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki boşluk hacmi yüzdesi

Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), efektif bitüm miktarını ve hava boşluğunu çeren, sıkıştırılmış kaplama karışımın agregada daneleri arasındaki boşluk olarak tanımlanır ve toplam hacmin yüzdesi olarak hesaplanır. VMA, agreganın hacim özgül ağırlığı esas alınarak hesaplanır ve sıkıştırılmış kaplama karışım hacminin yüzdesi olarak ifade edilir.

Böylece VMA, sıkıştırılmış kaplama karışımın hacminden agreganın hacim özgül ağırlığı ile hesaplanan hacmin çıkarılmasıyla hesaplanır. Eğer karışım kompozisyonu agregada ağırlığının yüzdesi olarak bulunmuşsa, Eşitlik 4.16'da verildiği gibi hesaplanır.

$$VMA = 100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + W_a} 100 \quad (4.16)$$

Burada;

VMA = Agregalar arası boşluk yüzdesi (%)

$D_p$  = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı ( $\text{kN/cm}^3$ )

$G_{sb}$  = Agreganın hacim özgül ağırlığı ( $\text{kN/cm}^3$ )

$W_a$  = Agreganın ağırlığının yüzdesi olarak bitüm ağırlığı (gr) (Uzun, 2011)

#### 4.2.8.5. Sıkıştırılmış Kaplama Karışımındaki Hava Boşluğu ( $V_h$ ) ve Asfalt Dolu Boşluk Oranı ( $V_f$ ) Yüzdesinin Hesaplanması

Sıkıştırılmış kaplama karışımı içindeki hava boşluğu, kaplanmış agreganın daneleri arasındaki küçük hava boşluklarından ibarettir. Eşitlik 3.17'den yararlanarak hesaplanır (Önal ve Kahramangil, 1993).

$$V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100 \quad (4.17)$$

Burada;

$V_h$  = Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımındaki agreganın boşluğu (%)

$D_T$  = Kaplama karışımının maksimum özgül ağırlığı ( $\text{kN/cm}^3$ )

$D_p$  = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı ( $\text{kN/cm}^3$ )

Asfaltla dolu boşluk ( $V_f$ ), sıkıştırılmış kaplama karışımının bitümle dolan boşluklarını içerir, Eşitlik 4.18'den yararlanarak bu değer hesaplanır.

$$V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100 \quad (4.18)$$

Burada;

V<sub>f</sub>: Asfaltla dolu boşluk.

VMA: Agregalar arası boşluk yüzdesi.

V<sub>h</sub>: Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu

Bu deneyde; aşınma tabakası için gradasyonlar hazırlanmış, 21 adet biriket yapılmış ve de bu hesaplamalar kullanılmıştır.

#### **4.2.9. Optimum bitüm yüzdesi belirenmesi**

Optimum bitüm yüzdesinin tayin edilebilmesi için çeşitli bitüm yüzdelerinde hazırlanmış olan numunelere ait Marshall Stabilite, birim ağırlık, akma, bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesi ve boşluk oranını grafiklerinin çizilmesi gerekir. Asfalt çimentosunun Marshall Stabilite değerini maksimum yaptığı değer, maksimum birim ağırlığı veren asfalt çimentosu oranı, şartnameye uygun olarak bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesini %75 olarak sağlayan bağlayıcı oranı %4 boşluk oranını (şartnamede belirtilen %3-5 arasındaki sınır içinde kalan) sağlayan asfalt oranı grafiklerden bulunur. Bulunan dört asfalt oranının ortalaması optimum asfalt çimentosu oranını verecektir (Umar ve Ağar, 1991).

Bu şekilde belirlenen bitüm oranına göre üretilen sıcak asfalt karışımı, şartnamelerde belirtilen özellikleri taşıyacaktır. Daha sonra kontrol için optimum bitüm miktarlarının şartnamelerde belirtilen akma ve % VMA'ları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir.

#### 4.2.10. Geri kazanılmış asfalt betonu malzemesi kullanılan Marshall Stabilite deney numunelerinin hazırlanması

Dizaynlarda ve uygulamada kazılan aşınma malzemesinin kullanılması kararlaştırılmıştır.

Çalışmada öncelikle Marshall metodu kullanılarak optimum asfalt miktarı belirlenmiştir. Karışım için gerekli olan optimum bağlayıcı miktarı belirlendikten sonra bu asfalt miktarı sabit kalmak şartı ile karışımın içerisine %5, 10, 15, 20, 25,30, 35, 40, 45 ve %50 oranlarında geri kazanılmış asfalt betonu malzemesi (RAP) ilave edilmiş ve tekrar Marshall deneyine tabii tutulmuştur. Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen sıcak karışımları için aşınma tabakası tasarım değerleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.7. Marshall metodu ile aşınma tabakası tasarım kriterleri (Karayolları Teknik Şartnamesi 2013)

| ÖZELLİKLER                     | AŞINMA TABAKASI |       |
|--------------------------------|-----------------|-------|
|                                | MİN.            | MAKS. |
| Darbe Sayısı                   | 75              | -     |
| Marshall Stabilite (kg)        | 900             | -     |
| Boşluk (%)                     | 3               | 5     |
| Asfaltla Dolu Boşluk (%)       | 65              | 75    |
| Akma (mm)                      | 2               | 4     |
| Filler/Bitüm Oranı             | -               | 1,5   |
| Asfalt Çimentosu               | 4               | 7     |
| Agregalar Arası Boşluk (VMA,%) | 14              | 16    |

#### Deneyin yapılışı:

Deney numuneleri; granülometrik şartlara uygun yaklaşık 1200g (normal agreg + RAP malzemesi içinde agregaları) agreg hazırlanır. Filler malzemesi ve miktarı önceden belirlenmiştir. Ayrıca %5.10 optimum bitüm bağlayıcı miktarı sabit kalmak şartı ile karışımın içerisine %5, 10, 15, 20, 25,30, 35, 40, 45 ve %50 oranlarında geri kazanılmış asfalt betonu malzemesi (RAP) ilave edilmiştir. Optimum bitüm oranında 30 adet Marshall numunesi hazırlanmıştır. Her RAP yüzdesi için üçer adet numune alınmıştır.

Eklenecek agregalar ve kullanılacak bitüm her yüzdesi için, ekler 1'de gibi yararlanarak bu değerler hesaplanır. Hazırlanan agrega karışımı etüvde 165 °C ye kadar ve geri kazanılmış asfalt betonu malzemesi (RAP) 150 °C ye kadar bitüm ise 145 °C ye kadar ısıtılır. Isıtılmış malzeme etüvden alınarak yukarıda belirlenen oranda hazırlanan bitümle karıştırılır. Farklı RAP yüzdesine sahip karışımlardan üçer adet numune hazırlanır. Hazırlanan farklı RAP yüzdesine sahip karışımlardan ısıtılmış kalıplara doldurulur. Her numunenin üzerine ilgili numuneye ait etiket yerleştirilir. Karışım 101,6 mm (4 inç.) çapında ve 63,5 mm (2,5 inç.) yüksekliğinde numune kalıbına yerleştirilerek 457,2 mm (18 inç.) den düşen 4536g (10 lb.) ağırlığındaki özel bir tokmakla sıkıştırılır. Numunenin her iki yüzüne trafik durumuna göre orta trafik için 50, yüksek trafik için 75 darbe vurulur. Tokmaklanması biten numune kalıptan çıkarılarak soğumaya bırakılır. Bu çalışmada yüksek trafik dikkate alınarak numune, her iki yüzüne 75 tokmak vurularak sıkıştırılmıştır. Marshall deney numuneleri bir gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra boyları ölçülerek havada, suda ve doymun yüzey kuru ağırlıkları tartılır ve deneye alınır.



Şekil 4.16. RAP malzemesi kullanılan Marshall briket numuneleri hazırlanmasının aşamaları



Şekil 4.16. RAP malzemesi kullanılan Marshall briket numuneleri hazırlanmasının hazırlanmasının aşamaları (devam)



Şekil 4.17. RAP malzemesi kullanılan Marshall deneyi uygulanır.

#### **4.2.10.1. Geri Kazanılmış Asfalt Betonu Malzemesi Kullanılan Numunelerin Marshall Stabilite Deneyi (ASTM D-1559)**

##### **Deneyin yapılışı:**

Numuneleri 60 °C sıcaklığa getirmek için 30-40 dakika su banyosunda bekletilir. Numunenin su banyosunda çıkartılıp maksimum yük saptamasına kadar geçen süre 30 sn den fazla olmamalıdır. Klavuz çubuğu ve deney kafaları temizlenip, üst kafa çubukta rahatça kayacak şekilde klavuz çubuğu yağlanır. Briket banyodan veya etüvden çıkarılarak kırma kafasının alt kısmına yerleştirilir. Kafanın üst parçası da briketin üstüne yerleştirilerek, her şeyin deney pozisyonunda olması sağlanır. Flow metre yerleştirilerek sıfıra ayarlanır ve yük uygulanırken flowmetre kolu kırma kafasının üst parçası karşısında tutulur. Maksimum yüke erişinceye kadar 50,8 mm lik (2 inç.) bir yükleme yapılır. Numunenin kırılma anında maksimum yük değeri ve akma değeri ölçülür. Numunenin yüksekliği 63,5 mm den farklı ise Marshall Stabilitesi düzeltme katsayısı ile çarpılarak yüke düzeltme faktörü uygulanır (Önal ve Karaca, 1984).

#### **4.2.11. İndirekt Çekme Mukavemeti**

İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS) Testi, Marshall cihazı kullanılarak dakikada 50.8 mm'lik yük artış hızında yapılır. ITS testi, çap düzlemi doğrultusunda düşey olarak yüklenen ve paralel hareket eden yüklerin sıkıştırması ile silindirik deney numunenin kırılmasını kapsar. ITS deneyi, asfalt betonunun gerilme özelliklerini belirlemek için uygulanır. Bu şekilde yol yüzeyinin kırılma özellikleriyle daha iyi bir bağlantı kurulabilir. ITS değerini hesaplamak için kırılmış olan deney numunesine uygulanan maksimum yüke göre aşağıdaki denklem kullanılır (Ahmedzade vd., 2008).

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi \times t \times d} \quad (4.21)$$

Burada;

ITS: İndirekt Çekme Mukavemeti

P<sub>max</sub>: Uygulanmış maksimum yük (kN),

t: Numunenin kalınlığı (mm),

d: Numunenin çapı (mm).

Yapılan Marshall sonuçlarına göre; % RAP'sizden %50 RAP'e oranla daha iyi sonuç verdiği görüldüğü için RAP'sizden %25 RAP'e koşullandırılmış indirekt çekme yapılmıştır.

Nem duyarlılığı testi için öncelikle elde edilen karışımdan her RAP yüzdesi için dört adet (24 numune) Marshall numunesi hazırlanır.

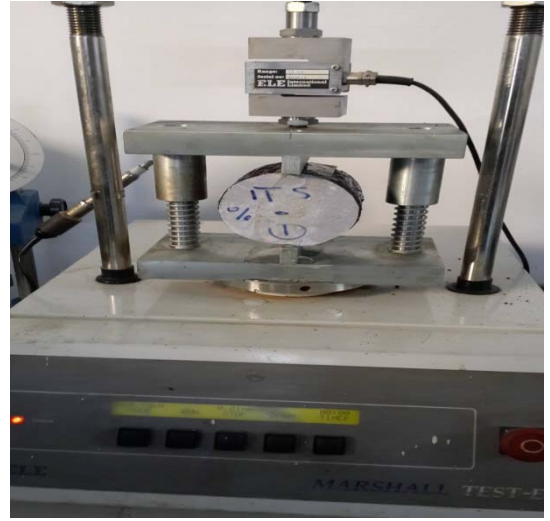
İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS) testi prosedürler için aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Karışım hazırlanır ve sıkıştırılır. Sıkıştırılmış briketleri 24 saat boyunca kalıp içerisinde ortam sıcaklığında bekletilir.
2. 24 saat dolduktan sonra numuneleri kalıptan çıkarılır. Çıkarılan numunelerin üç noktadan yükseklik ve çap ölçümlerini alınır.
3. Yükseklik ve çap ölçümleri alınan numuneleri 40°C sıcaklığa ayarlanmış etüvde 72 saat kurutulur.
4. 72 saat sonunda numuneleri etüvden çıkarılır ve kuru ağırlıklarını tartılır. Daha sonra bütün numuneleri 25°C sıcaklığa gelinceye kadar soğumaya bırakılır.
5. Numuneler 25°C sıcaklığa ulaştıklarında şartlandırma için hazırladıklarını 25°C sıcaklığa ayarlanmış su banyosunda yerleştirilir ve 24 saat banyoda bekletilir. Şartlandırılmadan kırılacakları da 25°C sıcaklığa ulaştıklarında bir streç film ile hava almayacak şekilde sarılır ve ortam sıcaklığında şartlandırılmış numuneler kırılincaya kadar bekletilir.

6. Şartlandırılacak numuneler 24 saat su banyosunda bekledikten sonra üstünde en az 2.5 cm su olacak şekilde su doluyup bir kaba koyulur ve doygunluk oranı %55 – 80 arasına gelinceye kadar vakumlanır.
  7. Vakum işlemi tamamlandıktan sonra sudaki ağırlığını ve yüzey kuru suya doygun ağırlıklarını tartılır.
  8. Sudaki ağırlık ve yüzey kuru suya doygun ağırlıkları tartılmış numuneleri streç film ile hava almayacak şekilde sarılır ve 16 saatliğine -18°C sıcaklığa ayarlanmış kabinde dondurulur.
  9. 16 saat sonunda numuneleri donma kabininden çıkarılır ve 24 saat boyunca beklemek üzere 60°C sıcaklığa ayarlanmış su banyosunda çözündürülür.
  10. 24 saat sonunda numuneleri 60°C sıcaklıktaki su banyosundan çıkarılır ve 25°C sıcaklıktaki suya 2 saatliğine yerleştirilir.
  11. 2 saat sonunda numuneleri sudan çıkarılır ve şartlandırılmadan kırılacak numuneler ile birlikte 25°C ortam sıcaklığında kırılır.
- Elde edilen her bir yeni karışımdan dörter adet daha Ø 100mm Marshall numuneleri hazırlanır ve  $ITS_{ISLAK}$  ve  $ITS_{KURU}$  değerleri elde edilir. hazırlanan numunelerin Çekme Mukavemeti Oranı (Tensile Strength Ratio – TSR) değerleri aşağıdaki formülle hesaplanır. Şartnamede çekme dayanımı oranı % 80' dir.

$$TSR = \frac{ITS_{ISLAK}}{ITS_{KURU}} \times 100 \quad (4.22)$$

Burada  $ITS_{ISLAK}$  ve  $ITS_{KURU}$  değerleri ıslak ve kuru ITS değerlerinin ortalaması olup TSR değeri ortalama ıslak ve kuru değerlerinin oranının % olarak hesaplanmasıdır (ASTM D6931, 2012).



Şekil 4.18. İndirekt çekme deneyi uygulanma aşamaları

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölüm çalışmanın konusu olan geri kazanılmış asfalt betonu malzemesinin aşınma tabakasında kullanılabilirliğini belirleyebilmek için yapılan deneylerin sonuçlarını içermektedir.

### 5.1. Ekstraksiyon Deneylerinden Elde Edilen Araştırma Bulguları

Dizaynlarda ve uygulamada kazılan aşınma malzemesinin kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu deneyler yapılırken her deney için beşer adet numune kullanılmış çıkan sonuçların ortalamaları verilmiştir. Kazılmış aşınma malzemesi üzerinde yapılan ekstraksiyon deneyi sonuçları Çizelge 5.1’de, deney sonucu elde edilen agregaya ait elek analizleri ise Çizelge 5.2 ve Şekil 1’de verilmektedir.

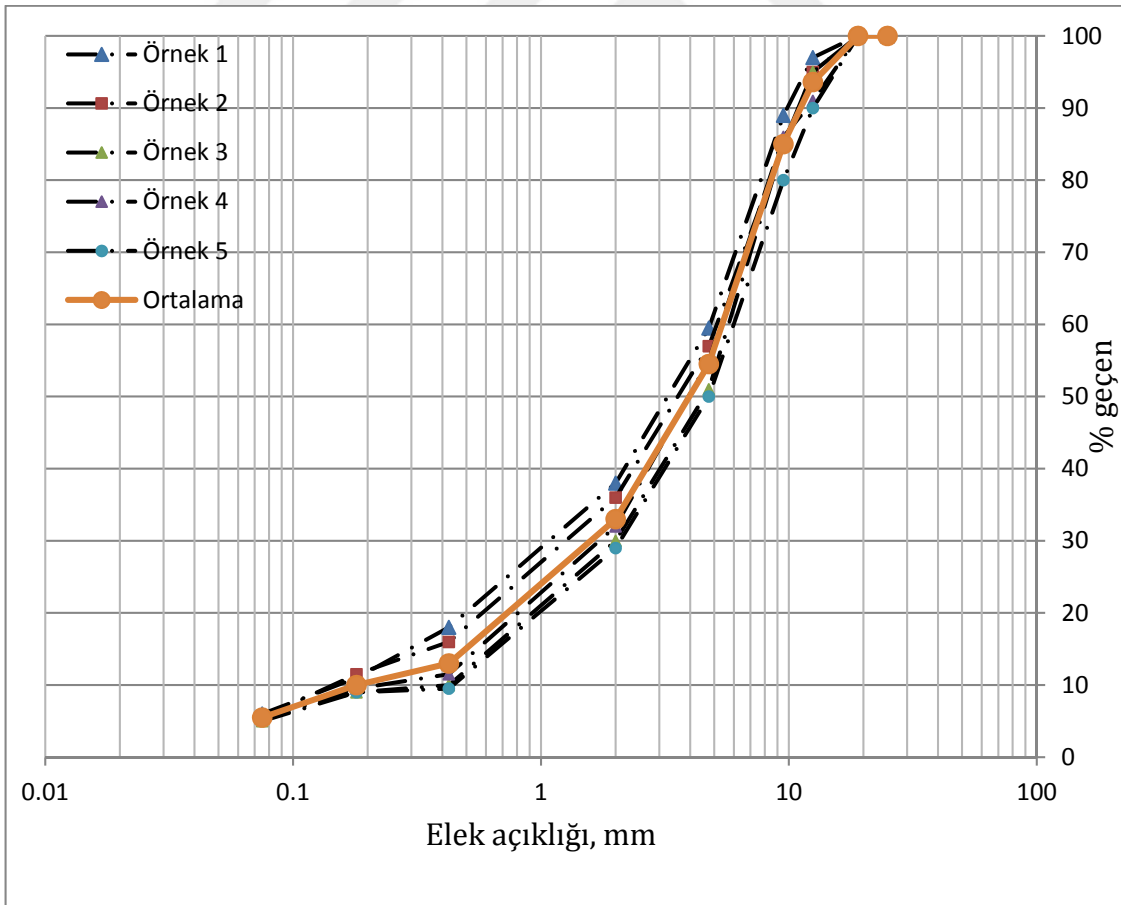
Bunlara ek olarak kazınmış malzemedan geri kazanım yoluyla elde edilen bitüm, karışıma katılacak normal bitüm ve eski ve yeni bitüm karışımları üzerinde deneyler yapılarak sonuçları Çizelge 5.3’de verilmiştir. Ayrıca EN 13108-1:2006 standardına göre hesaplamalar yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.1. Ekstraksiyon sonrası bitüm oranı

| Örnek No.                      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | Ortalama    |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|-------------|
| % Bitüm Oranı Agreganın (%'si) | 4,73 | 4,98 | 4,92 | 5,07 | 4,40 | <b>4,82</b> |

Çizelge 5.2. Ekstraksiyon sonrası elek analizleri

| ELEK AÇIKLIĞI |       | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | Ortalama    | Aşınma Tabakası için Gradasyon Limitleri |
|---------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|------------------------------------------|
| inch          | mm    | % geçen | % geçen | % geçen | % geçen | % geçen | % geçen     |                                          |
| 1             | 25    | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | <b>100</b>  |                                          |
| $\frac{3}{4}$ | 19    | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | <b>100</b>  | 100                                      |
| $\frac{1}{2}$ | 12,5  | 95      | 94      | 95      | 92      | 92      | <b>93,6</b> | 88 – 100                                 |
| $\frac{3}{8}$ | 9,5   | 87      | 86      | 85      | 84      | 83      | <b>85</b>   | 72 – 90                                  |
| N0.4          | 4,75  | 55      | 55      | 54      | 54,5    | 54      | <b>54,5</b> | 42 – 52                                  |
| NO.10         | 2,00  | 35      | 33      | 32      | 32      | 33      | <b>33</b>   | 25 – 35                                  |
| NO.40         | 0,425 | 15      | 13,5    | 12      | 11,5    | 13      | <b>13</b>   | 10 – 20                                  |
| NO.80         | 0,180 | 11      | 11,5    | 9       | 9,5     | 9       | <b>10</b>   | 7 – 14                                   |
| NO.200        | 0,075 | 6       | 5,5     | 5       | 5,4     | 5,6     | <b>5,5</b>  | 3 – 8                                    |



Şekil 5.1. Örneklerin gradasyon eğrisi

## 5.2. Kazınmış Asfalt Kaplama Malzemesinin(RAP) Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deney Bulguları

Kazınmış Asfalt Kaplama Malzemesinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için birim hacim ağırlık deneyi yapılmıştır.

Çizelge 5.3. Kazınmış Asfalt Kaplama Malzemesinin (RAP )Birim Hacim Ağırlık değeri veri çizelgesi

| Kazınmış Asfalt Kaplama Malzemesinin (RAP )Birim Hacim Ağırlık |                                                      |            |            |            |            |            |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                                                |                                                      | 1.<br>Num. | 2.<br>Num. | 3.<br>Num. | 4.<br>Num. | 5.<br>Num. |
| $\omega$                                                       | RAP ağırlığı (gr).                                   | 508,5      | 507        | 501,5      | 505,5      | 509        |
| h1                                                             | Cam kapta su yüksekliği (cm).                        | 8          | 8          | 7,8        | 7,9        | 7,8        |
| h2                                                             | Su içine numune attıktan sonra suyu yüksekliği (cm). | 10,7       | 10,6       | 10,5       | 10,6       | 10,6       |
| $V = \pi r^2 (h2 - h1)$                                        |                                                      | 211,9      | 204,1      | 211,9      | 211,9      | 219,8      |
| $r = 5 \text{ cm}$                                             |                                                      |            |            |            |            |            |
| $\gamma = \omega / v$                                          |                                                      | 2,40       | 2,48       | 2,37       | 2,38       | 2,32       |
| $\gamma$ ortalama                                              | 2,39 gr/ cm <sup>3</sup>                             |            |            |            |            |            |

## 5.3. Mineral Agreganın Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deney Bulguları

Agreganın fiziksel özelliklerinin belirlenmesi elek analizi, özgül ağırlık ve su emme deneyi yapılmıştır.

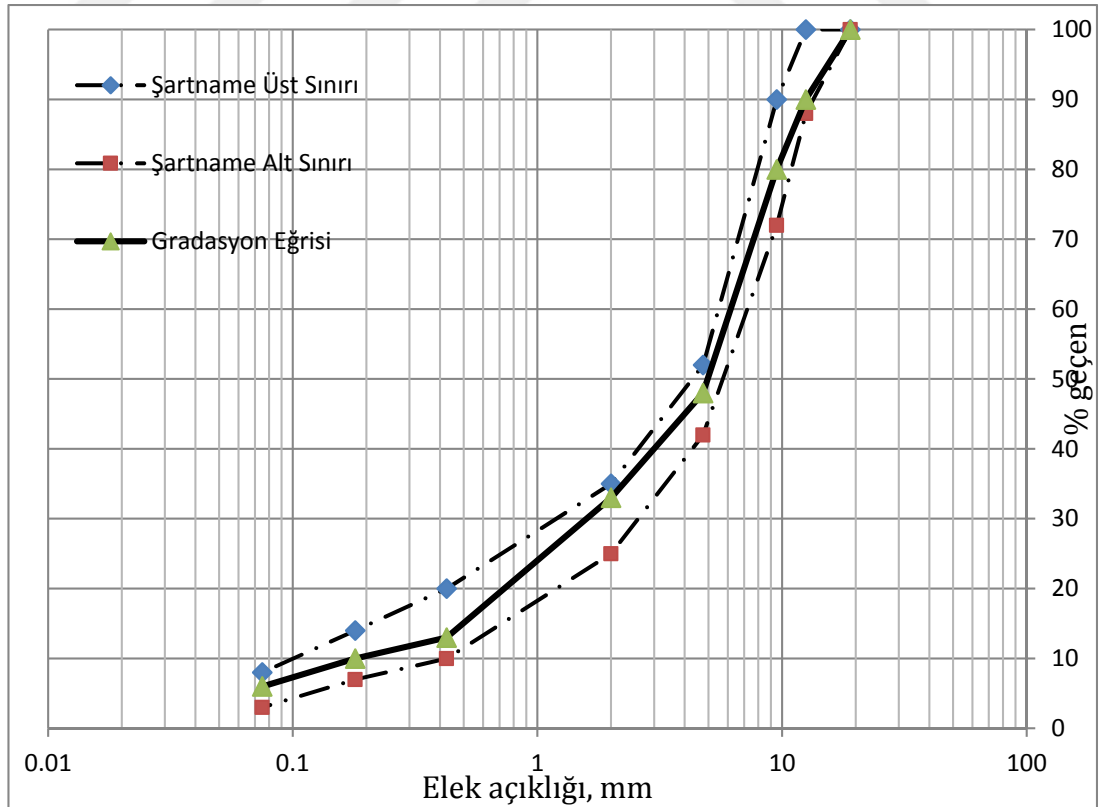
### 5.3.1. Numunelerde kullanılacak agrega gradasyonu

Deneyde kullanılan agreganın elek analizi ASTM C 136-84a, (1992)' ye göre yapılmıştır.

Karayolları Teknik Şartnamesinde verilen gradasyon sınır değerlerini sağlamaktadır. Bu gradasyon; % 52 Kaba agrega, % 42 İnce Agrega, % 6 ‘da filler malzemeden oluşmuştur. Bu değerler Çizelge 5.4’ de sunulmuştur. Aşınma tabakasına ait oluşturduğumuz gradasyon eğrisi Şekil 5.2’ de sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Agrega granülometrisi

| ELEK AÇIKLIĞI |       | Aşınma Tabakası için Gradasyon Limitleri | % Seçilen | Üstte kalan agrega |
|---------------|-------|------------------------------------------|-----------|--------------------|
| inch          | mm    |                                          |           |                    |
| $\frac{3}{4}$ | 19    | 100                                      | 100       | 0                  |
| $\frac{1}{2}$ | 12,5  | 88 – 100                                 | 90        | 120                |
| $\frac{3}{8}$ | 9,5   | 72 – 90                                  | 80        | 120                |
| N0.4          | 4,75  | 42 – 52                                  | 48        | 384                |
| NO.10         | 2,00  | 25 – 35                                  | 33        | 180                |
| NO.40         | 0,425 | 10 – 20                                  | 13        | 240                |
| NO.80         | 0,180 | 7 – 14                                   | 10        | 36                 |
| NO.200        | 0,075 | 3 – 8                                    | 6         | 48                 |
| pan           |       |                                          |           | 72                 |
|               |       |                                          |           | 1200 gr            |



Şekil 5.2. Aşınma tabakası gradasyon eğrisi

### 5.3.2. Özgöl ağırlık ve su emme oranı deneyi

Bu deneyde TS 3526-2 standardına göre iri agreg (çakıl) ve ince agreg (kum) numunesinin özgöl ağırlık ve su emme oranları, mineral fillerin de zahiri özgöl ağırlığı belirlenmiştir. Agregaların su emme yeteneği boşluk hacimlerinin oranı ile ilgili olmaktadır. Boşluklu olan agregalarda su emme oranı fazla olmaktadır. Su emme oranı fazla olan agreganın dona karşı dayanımı da düşük olacaktır. Bundan dolayı, beton karışımlarında ve karayolu yapımında kullanılacak agregalarda su emme oranının düşük olması istenmektedir.

Çizelge 5.5. Çalışmada agreg olarak kullanılan iri ve ince kireçtaşı ve mineral fillerin malzemesinin özellikleri

| Deneyin Adı                           | Standartlar           | Ölçülen Özellik           | Test Sonuçları<br>gr/ cm <sup>3</sup> |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| İri Agreg Özgöl Ağırlık Deneyi        | (ASTM C 127-88, 1992) | Hacim özgöl ağırlık       | 2,64                                  |
|                                       |                       | Suya doymuş özgöl ağırlık | 2,66                                  |
|                                       |                       | Zahiri özgöl ağırlık      | 2,70                                  |
|                                       |                       | Su emme yüzdesi           | 0,602                                 |
| İnce Agreg Özgöl Ağırlık Deneyi       | (ASTM C 128-88, 1992) | Hacim özgöl ağırlık       | 2,39                                  |
|                                       |                       | Suya doymuş özgöl ağırlık | 2,49                                  |
|                                       |                       | Zahiri özgöl ağırlık      | 2,67                                  |
|                                       |                       | Su emme yüzdesi           | 4,4                                   |
| Mineral fillerin Özgöl Ağırlık Deneyi | (ASTM D 854- 88,1992) | Zahiri özgöl ağırlık      | 2,725                                 |

Çizelge 5.6. Çalışmada agrega olarak kullanılan kazanılmış asfaltın malzemesinden ekstraksiyon sonrası elde edilen iri ve ince kireçtaşı malzemesinin özellikleri (RAP).

| Deneyin Adı                           | Standartlar           | Ölçülen Özellik           | Test Sonuçları<br>gr/ cm <sup>3</sup> |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| İri Agrega Özgöl Ağırlık Deneyi       | (ASTM C 127-88, 1992) | Hacim özgöl ağırlık       | <b>2,66</b>                           |
|                                       |                       | Suya doygun özgöl ağırlık | <b>2,67</b>                           |
|                                       |                       | Zahiri özgöl ağırlık      | <b>2,71</b>                           |
|                                       |                       | Su emme yüzdesi           | <b>0,40</b>                           |
| İnce Agrega Özgöl Ağırlık Deneyi      | (ASTM C 128-88, 1992) | Hacim özgöl ağırlık       | <b>2,45</b>                           |
|                                       |                       | Suya doygun özgöl ağırlık | <b>2,50</b>                           |
|                                       |                       | Zahiri özgöl ağırlık      | <b>2,59</b>                           |
|                                       |                       | Su emme yüzdesi           | <b>2,25</b>                           |
| Mineral fillerin Özgöl Ağırlık Deneyi | (ASTM D 854-88, 1992) | Zahiri özgöl ağırlık      | <b>2,723</b>                          |

#### 5.4. Los Angeles (Aşınma) Deneyi Sonuçları

Beton ve karayolu yapımında kullanılan agregalar atmosferik ve mekanik etkilerden dolayı aşınmaya, parçalanmaya, ufalanmaya ve kırılmaya maruz kalmaktadırlar. Bu yüzden agregaların kullanım yerlerine göre belli aralıklardaki sınır değerlerinde aşınmaya karşı dayanıklı olması istenmektedir. Karayolların da istenen şartname sınır değeri % 30'dur. %30'un üzerindeki aşınma oranı kabul edilmemektedir. Normal agregalar ve Ekstraksiyon Kalıntısı agregalar malzemelerinin Los Angeles Deneyi ASTM C 131'e göre aşınma değerleri Çizelge 5.7 ve 5.8'de verilmiştir. Tablolardan da görüldüğü gibi, agregalar şartname değerini sağlamaktadır.

Çizelge 5.7. Normal Agregaların Kireçtaşı Los Angeles Deneyi Sonuç Tablosu

| Deneyin adı        | Ölçülen özellik<br>İlgili | Standartlar         | Aşınma kaybı (%) |
|--------------------|---------------------------|---------------------|------------------|
| Los Angeles deneyi | Aşınma                    | ASTM<br>C 131(1996) | 21,57            |

Çizelge 5.8. Ekstraksiyon Kalıntısının Agregalarının Los Angeles Deneyi Sonuç Tablosu

| Deneyin adı        | Ölçülen özellik<br>İlgili | Standartlar         | Aşınma kaybı (%) |
|--------------------|---------------------------|---------------------|------------------|
| Los Angeles deneyi | Aşınma                    | ASTM<br>C 131(1996) | 23,56            |

### 5.5. Asfalt Çimentosunun Özellikleri

Deneyisel çalışmalarda bağlayıcı olarak Isparta Belediyesi asfalt şantiyesinde kullanılan B 50/70 sınıfındaki asfalt çimentosu kullanılmıştır. Bunlara ek olarak kazınmış malzemeden geri kazanım yoluyla elde edilen bitüm, Karışıma katılacak normal bitüm ve eski ve yeni bitüm karışımları üzerinde deneyler yapılarak sonuçları Çizelge 5.9'da verilmiştir. Ayrıca EN 13108-1:2006 standardına göre hesaplamalar yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tablodan da görüldüğü gibi, sadece geri kazanılmış bitüm kullanılmış olsa, şartname sınırlarını sağlamamaktadır.

Çizelge 5.9. B50/70 asfalt çimentosunun fiziksel özellikleri

| Deneyin Adı                            | Standartlar | Geri<br>Kazanılmış<br>Bitüm | Normal<br>Bitüm<br>B 50/70 | TS 1081 EN<br>12591<br>B 50/70 |
|----------------------------------------|-------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| PENETRASYON<br>(25°C,100g,5sn.)0,1mm   | TS EN 1426  | 33                          | 57                         | 50-70                          |
| YUMUŞAMA NOKTASI, °C<br>(R/B, 25°C) °C | TS EN 1427  | 73.5                        | 50.8                       | 46-54                          |
| ÖZGÜL AĞIRLIK                          | TS 1087     | 0,976                       | 0,979                      | 1 civarında                    |

EN 13108-1:2006 metoduna göre yapılan hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

**a) Karışımındaki bitümün penetrasyonunun hesaplanması:**

$$a \text{ pen1} + b \text{ pen2} = (a + b) \text{ pen.mix.} \quad (5.1)$$

Burada;

pen. Mix. : bitüm karışımının penetrasyonu

pen1: geri kazanılmış bitümün penetrasyonu

pen2: normal bitümün penetrasyonu

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

Çizelge 5.10. Karışımındaki bitümün penetrasyonunun hesaplanması

| PENETRASYON<br>(25oC,100g,5sn.)0,1mm  |               | %10 pen1<br>%90 pen2 | %15 pen1<br>%85 pen2 | %20 pen1<br>%80 pen2 | %25 pen1<br>%75 pen2 | %30 pen1<br>%70 pen2 |
|---------------------------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Standartlar                           | TS EN<br>1426 |                      |                      |                      |                      |                      |
| Geri<br>Kazanılmış<br>Bitüm<br>(pen1) | 33            | 3,3                  | 4,95                 | 6,6                  | 8,25                 | 9,9                  |
| Normal<br>Bitüm<br>B 50/70<br>(pen1)  | 57            | 51,3                 | 48,45                | 45,6                 | 42,75                | 39,9                 |
| TS EN<br>12591<br>B 50/70             | 50-70         | 54,6                 | 53,4                 | 52,2                 | 51                   | 49,8                 |

$$0,25 \times 33 + 0,75 \times 57 = (1) \text{ pen.mix.}$$

$$\text{Pen .mix.} = 51$$

Sonuçlara göre %30'dan az olan geri kazanılmış bitüm şartnamenin sınırlarını sağlamaktadır.

**b) Karışımdaki bitümün yumuşama noktası değerinin hesaplanması:**

$$\text{TR\&B mix.} = a \times \text{TR\&B1} + b \times \text{TR\&B2} \quad (5.2)$$

Burada;

TR&B mix. : Karışımdaki bitümün yumuşama noktası

TR&B1: geri kazanılmış bitümün yumuşama noktası

TR&B2: ilave normal bitümün yumuşama noktası

Çizelge 5.11. Karışımdaki bitümün yumuşama noktası değerinin hesaplanması

| YUMUŞAMA NOKTASI,<br>°C (R/B, 25°C) °C             |               | %10 TR&B1<br>%90 TR&B2 | %15 TR&B1<br>%85 TR&B2 | %20 TR&B1<br>%80 TR&B2 | %25 TR&B1<br>%75 TR&B2 |
|----------------------------------------------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Standartlar</b>                                 | TS EN<br>1427 |                        |                        |                        |                        |
| <b>Geri<br/>Kazanılmış<br/>Bitüm<br/>TR&amp;B1</b> | 73.5          | 7,3                    | 11                     | 14,7                   | 18,4                   |
| <b>Normal<br/>Bitüm<br/>B 50/70<br/>TR&amp;B2</b>  | 50.8          | 45,7                   | 43                     | 40,6                   | 38                     |
| <b>TS EN 12591<br/>B 50/70</b>                     | <b>46-54</b>  | <b>53</b>              | <b>54</b>              | <b>55,3</b>            | <b>56,4</b>            |

Hesaplanan değer;

$$\text{TR\&B mix} = 0,15 \times 73,5 + 0,85 \times 50,8$$

$$\text{TR\&B mix} = 54$$

Sonuçlara göre %10 ve %15 geri kazanılmış bitüm şartnamenin sınırlarını sağlamaktadır.

Bitümlü karışımların sıcak havalarda deformasyona uğraması bitümlü bağlayıcının yumuşama noktasına bağlıdır. 25 °C daki penetrasyonları aynı olan iki bağlayıcıdan yumuşama noktası yüksek olan sıcaklık değişimlerine daha dayanıklıdır. Dolayısıyla kaplamada kullanılan bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası düşüğe viskoz davranış ve kalıcı deformasyon erken başlar.

Bitümlü kaplamanın kalıcı deformasyonlarında etkili faktörlerden biri yumuşama noktasıdır. Yumuşama noktası yüksek bağlayıcının kullanıldığı karışımlarda tekerlek etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olduğu görülmektedir. Tekerlek izine hassas karışımlar için yumuşama noktası sıcaklığı tekerlek iziyle iyi bir korelasyon sağladığı ve yumuşama noktasındaki 5-6 °C lik bir azalmanın %20 daha fazla tekerlek izine yol açtığı belirtilmektedir (Kutluhan, 2004).

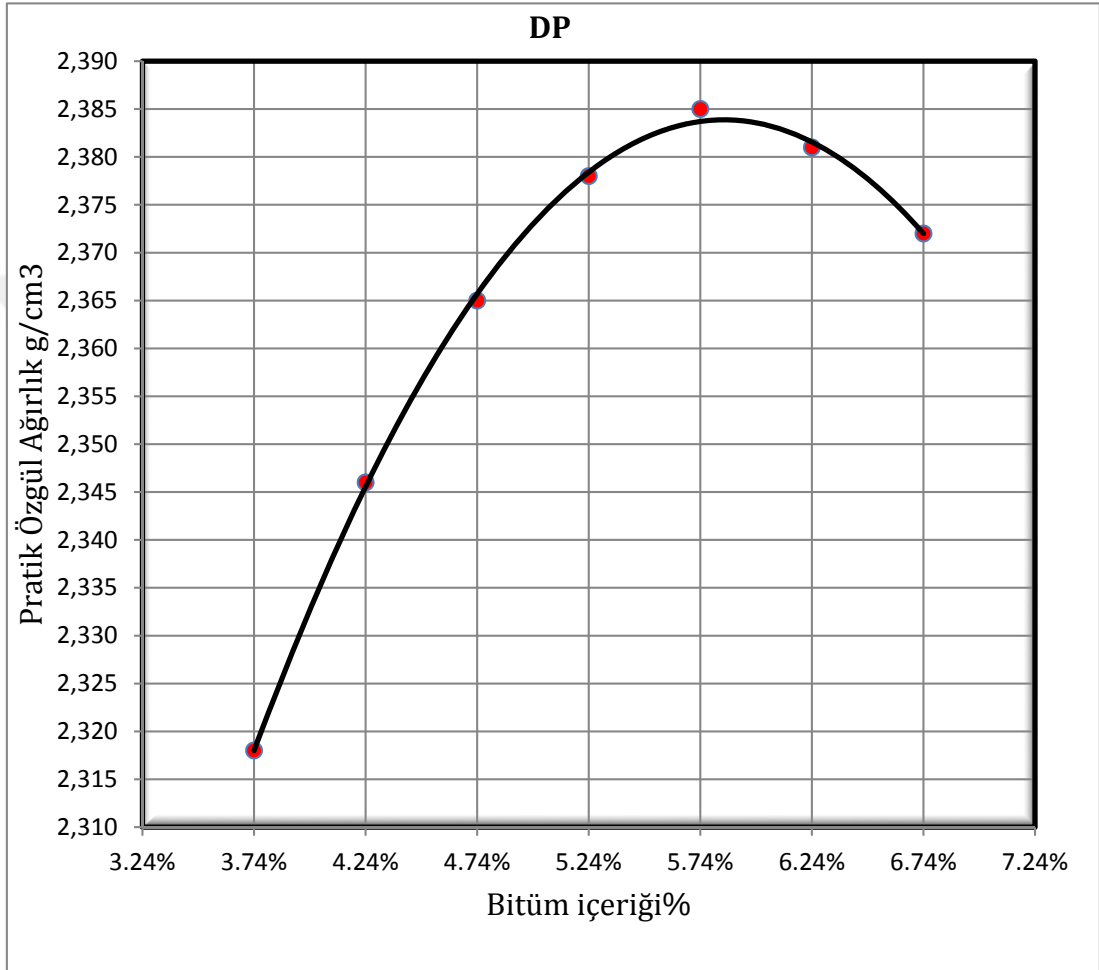
## 5.6. Optimum Bitüm Yüzdesi

Optimum bitüm yüzdesinin tespit edilmesi için Marshall deney metodu ve numuneleri hazırlanmış, agrega gradasyonu sabit tutularak %3.74, 4.24, 4.74, 5.24, 5.74, 6.24 ve %6.74 oranlarında olmak üzere her bitüm yüzdesinden üçer adet numune hazırlanmıştır.

Çizelge 5.12. Aşınma Tabakası İçin Marshall Metodu Dizayn Değerleri

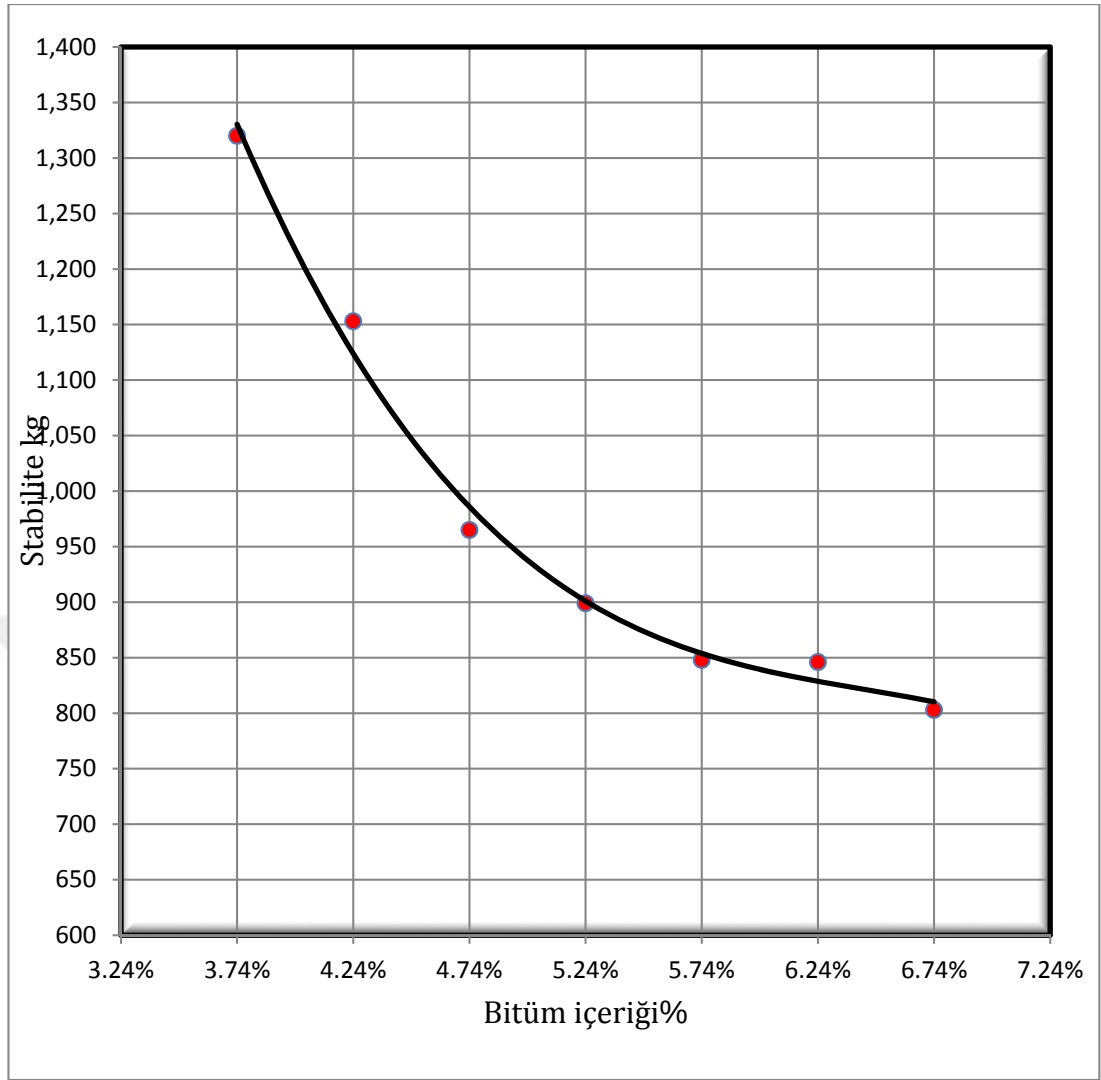
|                              | Bitüm (%) |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              | %3,74     | %4,24 | %4,74 | %5,24 | %5,74 | %6,24 | %6,74 |
| Dp (g/cm <sup>3</sup> )      | 2,318     | 2,346 | 2,365 | 2,378 | 2,385 | 2,381 | 2,372 |
| Dt (g/cm <sup>3</sup> )      | 2,524     | 2,505 | 2,486 | 2,468 | 2,451 | 2,433 | 2,416 |
| Vh (%)                       | 8,162     | 6,347 | 4,867 | 3,647 | 2,693 | 2,137 | 1,821 |
| VMA (%)                      | 15,93     | 15,35 | 15,13 | 15,09 | 15,29 | 15,88 | 16,65 |
| Vf (%)                       | 48,76     | 58,65 | 67,83 | 75,83 | 82,39 | 86,54 | 89,06 |
| Akma (mm)                    | 1,85      | 2,72  | 3,18  | 3,40  | 3,27  | 4,04  | 4,65  |
| Düzeltilmiş<br>Stabilite(kg) | 1320      | 1153  | 965   | 899   | 848   | 846   | 803   |

Aşınma tabakasının grafikleri aşağıda verilmiştir. Optimum Bitüm Yüzdesi bu grafikler yardımı ile hesaplanmaktadır. Buna göre pratik özgül ağırlık- % bitüm, stabilite - % bitüm, asfalt dolu boşluk -% bitüm, % boşluk - % bitüm, % VMA - % bitüm, % akma - % bitüm; grafikleri çizilmiştir. Aşınma tabakasının pratik özgül ağırlık- bitüm miktarı grafiği Şekil 5.3’ de verilmiştir.



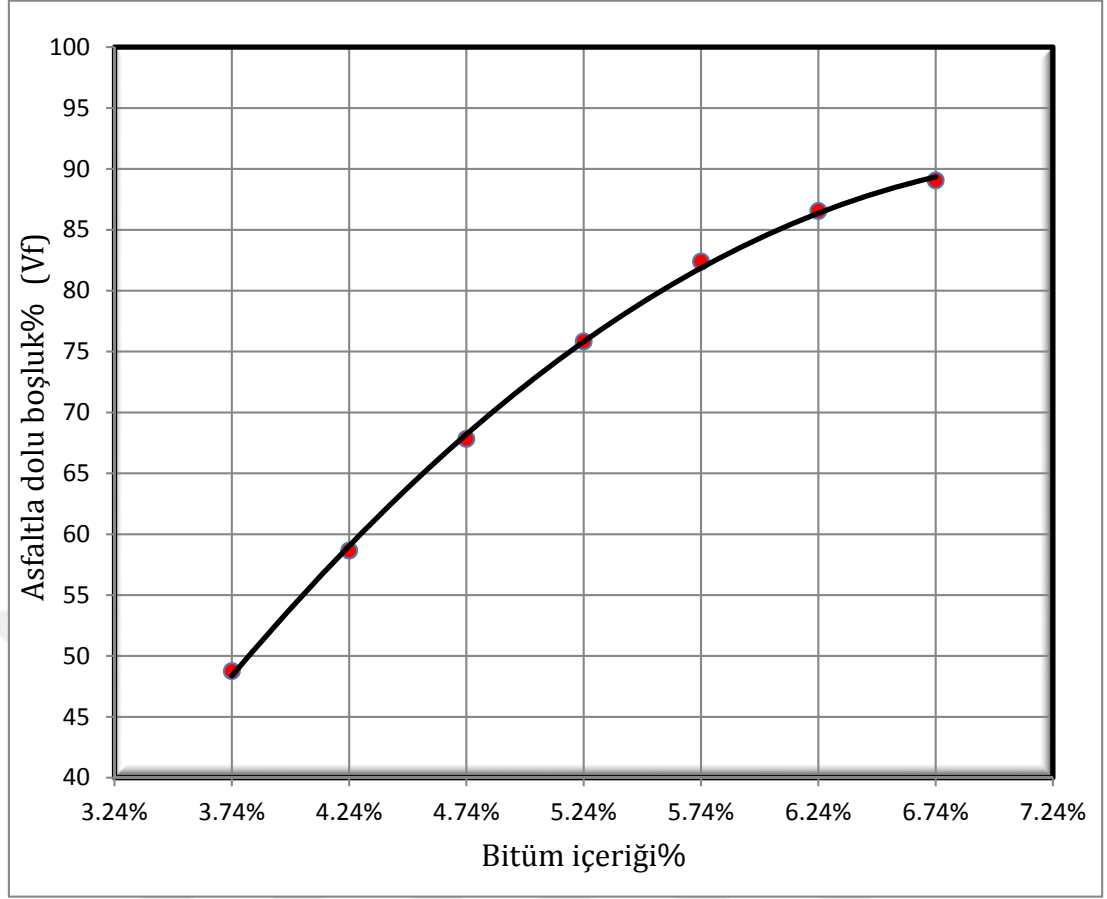
Şekil 5.3. Karışımın Dp-% Bitüm ilişkisi

Artan bitüm miktarı ile yapılan asfalt çimentosuna ait briketlerin yoğunluğu artış göstermektedir. Bitümlü karışımların yoğunluğu arttıkça stabilite durabilite gibi fiziksel özelliklerinde de artış gözlenmektedir. Grafiğe göre max. Yoğunluktaki bitüm yüzdesi % 5,89 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.4’ de stabilite – % bitüm grafiği verilmiştir.



Şekil 5.4. Karışımın Stabilite-% Bitüm ilişkisi

Stabilite değeri, sıkıştırılmış bir kaplama karışımının yapısal mukavemetini ifade eder. Bu mukavemete birince derecede asfalt miktarı ile karışımdaki agregaların gradasyon ve karakteristiği etki eder. Grafik incelendiğinde bitüm miktarı arttıkça stabilite değeri azaldığı görülmektedir. En uygun stabilitenin yakalandığı bitüm yüzdesi % 4,24 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.5' de aşınma tabakasının asfalt dolu boşluk yüzdesi- bitüm miktarı grafiği verilmiştir.

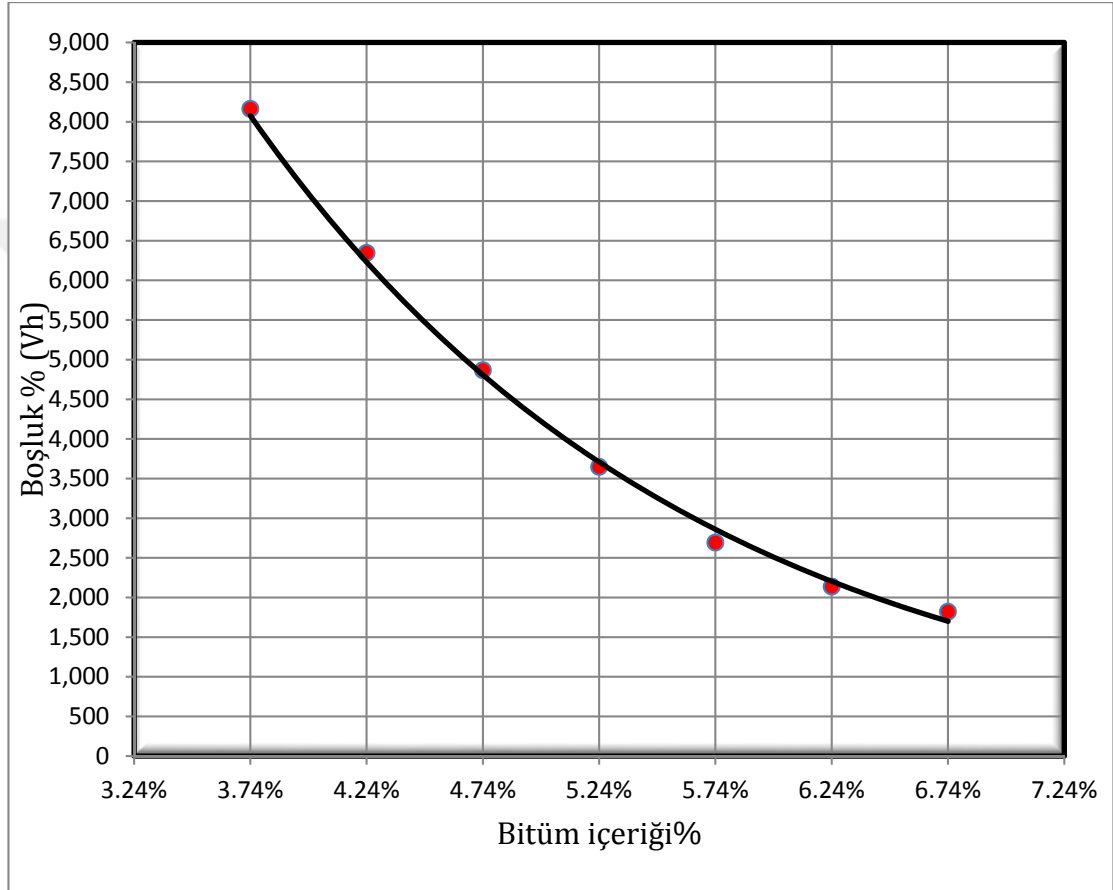


Şekil 5.5. Asfaltla dolu boşluk yüzdesi-bitüm ilişkisi

Şekil 5.5' de asfalt dolu boşluk oranı ile bitüm miktarı grafiği verilmiştir. Asfalt dolu boşluk oranı bitümlü agreganın basınç altında boşluksuz bir kitle haline yaklaşabilme derecesini ifade eder. Bu özellik doğal olarak birinci derecede agreganın boşluklarının ne dereceye kadar asfalt ile doldurulduğu ile alakalıdır.

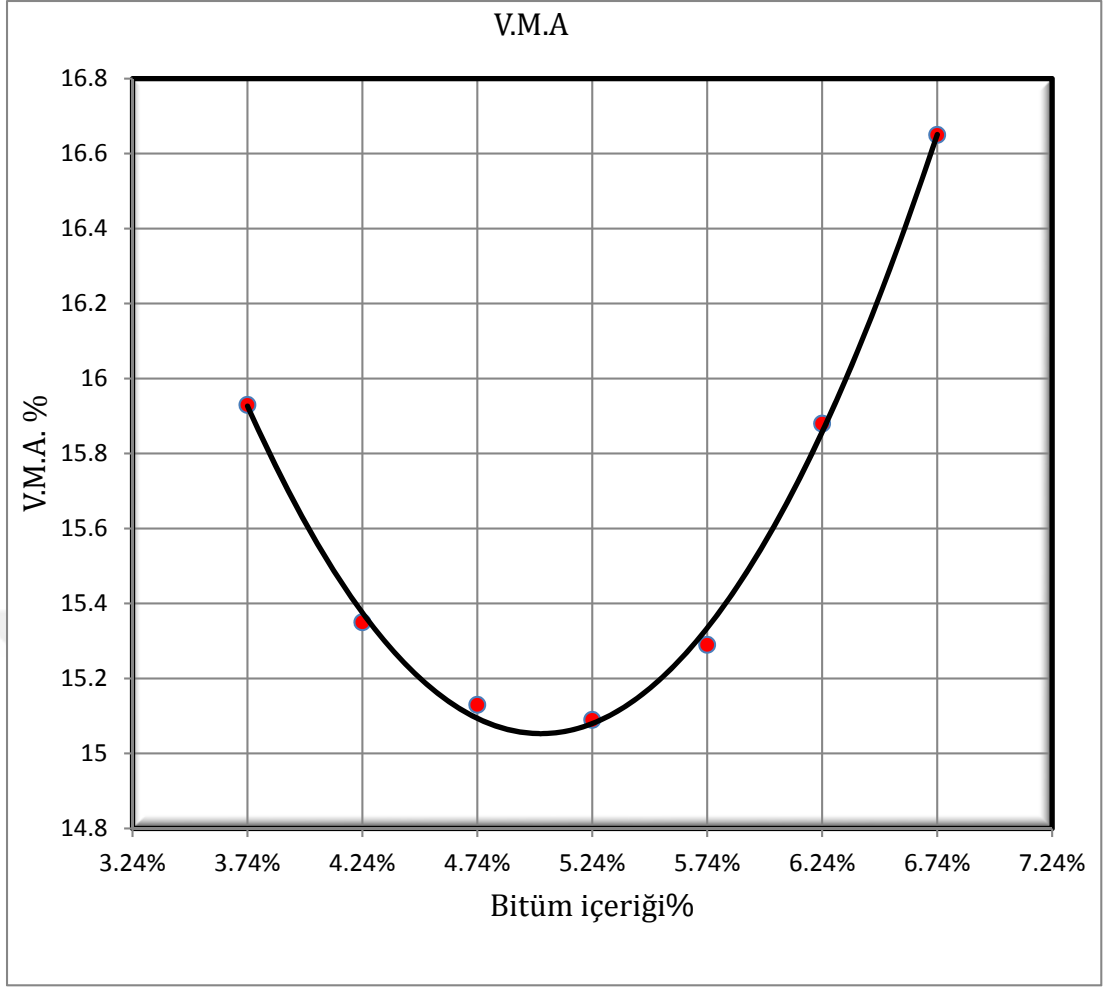
Beton asfalt karışımındaki bu boşlukların doldurulması aşırı su ve hava nüfuzunu engelleyecektir. Bu da agregalar arasındaki boşlukların maksimum derecede asfalt ile doldurulması ile mümkün olabilir. Bu şekilde yolun geçirimi azalacak, dolayısıyla yolda patlama şişme gibi olaylar gözükmeyecektir. Grafik incelendiğinde artan bitüm miktarı ile asfalt dolu boşluk oranında artış olduğu gözlenmektedir.

Yani agregalar arasındaki boşluklar asfalt ile dolmaktadır. Bu artış bir süre sonra yavaşlamıştır. Bu durum agrega karışımındaki boşluk oranının azaldığını göstermektedir. Karayolları teknik şartnamesine göre belirlenen Asfaltla dolu boşluk yüzdesi 75' dir. Buna göre bitüm yüzdesi % 5.19' dur. Şekil 5.6' da Boşluk % - Bitüm Miktarı grafiği verilmiştir. Şekil 5.7' de ise VMA- % Bitüm oranı verilmiştir.



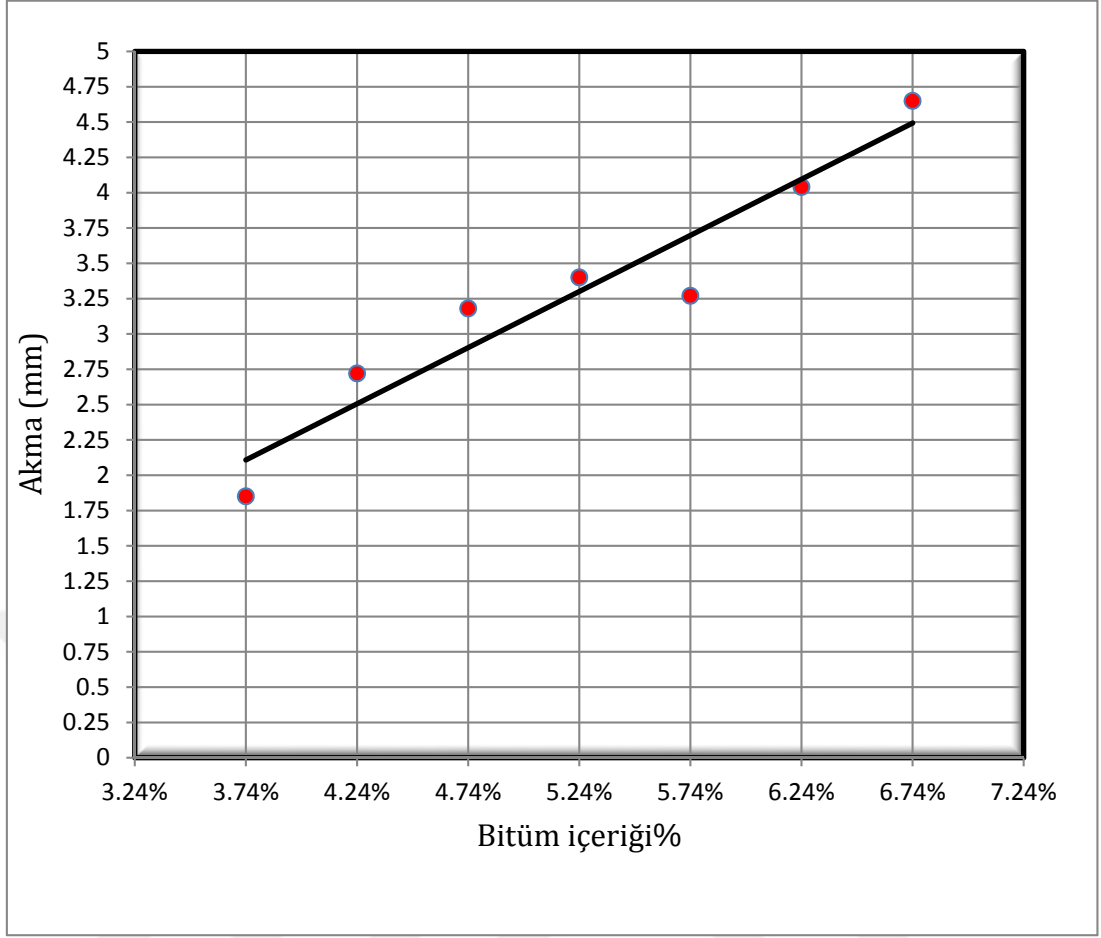
Şekil 5.6. Karışımındaki hava boşluğu - bitüm ilişkisi

Agregalar arasındaki boşluk % boşluk oranı olarak ifade edilmektedir. Artan bitüm miktarı ile boşluklar dolmakta ve boşluk yüzdesi azalmaktadır. Boşluk yol yapımında çatlamalara, akmalara ve su girişine neden olmaktadır. Grafik incelendiğinde bitüm miktarı arttıkça boşluk oranının azaldığı görülmektedir. Bir süre sonra bitümün agregalar arasındaki boşlukları tamamen doldurduğu, bitüm yüzdesinin artışında boşluk yüzdesinin azalmadığı görülmüştür. Karayolları teknik şartnamesine göre ortalama boşluk oranı %4 dür, Buna göre bitüm yüzdesi %5,09 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.7. Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA%) - bitüm ilişkisi

Asfalt miktarındaki her artış film kalınlığını artıracığından, agrega tanecikleri birbirinden ayrılır. Bu durum asfalt filmlerinin yeteri derecede kalınlaşarak, sıkıştırma enerjisi altında bir yağ gibi hareket etmeye başlamasına kadar agreganın sıkışmasına meydan vermez. Bu noktadan sonra asfalt miktarındaki ilave artışlar agrega üzerinde daha ileri bir yağlanma tesiri yapar ve boşluklar asfalt ile azami dereceye doluncaya kadar VMA' nın düşmesine sebep olur. Şekil 5.8'de ise akma –bitüm grafiği verilmiştir.



Şekil 5.8. Karışımın akma değeri-bitüm ilişkisi

Akma değeri; numunede kırılmayı meydana getirmek için gereken çap boyunca olan ezilmeyi ifade eder. Bu değer, plastikleşmeye veya kaplamanın trafik altında deforme olmasına karşı mukavemetin bir göstergesidir. Ayrıca akma değeri beton asfalt kaplamaların asfaltların plastiklik ve esneklik özelliklerini yansıtan bir değerdir. Akma değerine birinci derecede etki eden faktör, agrega boşluklarının ne dereceye kadar asfalt ile doldurulmuş olduğudur. Karışımın asfalt numunesi arttıkça akma değeri de artar. Grafik incelendiğinde de artan bitüm miktarı ile akma değerinde de bir artış olduğu gözlenmektedir.

Tüm grafikler için şartname sınırları sağlanıyorsa; Marshall Deneyi için bu malzeme yol yapımına uygundur denir. Buna göre; en yüksek pratik özgül ağırlık değeri 2,384 g/cm<sup>3</sup>;bu değerle çakışan bitüm yüzdesi değeri: %5.89 dür. Asfalt Dolu Boşluk Oranı Şartname değerine göre 75 'dir. Bu değere karşılık gelen bitüm yüzdesi; %5.19' dur. Stabilite grafiğine göre, bitüm yüzdesi: %4,24'e denk gelmektedir. Boşluk % grafiğine göre ise, şartname ortalaması olan %4 değerine karşılık gelen bitüm yüzdesi 5,09 olarak saptanmıştır. Optimum Bitüm Yüzdesi bu dört değer aritmetik ortalamasıdır.

$$\text{Optimum Bitüm Yüzdesi} = \frac{5,89 + 4,24 + 5,19 + 5,09}{4} = \% 5,10$$

Bu değer ise 5,10 olarak saptanmıştır. Kontrol amacıyla optimum bitüm miktarlarının şartnamelerde belirtilen akma ve % VMA'ları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Buna göre yorumlanan VMA % değeri 15,05 dır, şartname değerini sağlamaktadır. Akma değerinde 3,20 mm olarak okunmuştur. Optimum bitüme göre stabilite değeri, 915 kg, Boşluk % 4, Asfalt Dolu Boşluk % 73, Pratik Özgül Ağırlık değeri de yine optimum bitüm yüzdesine göre, 2,385 g/cm<sup>3</sup> olarak saptanmıştır. Hesaplanan optimum bitüm yüzdesine göre Aşınma tabakası dizayn verileri ve Karayolları Teknik Şartnamesi Çizelge 5.13' de verilmiştir.

Çizelge 5.13 Optimum bitüm değerine göre dizayn verileri

| Aşınma Tabakası Dizayn Parametreleri    | Optimum Bitüm Yüzdesi | Değer | Şartname aralığı | Sonuç |
|-----------------------------------------|-----------------------|-------|------------------|-------|
| Pratik Özgül Ağırlık gr/cm <sup>3</sup> | 5,10                  | 2,385 |                  | Uygun |
| Marshall Stabilite/ kg                  | 5,10                  | 915   | 900              | Uygun |
| Asfalt Dolu Boşluk Oranı %              | 5,10                  | 73    | 65 – 75          | Uygun |
| Boşluk%                                 | 5,10                  | 4     | 3 – 5            | Uygun |
| Agregalar Arası Boşluk yüzdesi V.M.A%   | 5,10                  | 15,05 | 14 – 16          | Uygun |
| Akma mm                                 | 5,10                  | 3,20  | 2 – 4            | Uygun |

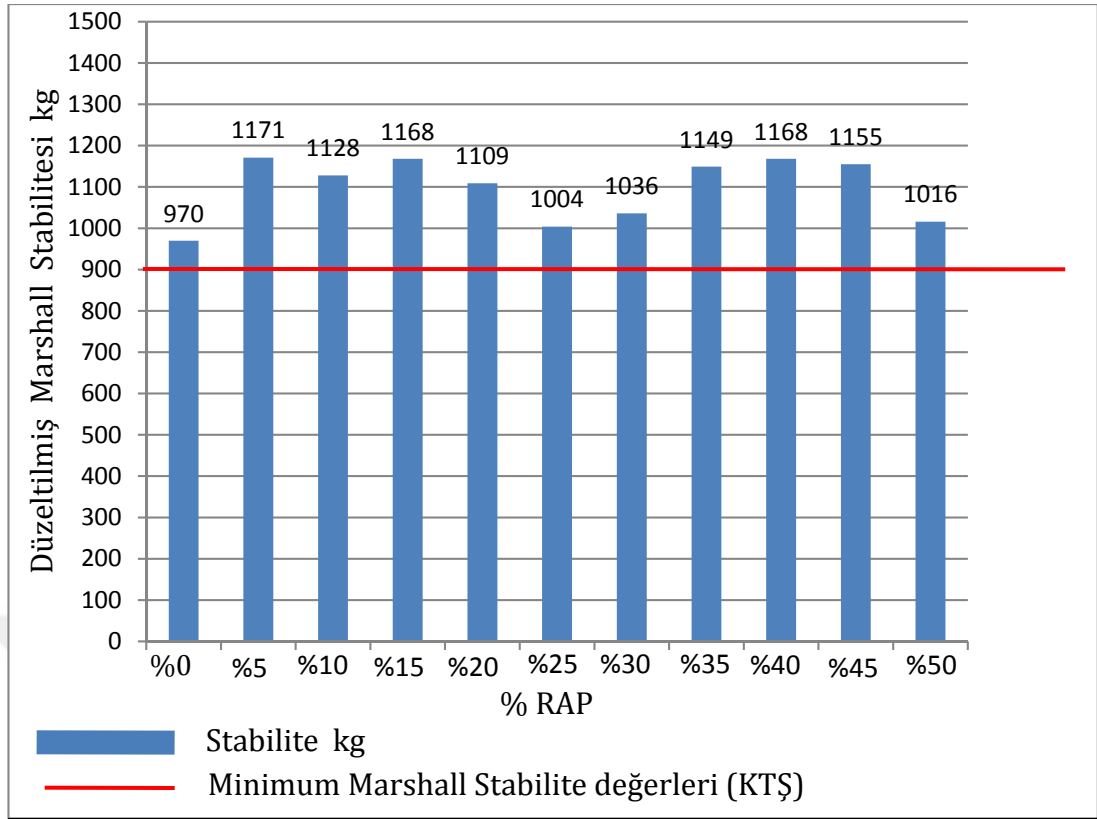
Çizelge 5.13'de görüldüğü gibi Aşınma tabakası için yapılan Marshall dizaynı için, ölçümü yapılan parametrelerin şartname sınırları içerisinde olduğu görülmüştür.

### 5.7. Sıcak Karışımın İçerisine Kazınmış Asfalt Kaplama Malzemesin (RAP) İlave Edildiğinde Yapılan Deney Bulguları

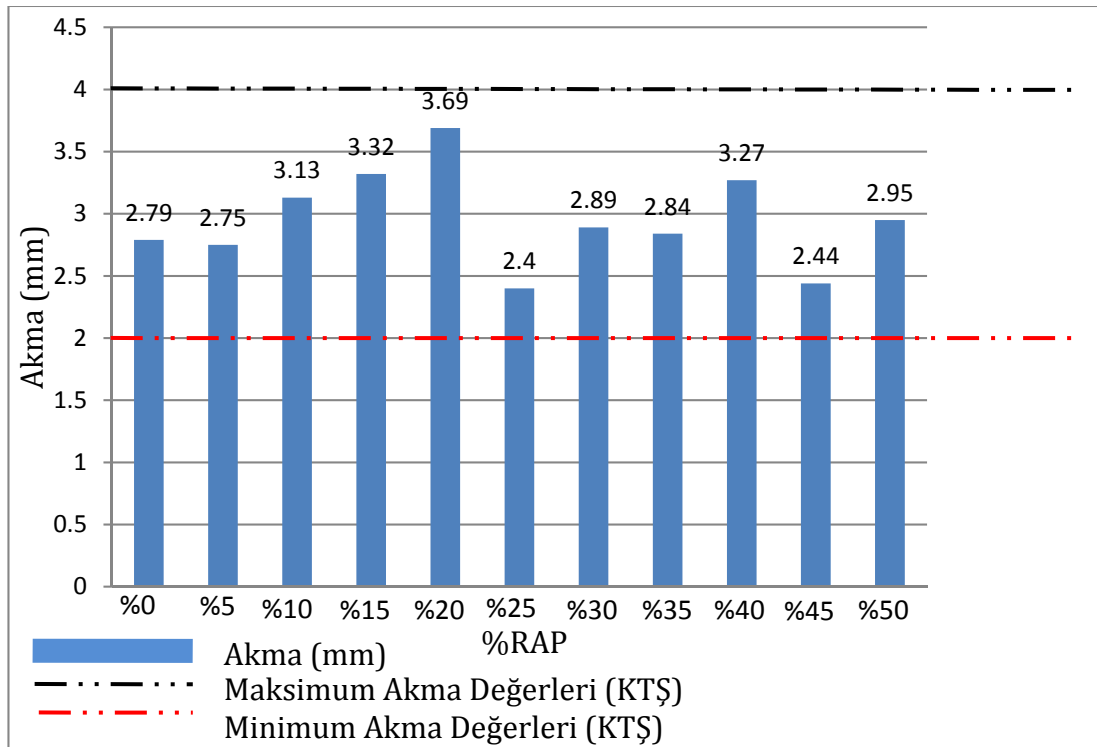
Çalışmada öncelikle Marshall metodu kullanılarak optimum asfalt miktarı belirlenmiştir. Karışım için gerekli olan optimum bağlayıcı miktarı belirlendikten sonra bu asfalt miktarı sabit kalmak şartı ile karışımın içerisine %5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 ve %50 oranlarında geri kazanılmış asfalt betonu malzemeleri ilave edilmiş ve tekrar Marshall deneyi yapılmıştır. Ayrıca %0 yani geri kazanılmış asfalt betonu malzemeleri (RAP) ilave edilmemiş kontrol numuneleri de üretilmiştir. Marshall Stabilite, Akma, Özgül ağırlık, Boşluk yüzdesi, VMA ve VFA değerlerinin RAP ilavesi ile değişimlerini gösteren Çizelge 5.14, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.14. Geri Kazanılmış Asfalt Betonu Malzemesi Kullanılan Aşınma Tabakası İçin Marshall Metodu Dizayn Değerleri

| Özellikler                 | RAP (%) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            | %0      | %5    | %10   | %15   | %20   | %25   | %30   | %35   | %40   | %45   | %50   |
| Dp (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,355   | 2,380 | 2,382 | 2,352 | 2,382 | 2,373 | 2,377 | 2,370 | 2,378 | 2,394 | 2,372 |
| Dt (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,473   | 2,471 | 2,469 | 2,467 | 2,464 | 2,462 | 2,460 | 2,458 | 2,456 | 2,453 | 2,450 |
| Vh (%)                     | 4,77    | 3,68  | 3,52  | 4,66  | 3,33  | 3,62  | 3,37  | 3,58  | 3,18  | 2,41  | 3,18  |
| VMA (%)                    | 15,73   | 14,47 | 14,41 | 15,80 | 14,47 | 15,02 | 14,67 | 14,94 | 14,68 | 14,06 | 14,87 |
| Vf (%)                     | 69,66   | 74,54 | 75,56 | 70,49 | 76,99 | 75,93 | 77,0  | 76,0  | 78,37 | 82,89 | 78,58 |
| Akma (mm)                  | 2,79    | 2,75  | 3,13  | 3,32  | 3,69  | 2,4   | 2,89  | 2,84  | 3,27  | 2,44  | 2,95  |
| Düzeltilmiş Stabilite (kg) | 970     | 1171  | 1128  | 1168  | 1109  | 1004  | 1036  | 1149  | 1168  | 1155  | 1016  |



Şekil 5.9. Karışımın içerisine (%0 - %50) RAP ilave edildiğinde Marshall Stabilitesi sonuç grafiği



Şekil 5.10. Karışımın içerisine (%0 - %50) RAP ilave edildiğinde Marshall Akma sonuç grafiği

Marshall Stabilit  değerleri geri kazanılmış asfalt betonu malzemeleri (RAP) ilavesi ile artırmıştır ve en düşük 1004 kg civarlarına kadar düşmüştür. Ancak bu değer yine Karayolları Teknik şartnamesinde aşınma tabakası istenilen minimum 900 kg değerinin üzerindedir. Marshall akma değerleri incelendiğinde RAP ilavesinin akma değerlerini şartname sınırları içerisinde kaldığı görülmüştür. KTş'sinde aşınma tabakası için Marshall akma değerleri 2 – 4 mm arasında olmalıdır. RAP katkılı üretilen numunelerin bu sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.  zet olarak RAP ilavesi ile aşınma tabakası için üretilen bitümlü sıcak karışım numuneleri KTş şartname sınırları içerisinde kalmaktadır.

#### **5.8. Sıcak Karışımın İçerisine RAP İlave Edildiğinde İndirekt  ekme Deney Bulguları**

Sıcak karışımın içerisine RAP ilave edilerek asfalt betonunun nem duyarlılığı testi ve dolaylı çekme davranışını değiştirmek amaçlanmıştır.

Yapılan Marshall deneyi sonuçlarına göre; %0 RAP'in %50 RAP'e oranla daha iyi sonuç verdiği görüldüğü için %0 RAP'in %25 RAP'e koşullandırılmış indirekt çekme yapılmıştır. Bunu göz önünde bulundurarak koşullandırılmış ve koşullandırılmamış dolaylı çekme deneyi için numuneler hazırlanmıştır. Her orandan 4' er numune hazırlanmıştır.

Bunun için öncelikle elde edilen karışımdan dört adet Marshall numunesi hazırlanmıştır. Bu numuneler öncelikle sabit ağırlığa ulaşıncaya kadar 72 saat boyunca 40° C sıcaklıkta bekletilmıştir. 72 saat sonunda her dört numunede etüvden çıkarmıştır ve ikisi 25° C sıcaklıkta su banyosuna 24 saat boyunca beklemek üzere yerleştirilmıştir. Diğer iki numune ITS<sub>KURU</sub> değerini belirlemek üzere ITS cihazı ile kırılmıştır. Koşullandırılmış numuneler 24 saat su banyosunda bekledikten sonra üstünde en az 2.5 cm su olacak şekilde su doluyup bir kaba koyulur ve doğunluk oranı %55 – 80 arasına gelinceye kadar vakumlanmıştır. Vakum işlemi tamamlandıktan sonra sudaki ağırlığını ve yüzey kuru suya doğun ağırlıklarını tartılmıştır.

Tartılmış numuneleri streç film ile hava almayacak şekilde sarılır ve 16 saatliğine -18°C sıcaklığa ayarlanmış kabinde dondurulmuştur. 16 saat sonunda numuneleri donma kabininden çıkarılmış ve 24 saat boyunca beklemek üzere 60°C sıcaklığa ayarlanmış su banyosunda çözdürülmüştür. 24 saat sonunda numuneleri 60°C sıcaklıktaki su banyosundan çıkarılmış ve 25°C sıcaklıktaki suya 2 saatliğine yerleştirilmiştir. 2 saat sonunda numuneleri sudan çıkarılmıştır ve 25°C ortam sıcaklığında ITS cihazı ile kırılmıştır.

Çizelge 5.15’de görüldüğü gibi, İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS) için Eşitlik 4.21 kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

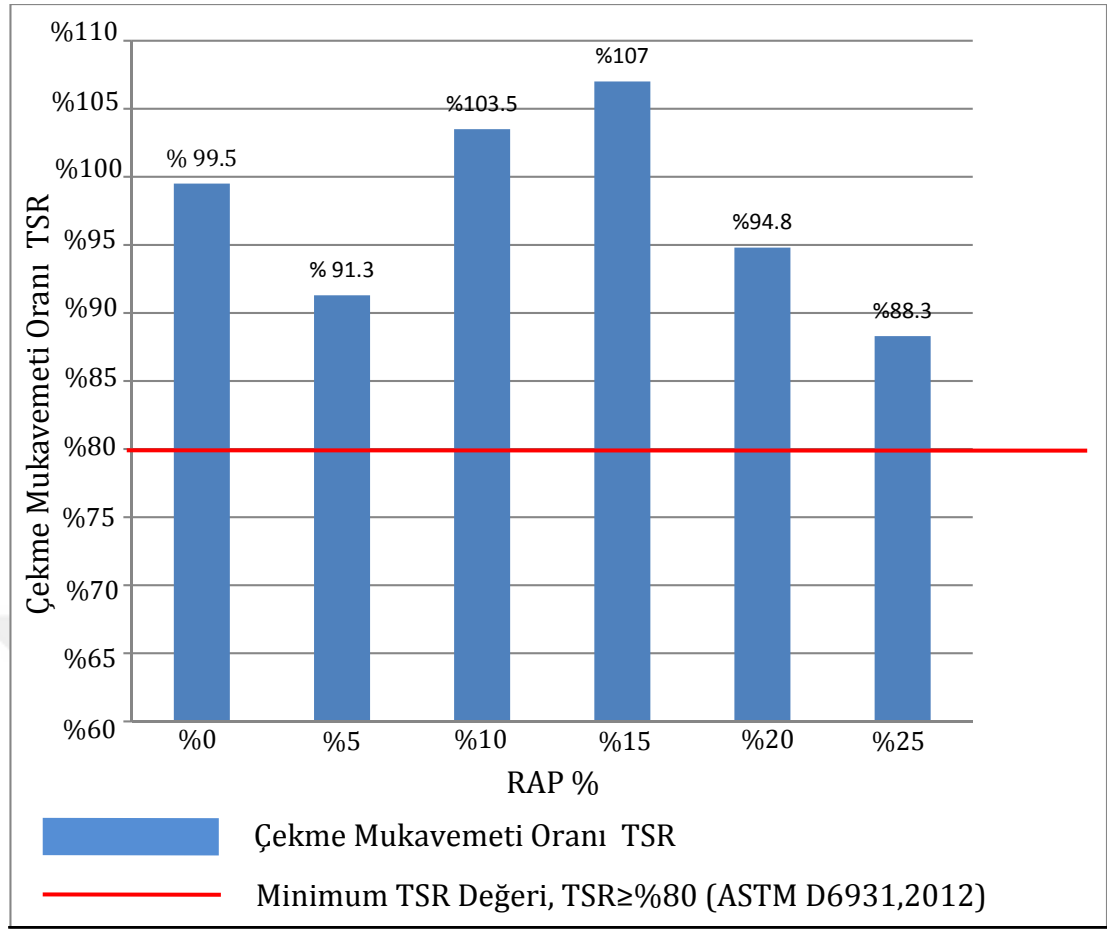
Çizelge 5.15. ITS<sub>KURU</sub> ve ITS<sub>ISLAK</sub> deney sonuçları

|                      | RAP (%)            |                  |                  |                   |                  |                    |
|----------------------|--------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|
|                      | %0                 | %5               | %10              | %15               | %20              | %25                |
| ITS <sub>KURU</sub>  | 887,33<br>790,45   | 944,61<br>931,96 | 803,61<br>928,17 | 969,54<br>880,27  | 878,21<br>930,98 | 1024,48<br>1006,86 |
| ITS <sub>ISLAK</sub> | 873,434<br>795,759 | 868,75<br>844,14 | 899,54<br>892,24 | 1031,05<br>948,64 | 858,31<br>856,66 | 953,92<br>838,89   |

TSR için Denklem 4.22 kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Çizelge 5.16’da görüldüğü gibi tüm numuneler % 80 TSR oranının üzerindedir ve şartnameyi sağlamaktadır.

Çizelge 5.16. Çekme Mukavemeti Oranı (TSR) deney sonuçları

| RAP (%) | İndirekt Çekme Mukavemeti ITS <sub>KURU</sub> | İndirekt Çekme Mukavemeti ITS <sub>ISLAK</sub> | Çekme Mukavemeti Oranı TSR (%) |
|---------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|
| %0      | 839                                           | 834,6                                          | 99,5                           |
| %5      | 938                                           | 856,4                                          | 91,3                           |
| %10     | 865,9                                         | 895,9                                          | 103,5                          |
| %15     | 925                                           | 989,8                                          | 107,0                          |
| %20     | 904,6                                         | 857,5                                          | 94,8                           |
| %25     | 1015,7                                        | 896,4                                          | 88,3                           |



Şekil 5.11. RAP içeriklerine göre Çekme Mukavemeti Oranı (TSR) değerleri

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, eski asfalt kaplamaların veya bozulmuş kaplamaların kazılması sonucu elde edilen geri kazanılmış asfalt betonu malzemesin (RAP) aşınma tabakasında kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bu çalışmada, atıkların değerlendirilmesi ve çevreye olan zararlarının minimuma indirilmesi amacıyla, aşınma tabakasında geri kazanılmış asfalt betonu malzemesinin kullanılabilirliği Marshall Stabilite, akma ve indirekt çekme değerlerine odaklanılmış ve geleneksel karışım numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

- Yapılan deneyler sonucunda kullanılan hem normal kireçtaşı hem de ekstraksiyon kalıntısı kireçtaşı örneğinin su emme oranı ve özgül ağırlık değeri ve aşınma kaybı % TSE Standartlarına göre uygundur.
- Yapılan deneyler sonucunda, karışımdaki bitümün penetrasyonunun hesaplanmasına göre, karışıma katılacak normal bitüm ve eski ve yeni bitüm karışımları üzerinde deneyler yapılarak sonuçları EN 13108-1:2006 standardına göre aşınma tabakasında %25'e kadar RAP kullanımına izin verdiği görülmüştür.
- Yapılan deneyler sonucunda, karışımdaki bitümün yumuşama noktası değerinin hesaplanmasına göre, karışıma katılacak normal bitüm ve eski ve yeni bitüm karışımları üzerinde deneyler yapılarak sonuçları EN 13108-1:2006 standardına göre aşınma tabakasında %15'e kadar RAP kullanımına izin verdiği belirlenmiştir.
- Yapılan deneyler sonucunda, RAP ilave edilerek üretilen BSK numunelerinin Marshall Stabilite değerleri RAP miktarının artması ile artırdığı görülmüştür. Ayrıca, Marshall Stabilite sonuçları %5'ten %50'e RAP içeriğinde dahi Karayolları Teknik Şartnamesinde izin verilen minimum stabilite değerlerinden daha büyük çıkmıştır.

Akma değeri ile yolda oluşan çatlamlar mm'lik olarak okunur. İstenmeyen bu durum yolda büyük tehlikeler oluşturmaktadır. RAP ilaveli BSK numunelerinin akma değerleri şartname sınırları içerisinde kalmakta ve yol güvenliği ve ömrü açısından bir tehlike oluşturmadığı tespit edilmiştir.

- Yapılan deneyler sonucunda, indirekt çekme deneyi için en yüksek stabilite değerini veren aralık dikkate alınarak % 0, 5, 10, 15, 20, ve 25 RAP oranları kullanılmıştır. En yüksek indirekt çekme sonucu %15 RAP katkılı numunelerde elde edilmiştir.

Bu sonuçlar ışığında, aşınma tabakasında %15 kullanım miktarında elde edilen test sonuçları, kazınmış asfalt ilavesi ile asfalt şartnamesi kriterlerini sağlayan karışımlar elde edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, asfalt betonunun uzun dönemdeki performansına %15 RAP ilavesi olumlu etki yapabileceği düşünülmektedir.

## **Öneriler**

- Her ne kadar, yapılan testler sonucunda olumlu sonuçlar alınmış olsa da, plastik deformasyon veya tekerlek izi deneyi gibi testler ile uzun süreli performansın da araştırılması yerinde olabilecektir.
- Ayrıca bu çalışmada kullanılan geri kazanılmış malzeme tüm geri kazanılmış malzemeleri temsil etmemektedir. Her bir geri kazanılmış malzeme için yeniden tasarım yapılmalıdır. Gerek bitüm oranı, gerek agrega özelliği ve gradasyonu gerekse de yaşlanma parametreleri önemli değişkenlerdir.
- Ayrıca bu çalışmada kullanılmamış olan çeşitli katkı maddelerinin kullanılması ile farklı oranda kullanımların da mümkün olabileceği dikkate alınmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Ahmed, I., (1993). Use of Waste Materials in Highway Construction. Purdue University Department of Civil Engineering, PhD. Thesis, 114s, Indiana.
- Aksoy, İ.M., 1993, Modern Yol İnşaatında Geotekstil ve Geogrid Uygulaması Konularında Araştırma, Yüksek Lisan Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 115 s. Atlanta-Georgia, 14-18 (2003).
- Aravind, K., & Das, A., 2007. Bituminous Pavement Recycling, K Aravind, A Das – Journal Of Materials İn Civil Engineering, 2007.
- ARRA Asphalt Recycling and Reclaiming Association Basic Manual 2001.
- Asphalt Institute, Mix Desing Methods For Asphalt Concerete and Other Hot Mix Types, Asphalt Instutite, Manuel Series No.2 (MS-2) Kentucky, (1996).
- Asphalt Institute, The History of the Asphalt, Annual Magazine 2002.
- Balta, I., “Bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı duyarlılığı”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 51-52, 83 (2004).
- Curi. K., Kocasoy, G., "Resources Recycling Status And Trends In The Turkish Iron And Steel Industry", Industry and Environment, 5 (1), 15-18, December 1982.
- Çelik, O. N., “Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği”, , 4. Ulusal Asfalt. Sempozyumu, Ankara, 181-187 (2004).
- Çubuk, M., 2007. Katkı maddeleri ile bitümün reolojik özelliklerinin geliştirilmesi ve esnek kaplama malzeme oluşumunda problemlerin giderilmesi, Gazi Üniversitesi, Doktora Tezi, 2007.
- Emery, J., Cold in – place asphalt recycling, full depth recycling and hot in place recycling , alındığı tarih 08 Kasım 2009<[www.swiftconference.org/captg/09presentations/Wednesday PM John Emery. pdf](http://www.swiftconference.org/captg/09presentations/Wednesday_PM_John_Emary.pdf)>
- Güngör, A.G., Orhan, F., Kaşak, S., Dost, Y., “Kazılmış asfalt kaplamaların yeniden kullanımı, Karayolu 1. Ulusal Kongresi, 1-3 nisan 2008.
- Gürer, C., Akbulut, H., ve Kurklu, G., İnşaat Endüstrisinde Geri Dönüşüm ve Bir Hammadde Kaynağı Olarak Farklı Yapı Malzemelerinin Yeniden Değerlendirilmesi, 2004.
- Harold, R., Paul, P. E., Chris, P. E., “Pavement distress”, Technical Assistance Report, Louisiana Transportation Research Center, Louisiana, 12-16 (1995).

- Huang Y., Bird R.N., and Heidrich O., (2007). A Review Of The Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements. Resources Conservation and Recycling: Volume 52, Issue 1, Pages 58-73.
- İlçalı M., Tayfur S., Özen, H., Sönmez İ., Eren K., 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT yayınları, İstanbul.
- Jacobson, T., 2002. Cold Recycling Of Asphalt Pavement - Mix In Plant, Swedish National Road and Transport Research Institute, SE-581 95 Linköping, İsveç.
- Joe Button, R.L., "Guidelines For Using Geosynthetics With Hma Overlays To Reduce Reflective Cracking", Information & Technology Exchange Center, Texas Transportation Institute, Texas A & M University College Station, Texas 77843-3135, May 2003.
- Karayolları Teknik Şartnamesi, Ankara, 2013.
- Kuloglu, N., Kök, B.V., Öndas, M., "Sathi kaplamalarda kusma olayına etki eden faktörler", ", 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 141-148 (2004).
- Kurtis, K., "Asphalt and asphalt concrete", Georgia Institute Tecnology, Altanta-Georgia, 14-18(2003).
- Kutluhan, S., Ağar, E., "Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunun incelenmesi", 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 213-223 (2004).
- Orhan, F., "Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları", Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 10-24 (2005).
- Önal, M. A., Kahramangil, M., "Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı", Karayolları Genel Müdürlüğü, 26-30 (1993).
- Önal, M., Karaca, S., Asfalt Betonu ve Diğer Sıcak Karışım Tipleri İçin Karışım Dizayn Metodları, 107s, Çeviri 1984.
- Pamuk, İ., 1986. Bozulmuş bitümlü yol kaplamalarının yeniden kullanılması Yönteminin Türkiye’de Uygulanabilirliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, 1986.
- Randy, C., West, 2010."Reclaimed Asphalt Pavement Management", National Center for Asphalt Technology Auburn University, August 1, 2010.
- Michelle, S., 2007. Re-using asphalt (RAP), road recycling, <http://www.worldhighways.com> Erişim Tarihi: 30.11.2015.
- Sağlık, A., Güngör, A.G., Güngör, "Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi", 147 s, KGM, Ankara, 2008.

- Sengöz, B., Agar, E., "Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına etkisi", \_TÜ Dergisi, 4 (1), 71-82 (2005).
- Skok, E. A., Chadbourn, B.A., Crow, B. L., Spindler, S., "The effect of voids in mineral aggregate (VMA) on hot-mix asphalt pavements", MN/RC 2000-13, Minnesota Department of Transportation Research Service, Minnesota, 1-13 (2000).
- TS 1081 EN 12591, "Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar- kaplama sınıfı bitümler özellikler", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2004).
- Tunç, A., "Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı", Asil Yayın Dağıtım Ltd. Sti., Ankara, 54, 98, 104-115, 125-127, 163-168, 206-215 (2004).
- U.S. Department of Transportation ,Federal Highway Administration" Asphalt Recycling And Reclaiming Association" USA 2001, ARRA.
- Uluçaylı, M., "Modifiye bitüm ve modifikasyon katkıların kullanımı", 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 15-18 (1998).
- Uzun, İ., 2011."Yol Andezitin Asfalt Betonunda Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- Whiteoak, D., "Shell Bitüm El Kitabı", Editörleri, Abdullah Hilmi Lav, M. Aysen Lav, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul, 33-34, 47, 50, 101-114, 123, 133-136, 148, 150-159 (2004).
- Wirtgen GmbH" Wirtgen Cold Recycling Technology" , Reinhard-Wirtgen-Strasse 2 · 53578 Windhagen · Germany 2010.
- Yoder, E.J., Witczak, M.W., "Principles of pavement design", pp. 17, John Wiley and Sons., Canada, 1975.

## **EKLER**

### **EK A.** Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım dizaynının hazırlanması



**EK A.1.** Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım dizaynının hazırlanması

Uygun karışım gradasyonunun veren, ilave agrega boyutlarının ve kazanmış asfalt malzemesinin karışım oranı hesaplanır.

Çizelge A.1. %10 RAP Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım dizaynının hazırlanması.

| ELEK<br>AÇIKLIĞI                                        | Aşınma<br>Tabakası<br>için<br>Gradasyon<br>Limitleri | %<br>Seçilen | Üstte kalan<br>agrega<br>(karışım<br>gradasyonu) | Kazanmış<br>asfalt<br>(%10 RAP) | Eklenecek<br>Agrega |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| $\frac{3}{4}$                                           | 100                                                  | 100          | 0                                                | 0                               | 0                   |
| $\frac{1}{2}$                                           | 88 – 100                                             | 90           | 120                                              | 7,70                            | 112,3               |
| $\frac{3}{8}$                                           | 72 – 90                                              | 80           | 120                                              | 10,15                           | 109,85              |
| N0.4                                                    | 42 – 52                                              | 48           | 384                                              | 36,60                           | 347,40              |
| N0.10                                                   | 25 – 35                                              | 33           | 180                                              | 25,70                           | 154,3               |
| N0.40                                                   | 10 – 20                                              | 13           | 240                                              | 24,10                           | 215,90              |
| N0.80                                                   | 7 – 14                                               | 10           | 36                                               | 3,50                            | 32,5                |
| N0.200                                                  | 3 – 8                                                | 6            | 48                                               | 5,30                            | 42,70               |
| pan                                                     |                                                      |              | 72                                               | 6,5                             | 65,50               |
|                                                         |                                                      |              | 1200 gr.                                         | 119,55 gr                       | 1080,45             |
| Karışımındaki Toplam Bitüm(Optimum Bitüm Yüzdesi %5,10) |                                                      |              |                                                  |                                 | 61,20 gr.           |
| Toplam Asfalt (agrega 1200+ bitüm 61,20)                |                                                      |              |                                                  |                                 | 1261,2 gr.          |
| %10 RAP                                                 |                                                      |              |                                                  |                                 | 126,12 gr.          |
| Bitüm RAP Malzemesi içindeki (%4,82)                    |                                                      |              |                                                  |                                 | 6,08 gr.            |
| Karışıma eklenecek yeni bitüm                           |                                                      |              |                                                  |                                 | 55,12 gr.           |

Çizelge A.2. %20 RAP Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım dizaynının hazırlanması.

| ELEK<br>AÇIKLIĞI                                         | Aşınma<br>Tabakası<br>için<br>Gradasyon<br>Limitleri | %<br>Seçilen | Üstte kalan<br>agrega<br>(karışım<br>gradasyonu) | Kazınmış<br>asfalt<br>(%20 RAP) | Eklenecek<br>Agrega |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| $\frac{3}{4}$                                            | 100                                                  | 100          | 0                                                | 0                               | 0                   |
| $\frac{1}{2}$                                            | 88 – 100                                             | 90           | 120                                              | 15,40                           | 104,6               |
| $\frac{3}{8}$                                            | 72 – 90                                              | 80           | 120                                              | 20,30                           | 99,70               |
| N0.4                                                     | 42 – 52                                              | 48           | 384                                              | 73,20                           | 310,80              |
| N0.10                                                    | 25 – 35                                              | 33           | 180                                              | 51,40                           | 128,60              |
| N0.40                                                    | 10 – 20                                              | 13           | 240                                              | 48,20                           | 191,80              |
| N0.80                                                    | 7 – 14                                               | 10           | 36                                               | 7                               | 29                  |
| N0.200                                                   | 3 – 8                                                | 6            | 48                                               | 10,60                           | 37,40               |
| pan                                                      |                                                      |              | 72                                               | 13,05                           | 58,95               |
|                                                          |                                                      |              | 1200 gr.                                         | 239,15 gr                       | 960,85              |
| Karışımındaki Toplam Bitüm (Optimum Bitüm Yüzdesi %5,10) |                                                      |              |                                                  |                                 | 61,20 gr.           |
| Toplam Asfalt (agrega 1200+ bitüm 61,20)                 |                                                      |              |                                                  |                                 | 1261,2 gr.          |
| %20 RAP                                                  |                                                      |              |                                                  |                                 | 252,24 gr.          |
| Bitüm RAP Malzemesi içindeki (%4,82)                     |                                                      |              |                                                  |                                 | 12,16 gr.           |
| Karışıma eklenecek yeni bitüm                            |                                                      |              |                                                  |                                 | 49,04 gr.           |

Çizelge A.3. %30 RAP Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım izaynının hazırlanması.

| ELEK<br>AÇIKLIĞI                                         | Aşınma<br>Tabakası<br>için<br>Gradasyon<br>Limitleri | %<br>Seçilen | Üstte kalan<br>agrega<br>(karışım<br>gradasyonu) | Kazınmış<br>asfalt<br>(%30 RAP) | Eklenecek<br>Agrega |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| $\frac{3}{4}$                                            | 100                                                  | 100          | 0                                                | 0                               | 0                   |
| $\frac{1}{2}$                                            | 88 – 100                                             | 90           | 120                                              | 23,10                           | 96,90               |
| $\frac{3}{8}$                                            | 72 – 90                                              | 80           | 120                                              | 30,45                           | 89,55               |
| N0.4                                                     | 42 – 52                                              | 48           | 384                                              | 109,8                           | 274,20              |
| NO.10                                                    | 25 – 35                                              | 33           | 180                                              | 77,1                            | 102,90              |
| NO.40                                                    | 10 – 20                                              | 13           | 240                                              | 72,30                           | 167,70              |
| NO.80                                                    | 7 – 14                                               | 10           | 36                                               | 10,50                           | 25,50               |
| NO.200                                                   | 3 – 8                                                | 6            | 48                                               | 15,90                           | 32,10               |
| pan                                                      |                                                      |              | 72                                               | 19,58                           | 52,42               |
|                                                          |                                                      |              | 1200 gr.                                         | 358,725 gr                      | 841,275             |
| Karışımındaki Toplam Bitüm (Optimum Bitüm Yüzdesi %5,10) |                                                      |              |                                                  |                                 | 61,20 gr.           |
| Toplam Asfalt (agrega 1200+ bitüm 61,20)                 |                                                      |              |                                                  |                                 | 1261,2 gr.          |
| %30 RAP                                                  |                                                      |              |                                                  |                                 | 378,36 gr.          |
| Bitüm RAP Malzemesi içindeki (%4,82)                     |                                                      |              |                                                  |                                 | 18,24 gr.           |
| Karışıma eklenecek yeni bitüm                            |                                                      |              |                                                  |                                 | 42,96 gr.           |

Çizelge A.4. %40 RAP Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım dizaynının hazırlanması.

| ELEK<br>AÇIKLIĞI                                         | Aşınma<br>Tabakası<br>için<br>Gradasyon<br>Limitleri | %<br>Seçilen | Üstte kalan<br>agrega<br>(karışım<br>gradasyonu) | Kazınmış<br>asfalt<br>(%40 RAP) | Eklenecek<br>Agrega |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| ¾                                                        | 100                                                  | 100          | 0                                                | 0                               | 0                   |
| ½                                                        | 88 – 100                                             | 90           | 120                                              | 30,80                           | 89,20               |
| 3/8                                                      | 72 – 90                                              | 80           | 120                                              | 40,60                           | 79,40               |
| N0.4                                                     | 42 – 52                                              | 48           | 384                                              | 146,4                           | 237,60              |
| N0.10                                                    | 25 – 35                                              | 33           | 180                                              | 102,8                           | 77,20               |
| N0.40                                                    | 10 – 20                                              | 13           | 240                                              | 96,40                           | 143,60              |
| N0.80                                                    | 7 – 14                                               | 10           | 36                                               | 14                              | 22                  |
| N0.200                                                   | 3 – 8                                                | 6            | 48                                               | 21,20                           | 26,80               |
| pan                                                      |                                                      |              | 72                                               | 26,10                           | 45,90               |
|                                                          |                                                      |              | 1200 gr.                                         | 478,30 gr                       | 721,70              |
| Karışımındaki Toplam Bitüm (Optimum Bitüm Yüzdesi %5,10) |                                                      |              |                                                  |                                 | 61,20 gr.           |
| Toplam Asfalt (agrega 1200+ bitüm 61,20)                 |                                                      |              |                                                  |                                 | 1261,2 gr.          |
| %40 RAP                                                  |                                                      |              |                                                  |                                 | 504,48 gr.          |
| Bitüm RAP Malzemesi içindeki (%4,82)                     |                                                      |              |                                                  |                                 | 24,32 gr.           |
| Karışıma eklenecek yeni bitüm                            |                                                      |              |                                                  |                                 | 36,88 gr.           |

Çizelge A.5 %50 RAP Geri kazanımlı bitümlü sıcak karışım dizaynının hazırlanması.

| ELEK<br>AÇIKLIĞI                                         | Aşınma<br>Tabakası<br>için<br>Gradasyon<br>Limitleri | %<br>Seçilen | Üstte kalan<br>agrega<br>(karışım<br>gradasyonu) | Kazınmış<br>asfalt<br>(%50 RAP) | Eklenecek<br>Agrega |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| ¾                                                        | 100                                                  | 100          | 0                                                | 0                               | 0                   |
| ½                                                        | 88 – 100                                             | 90           | 120                                              | 38,50                           | 81,50               |
| 3/8                                                      | 72 – 90                                              | 80           | 120                                              | 50,75                           | 69,25               |
| N0.4                                                     | 42 – 52                                              | 48           | 384                                              | 183                             | 201                 |
| NO.10                                                    | 25 – 35                                              | 33           | 180                                              | 128,50                          | 51,50               |
| NO.40                                                    | 10 – 20                                              | 13           | 240                                              | 120,5                           | 119,50              |
| NO.80                                                    | 7 – 14                                               | 10           | 36                                               | 17,50                           | 18,50               |
| NO.200                                                   | 3 – 8                                                | 6            | 48                                               | 26,50                           | 21,50               |
| pan                                                      |                                                      |              | 72                                               | 32,63                           | 39,37               |
|                                                          |                                                      |              | 1200 gr.                                         | 597,88 gr                       | 602,12              |
| Karışımındaki Toplam Bitüm (Optimum Bitüm Yüzdesi %5,10) |                                                      |              |                                                  |                                 | 61,20 gr.           |
| Toplam Asfalt (agrega 1200+ bitüm 61,20)                 |                                                      |              |                                                  |                                 | 1261,2 gr.          |
| %50 RAP                                                  |                                                      |              |                                                  |                                 | 630,60 gr.          |
| Bitüm RAP Malzemesi içindeki (%4,82)                     |                                                      |              |                                                  |                                 | 30,39 gr.           |
| Karışıma eklenecek yeni bitüm                            |                                                      |              |                                                  |                                 | 30,81 gr.           |

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fadhil AL-ALI

Doğum Yeri ve Yılı : Irak, Babil, 1979

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : [alalifadil@gmail.com](mailto:alalifadil@gmail.com)

### Eğitim Durumu

Lise : Hilla Profesyonel Lisesi, 1998

Lisans : Babil Üniversitesi, İnşaat Mühendislik Fakültesi

### Mesleki Deneyim

Üniversite öğrenimini tamamladıktan sonra Babil Belediyeleri Müdürlüğü'nde meslek hayatına başladı. 2003 – 2013 yılları arasında Babil Belediyeleri Müdürlüğü'ne bağlı çeşitli bölgelerde Üstyapı Mühendisi olarak çalıştı.