

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPILARINDA  
SÖNMÜŞ KİREÇ KATKISININ  
DÜŞÜK SICAKLIK ÇATLAMA DİRENCİNE ETKİSİ

İnş. Müh. Musa SEÇGİNLI

FBE İnşaat Anabilim Dalı Ulaştırma Programında  
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Öğr. Gör. Dr. Mustafa Sinan YARDIM

İstanbul, 2007

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                 | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------|
| SİMGE LİSTESİ .....                                                             | vi    |
| KISALTMA LİSTESİ.....                                                           | viii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                              | ix    |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                            | xi    |
| ÖNSÖZ .....                                                                     | xii   |
| ÖZET .....                                                                      | xiii  |
| ABSTRACT .....                                                                  | xiv   |
| 1 GİRİŞ .....                                                                   | 1     |
| 1.1 Çalışmanın Amacı .....                                                      | 2     |
| 1.2 Çalışmada İzlenen Yöntem.....                                               | 2     |
| 2 KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPISI VE ÖZELLİKLERİ .....                                 | 5     |
| 2.1 Karayolu Üstyapısı.....                                                     | 5     |
| 2.1.1 Kaplama Tabakası .....                                                    | 5     |
| 2.1.2 Temel Tabakası .....                                                      | 6     |
| 2.1.3 Alttemel Tabakası .....                                                   | 6     |
| 2.2 Karayolu Üstyapısına Gelen Etkiler.....                                     | 6     |
| 2.2.1 Trafik Etkileri .....                                                     | 6     |
| 2.2.2 İklim Etkileri.....                                                       | 6     |
| 2.3 Karayolu Esnek Üstyapısından Beklenen Fiziksel ve Mekanik Özellikler.....   | 7     |
| 2.3.1 Stabilité .....                                                           | 7     |
| 2.3.2 Durabilite (Dayanıklılık).....                                            | 8     |
| 2.3.3 Geçirimsizlik .....                                                       | 9     |
| 2.3.4 İşlenebilirlik.....                                                       | 9     |
| 2.3.5 Esneklik.....                                                             | 10    |
| 2.3.6 Yorulmaya Karşı Direnç.....                                               | 10    |
| 2.3.7 Kayma Direnci.....                                                        | 11    |
| 3 KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPISINDA KULLANILAN MALZEMELER ...                         | 12    |
| 3.1 Agregalar .....                                                             | 12    |
| 3.1.1 Agregatıpleri .....                                                       | 12    |
| 3.1.2 Agregatıgradasyonu.....                                                   | 12    |
| 3.1.2.1 Gradasyon Tıpleri.....                                                  | 13    |
| 3.1.3 Bitümlü Kaplamalarda Kullanılan Agregatı.....                             | 14    |
| 3.1.3.1 Agregatıkarışımlarında Kullanılan Mineral Filler Malzeme ve Önemi ..... | 14    |
| 3.1.4 Agregalara Uygulanan Deneyler.....                                        | 15    |
| 3.1.4.1 Elek Analizi .....                                                      | 16    |

|         |                                                                   |    |
|---------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.4.2 | Aşınma (Los Angeles) Deneyi .....                                 | 17 |
| 3.1.4.3 | Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (Dona Dayanım) Deneyi .....   | 18 |
| 3.1.4.4 | Cilalanma Deneyi .....                                            | 20 |
| 3.1.4.5 | Su Etkilerine Karşı Dayanıklılık (Nicholson Yöntemi) Deneyi ..... | 21 |
| 3.1.4.6 | Yassılık İndeksi Deneyi .....                                     | 22 |
| 3.1.4.7 | Birim Hacim Ağırlık Deneyi .....                                  | 23 |
| 3.1.4.8 | Özgül Ağırlık ve Su Emme (Absorbsiyon) Deneyi .....               | 23 |
| 3.2     | Bitümlü Bağlayıcılar .....                                        | 25 |
| 3.2.1   | Bitümlü Bağlayıcı Tipleri .....                                   | 26 |
| 3.2.1.1 | Asfalt .....                                                      | 26 |
| 3.2.1.2 | Katran .....                                                      | 28 |
| 3.2.2   | Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler .....                    | 28 |
| 3.2.2.1 | Penetrasyon Deneyi .....                                          | 28 |
| 3.2.2.2 | Düktilite Deneyi .....                                            | 29 |
| 3.2.2.3 | Yumuşama Noktası Deneyi .....                                     | 30 |
| 3.2.2.4 | Viskozite Deneyi .....                                            | 32 |
| 3.2.2.5 | Parlama ve Yanma Noktası Deneyi .....                             | 33 |
| 3.2.2.6 | İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi .....                       | 34 |
| 3.2.2.7 | Özgül Ağırlık Deneyi .....                                        | 35 |
| 3.3     | Kireç ve Kireç Katkısının Sıcak Asfalt Karışımına Etkisi .....    | 37 |
| 3.3.1   | Kirecin Yapısı ve Kullanıldığı Yerler .....                       | 38 |
| 3.3.2   | Sönmüş Kireç Katkısının Sıcak Asfalt Karışımına Etkisi .....      | 40 |
| 3.3.3   | Sönmüş Kirecin Sıcak Karışımlara Katılma Teknikleri .....         | 41 |
| 3.3.3.1 | Kuru Yöntem .....                                                 | 41 |
| 3.3.3.2 | Nemli Agregaya Uygulanma Yöntemi .....                            | 41 |
| 3.3.3.3 | Slurry (Bulamaç)Yöntemi .....                                     | 42 |
| 4       | KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPISINDA OLUŞAN BOZULMALAR .....               | 43 |
| 4.1     | Yol Üstyapısında Oluşan Bozulma Tipleri .....                     | 44 |
| 4.1.1   | Şekil Değiştirme .....                                            | 44 |
| 4.1.1.1 | Oturmalar .....                                                   | 45 |
| 4.1.1.2 | Yerel Çökmeler .....                                              | 45 |
| 4.1.1.3 | Tekerlek İzi Oluşması .....                                       | 46 |
| 4.1.1.4 | Ondülasyonlar .....                                               | 47 |
| 4.1.1.5 | Kabarmalar .....                                                  | 47 |
| 4.1.1.6 | Yığılmalar .....                                                  | 48 |
| 4.1.2   | Çatlamalar .....                                                  | 48 |
| 4.1.2.1 | Timsah Sırtı Çatlakları .....                                     | 49 |
| 4.1.2.2 | Yorulma Çatlakları .....                                          | 49 |
| 4.1.2.3 | Kenar Çatlakları .....                                            | 50 |
| 4.1.2.4 | Derz Çatlakları .....                                             | 50 |
| 4.1.2.5 | Enine Çatlaklar .....                                             | 51 |
| 4.1.2.6 | Yansıma Çatlakları .....                                          | 51 |
| 4.1.3   | Ayrışmalar .....                                                  | 52 |
| 4.1.3.1 | Oyuklar .....                                                     | 53 |
| 4.1.3.2 | Sökülmeler .....                                                  | 53 |
| 4.1.3.3 | Soyulma .....                                                     | 54 |
| 4.1.4   | Kayma Direnci Kaybı .....                                         | 54 |
| 4.1.4.1 | Cilalanma .....                                                   | 54 |
| 4.1.4.2 | Kusma .....                                                       | 55 |

|         |                                                                                  |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2     | Üstyapıda Oluşan Bozulmalara Karşı Kullanılan Katkı Malzemeleri.....             | 56 |
| 5       | DÜŞÜK SICAKLIK ÇATLAKLARI.....                                                   | 58 |
| 5.1     | Asfalt Kaplamalarda Düşük Sıcaklık Çatlak Oluşumunu Etkileyen Faktörler ...      | 60 |
| 5.1.1   | Kaplamanın Yaşlanması .....                                                      | 62 |
| 5.1.2   | Malzeme.....                                                                     | 62 |
| 5.1.2.1 | Bitümlü Bağlayıcı .....                                                          | 63 |
| 5.1.2.2 | Agrega Tipi.....                                                                 | 64 |
| 5.1.2.3 | Bitümlü Karışım Bileşimi.....                                                    | 64 |
| 5.1.2.4 | Bitümlü Karışım Özellikleri .....                                                | 65 |
| 5.1.2.5 | Modifiye Bitümlü Bağlayıcı ve Modifiye Bitümlü Karışım .....                     | 65 |
| 5.1.3   | Çevresel Faktörler .....                                                         | 68 |
| 5.1.3.1 | Sıcaklık .....                                                                   | 68 |
| 5.1.3.2 | Soğuma Hızı .....                                                                | 69 |
| 5.1.4   | Üstyapı Faktörleri.....                                                          | 71 |
| 5.1.4.1 | Kaplamanın Genişliği .....                                                       | 71 |
| 5.1.4.2 | Kaplama Kalınlığı .....                                                          | 71 |
| 5.1.4.3 | Bitümlü Kaplama Tabakası ile Altındaki Tabaka Arasındaki Arayüzey Koşulları..... | 71 |
| 5.1.4.4 | Taban Zemini Cinsi.....                                                          | 72 |
| 5.1.5   | Diğer Faktörler .....                                                            | 72 |
| 5.1.5.1 | Yapım Etkileri (Kusurları).....                                                  | 72 |
| 5.1.5.2 | Trafik Etkileri .....                                                            | 72 |
| 5.2     | Düşük Sıcaklık Çatlak Modelleri .....                                            | 72 |
| 5.2.1   | Deneysel Tabanlı Düşük Sıcaklık Çatlak Modelleri.....                            | 74 |
| 5.2.1.1 | Fromm ve Phang'ın Deneysel Modeli .....                                          | 74 |
| 5.2.1.2 | Genel Model .....                                                                | 76 |
| 5.2.1.3 | Kuzey Modeli .....                                                               | 76 |
| 5.2.1.4 | Güney Modeli.....                                                                | 77 |
| 5.2.2   | Mekanik Tabanlı Termal Çatlak Modelleri .....                                    | 77 |
| 5.2.2.1 | Hills ve Brien - Çatlak Sıcaklık Tahmini.....                                    | 78 |
| 5.2.2.2 | Christison, Murray ve Anderson -Termal Gerilim Tahmini.....                      | 79 |
| 5.2.2.3 | Bilgisayar Programı COLD .....                                                   | 79 |
| 6       | ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ .....                             | 81 |
| 6.1     | Agrega.....                                                                      | 82 |
| 6.1.1   | Elek Analizleri ve Gradasyon Eğrileri.....                                       | 82 |
| 6.1.2   | Agrega Özgül Ağırlıkları ve Su Absorbsiyon Değerleri .....                       | 85 |
| 6.1.3   | Agrega Karışım Dizayını .....                                                    | 86 |
| 6.2     | Bitüm.....                                                                       | 88 |
| 6.3     | Sönmüş Kireç .....                                                               | 89 |
| 7       | ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEYLER.....                                                | 91 |
| 7.1     | Marshall Stabilesi Deneyi.....                                                   | 91 |
| 7.1.1   | Agrega Karışımı Tartım Değerlerinin Belirlenmesi .....                           | 91 |
| 7.1.2   | Farklı Kireç Yüzdelere Göre Agregası Karışımlarının Hazırlanması .....           | 92 |
| 7.1.3   | Sıcak Karışımların Optimum Bitüm Muhtevası.....                                  | 92 |
| 7.1.4   | Deney Numunelerin Hazırlanması.....                                              | 92 |

|       |                                                                                                                              |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1.5 | Hazırlanan Numunelerin Yükseklik ve Hacimlerinin Belirlenmesi .....                                                          | 94  |
| 7.1.6 | Numunelerin Stabilite ve Akma Değerlerinin Tespiti .....                                                                     | 95  |
| 7.1.7 | Koşullandırılmış Numunelerin Stabilite ve Akma Değerlerinin Tespiti .....                                                    | 96  |
| 7.1.8 | Numunelerin Özgül Ağırlık ve Boşluk Oranı Değerlerinin Belirlenmesi .....                                                    | 97  |
| 7.1.9 | Deney Verilerinin Yorumlanması .....                                                                                         | 99  |
| 7.2   | Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi.....                                                                                         | 99  |
| 7.2.1 | Düşük Sıcaklıktaki (5 °C) Numuneler İçin Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi .                                                   | 100 |
| 8     | ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEYLERİN SONUÇLARI .....                                                                               | 101 |
| 8.1   | Agrega Karışımı Tartım ve Kireç Katkı Değerleri.....                                                                         | 101 |
| 8.2   | Asfalt Karışımlara Kireç Katkısının Özgül Ağırlık ve Boşluk Oranlarına Etkisinin Tespiti (Marshall Metoduyla).....           | 102 |
| 8.3   | Asfalt Karışımlarına Kireç Katkısının Akma ve Stabiliteye Etkisinin Tespiti (Marshall Metoduyla) .....                       | 104 |
| 8.4   | Oda Sıcaklığında Hazırlanan Numuneler İçin Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları .....                                    | 106 |
| 8.5   | Düşük Sıcaklıkta (5 °C) Hazırlanan Numuneler İçin Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları .....                             | 108 |
| 8.6   | Her İki Sıcaklıkta ( 5°C ve 25°C) Hazırlanan Numunelerin Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ..... | 110 |
| 9     | SONUÇ VE DEĞERLENDİRME .....                                                                                                 | 112 |
|       | KAYNAKLAR.....                                                                                                               | 116 |
|       | EKLER .....                                                                                                                  | 118 |
| Ek 1  | Dört Ayrı Tip Karışım İçin Marshall Numuneleri Deney Verilerini Gösteren Rapor.....                                          | 119 |
| Ek 2  | Dört Ayrı Tip Karışım İçin Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Verilerini Gösteren Rapor (Oda Sıcaklığındaki Numuneler İçin)..... | 120 |
| Ek 3  | Dört Ayrı Tip Karışım İçin Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Verilerini Gösteren Rapor (Düşük Sıcaklıktaki Numuneler İçin)..... | 121 |
|       | ÖZGEÇMİŞ.....                                                                                                                | 122 |

## SİMGE LİSTESİ

|                     |                                                                                                             |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A                   | Briketin havadaki ağırlığı (gr); Piknometre boş ağırlığı (gr)                                               |
| B                   | Piknometrenin suyla dolu ağırlığı (gr)                                                                      |
| C                   | İşlenmemiş agrega aşınma indeksi; Piknometre içinde kuru numuneyle birlikte ağırlığı (gr)                   |
| °C                  | Santigrat derece                                                                                            |
| CS <sub>2</sub>     | Karbondisülfür                                                                                              |
| CaCO <sub>3</sub>   | Kalsiyum karbonat                                                                                           |
| Ca(OH) <sub>2</sub> | Kalsiyum hidroksit                                                                                          |
| CaO                 | Kalsiyum oksit                                                                                              |
| CO <sub>2</sub>     | Karbondioksit                                                                                               |
| D                   | İçinde numune bulunan piknometrenin, numune üzerinde kalan kısmı suyla doldurulduktan sonraki ağırlığı (gr) |
| D <sub>t</sub>      | Teorik özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )                                                                  |
| D <sub>p</sub>      | Pratik (ölçülen) özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )                                                        |
| E                   | Sertlik                                                                                                     |
| F                   | İşlenmiş agrega aşınma oranı (%)                                                                            |
| °F                  | Fahrenhayt                                                                                                  |
| F.I.                | Donma indeksi                                                                                               |
| G <sub>sb</sub>     | Agreganın hacim özgül ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )                                                        |
| G <sub>b</sub>      | Bitümün özgül ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )                                                                |
| H <sub>2</sub> O    | Su                                                                                                          |
| I                   | Çatlama indeksi                                                                                             |
| MgCO <sub>3</sub>   | Magnezyum karbonat                                                                                          |
| n                   | Kış günleri sayısı                                                                                          |
| N <sub>f</sub>      | 150 m yolda oluşan tam çatlama sayısı                                                                       |
| N <sub>h</sub>      | 150 m yolda oluşan yarım çatlama sayısı                                                                     |
| N <sub>m</sub>      | 150 m yolda oluşan çoklu çatlama sayısı                                                                     |
| P                   | Aşınma tesir indeksi                                                                                        |
| P <sub>agrega</sub> | Numunedeki agrega miktarı (gr)                                                                              |
| P <sub>bitum</sub>  | Numunedeki bitüm miktarı (gr)                                                                               |
| P <sub>iri</sub>    | Karışım agregasındaki iri agrega ağırlığı (gr)                                                              |
| P <sub>ince</sub>   | Karışım agregasındaki ince agrega ağırlığı (gr)                                                             |
| P <sub>filler</sub> | Karışım agregasındaki filler ağırlığı (gr)                                                                  |
| RT                  | Asfalt kaplamalarda kullanılan katran                                                                       |
| R <sup>2</sup>      | Regrasyon katsayısı                                                                                         |
| S                   | Asfalt betonun aşınma oranı (%)                                                                             |
| Tav <sub>i</sub>    | i. gündeki ortalama hava sıcaklığı (°C)                                                                     |
| VFA                 | Asfaltla dolu boşluk yüzdesi                                                                                |
| VMA                 | Agrega boşluk yüzdesi                                                                                       |
| v                   | Poisson oranı                                                                                               |
| V <sub>b</sub>      | Numunedeki bitüm hacmi (cm <sup>3</sup> )                                                                   |
| V <sub>h</sub>      | Numunedeki boşluk hacmi yüzdesi                                                                             |
| W <sub>a</sub>      | Agrega ağırlığına göre bitüm yüzdesi                                                                        |
| W <sub>hava</sub>   | Numunenin havadaki ağırlığı (gr)                                                                            |
| W <sub>su</sub>     | Numunenin sudaki ağırlığı (gr)                                                                              |
| ε <sub>i</sub>      | Zorlanma (kg/cm <sup>2</sup> )                                                                              |
| σ                   | Gerilme (kg/cm <sup>2</sup> )                                                                               |

|                          |                                                          |
|--------------------------|----------------------------------------------------------|
| $\delta_{\text{agrega}}$ | Karışım agregasının özgül ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> ) |
| $\delta_{\text{bitum}}$  | Bitümün özgül ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )             |
| $\delta_{\text{iri}}$    | İri agreganın özgül ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )       |
| $\delta_{\text{ince}}$   | İnce agreganın özgül ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )      |
| $\delta_{\text{filler}}$ | Fillerin özgül ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )            |

## KISALTMA LİSTESİ

|        |                                                                           |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|
| ABD    | Amerika Birleşik Devletleri                                               |
| ABS    | Stone mastik asfalt                                                       |
| ABT    | Yoğun gradasyonlu bitümlü karışım                                         |
| AC     | Asfalt çimentosu                                                          |
| DCM    | Dolaylı çekme mukavemeti                                                  |
| DDCM   | Düşük sıcaklıktaki numuneler için dolaylı çekme mukavemeti                |
| İSFALT | İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi              |
| KT     | Kireçtaşı                                                                 |
| MRL    | Matarial Reference Library                                                |
| RC     | Köşeli, yüzey yapısı pürüzlü, emme kabiliyeti yüksek kalker taşı          |
| RPI    | Köşeli, yüzey yapısı pürüzsüz, yüksek oranda silisyum oksit içeren agrega |
| TSRST  | Thermal stress restrained speciman test                                   |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                                 | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1 Çalışmanın akış şeması .....                                                                                                          | 4     |
| Şekil 2.1 Karayolu tabakaları .....                                                                                                             | 5     |
| Şekil 3.1. Agrega gradasyonları için kullanılan elek boyutları .....                                                                            | 12    |
| Şekil 3.2 Agrega gradasyon tipleri ve dağılımları.....                                                                                          | 14    |
| Şekil 3.3 Elek analizi deneyi için kullanılan standart elek serisi .....                                                                        | 16    |
| Şekil 3.4 Los Angeles aşındırma makinesi .....                                                                                                  | 17    |
| Şekil 3.5 Cilalanma deney düzeneğinin şematik gösterimi .....                                                                                   | 20    |
| Şekil 3.6 Kayma direnci ölçme cihazı.....                                                                                                       | 21    |
| Şekil 3.7 Yassılık indeksi eleği.....                                                                                                           | 23    |
| Şekil 3.8. Özgül ağırlık tespiti için kullanılan piknometre .....                                                                               | 24    |
| Şekil 3.9 Asfalt emülsiyonu imalatı teorik şeması.....                                                                                          | 27    |
| Şekil 3.10 Asfalt emülsiyonları için kesilme mekanizması.....                                                                                   | 27    |
| Şekil 3.11 Penetrasyon deney düzeneği.....                                                                                                      | 28    |
| Şekil 3.12 Düktilite deney düzeneğinde kullanılan pirinç kalıplar .....                                                                         | 30    |
| Şekil 3.13 Düktilite deney düzeneği ve deneyin uygulanması.....                                                                                 | 30    |
| Şekil 3.14 Halka içinde hazırlanmış olan deney numuneleri.....                                                                                  | 31    |
| Şekil 3.15 Yumuşama noktası için halka tutucu ve deney düzeneğinin şematik gösterimi ....                                                       | 32    |
| Şekil 3.16 Viskozite deney düzeneği .....                                                                                                       | 34    |
| Şekil 3.17 Cleveland açık kap cihazı .....                                                                                                      | 34    |
| Şekil 3.18 İnce film halinde ısıtma deney aleti .....                                                                                           | 35    |
| Şekil 3.19 Bağlayıcı özgül ağırlığının piknometre ile tespit .....                                                                              | 36    |
| Şekil 4.1 Tekerlek izi oluşması.....                                                                                                            | 46    |
| Şekil 4.2 Kabarmalar.....                                                                                                                       | 48    |
| Şekil 4.3 Yığılmalar .....                                                                                                                      | 48    |
| Şekil 4.4 Timsah sırtı çatlakları.....                                                                                                          | 49    |
| Şekil 4.5 Yorulma çatlakları .....                                                                                                              | 50    |
| Şekil 4.6 Kenar çatlakları.....                                                                                                                 | 50    |
| Şekil 4.7 Derz çatlakları.....                                                                                                                  | 51    |
| Şekil 4.8 Enine çatlaklar .....                                                                                                                 | 51    |
| Şekil 4.9 Yansıma çatlakları .....                                                                                                              | 52    |
| Şekil 4.10 Oyuklar .....                                                                                                                        | 53    |
| Şekil 4.11 Sökülmeler.....                                                                                                                      | 54    |
| Şekil 4.12 Soyulma .....                                                                                                                        | 54    |
| Şekil 4.13 Cilalanma .....                                                                                                                      | 55    |
| Şekil 4.14 Kuma .....                                                                                                                           | 56    |
| Şekil 5.1 Düşük sıcaklık çatlakları.....                                                                                                        | 58    |
| Şekil 5.2 Düşük sıcaklık çatlaklarının oluşumu .....                                                                                            | 59    |
| Şekil 5.3 Sıcaklığın fonksiyonu olarak tabaka içerisinde ortaya çıkan çekme gerilmesi ve kaplamanın çekme dayanımı.....                         | 59    |
| Şekil 5.4 Düşük sıcaklık çatlak planı .....                                                                                                     | 60    |
| Şekil 5.5 Düşük sıcaklık çatlaklarının yol yüzeyinde oluşma aralıkları.....                                                                     | 60    |
| Şekil 5.6 Aynı kaynaktan sağlanmış farklı penetrasyon derecelerine sahip bitümlü bağlayıcılarla yapılmış karışımların kırılma sıcaklıkları..... | 63    |
| Şekil 5.7 Zaman ve sıcaklığın fonksiyonu olarak sınırlandırılmış numunedeki gerilme durumu.....                                                 | 69    |
| Şekil 5.8 Değişik soğuma hızlarında oluşan termal gerilmeler.....                                                                               | 70    |
| Şekil 5.9 Soğuma hızının bitümlü karışımın kırılma sıcaklığına etkisi .....                                                                     | 71    |

|                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.10 Çatlama indeksi çatlak tanımlamaları .....                                                                                           | 74  |
| Şekil 5.11 Tahmini çatlama sıcaklığı metodu.....                                                                                                | 78  |
| Şekil 5.12 Cold yapısı .....                                                                                                                    | 80  |
| Şekil 5.13 Sıcaklıkla gerilme mukavemetini değişmesi .....                                                                                      | 81  |
| Şekil 6.1 No.1 (1/2" - no.4 ) agrega için gradasyon eğrisi.....                                                                                 | 83  |
| Şekil 6.2 No.2 (3/4" - 1/2" ) agrega için gradasyon eğrisi.....                                                                                 | 84  |
| Şekil 6.3 Taş tozu (no.4 - 0,00 ) agrega için gradasyon eğrisi .....                                                                            | 85  |
| Şekil 6.4 Agrega karışımı için gradasyon eğrisi ve şartname eğrileri ile kıyaslama .....                                                        | 88  |
| Şekil 6.5 Çalışmada kullanılan ac 60/70 bağlayıcı.....                                                                                          | 88  |
| Şekil 7.1 Marshall briketleri için hazırlanan 1150 gramlık agrega karışım numuneleri.....                                                       | 92  |
| Şekil 7.2 Değişik kireç yüzdelere göre karışımların hazırlanması.....                                                                           | 93  |
| Şekil 7.3 Marshall numune kalıpları .....                                                                                                       | 94  |
| Şekil 7.4 Marshall tokmağı.....                                                                                                                 | 94  |
| Şekil 7.5 Briketlerin yükseklik ölçümü, havada ve suda tartımları .....                                                                         | 95  |
| Şekil 7.6 Marshall yükleme cihazı .....                                                                                                         | 95  |
| Şekil 7.7 Marshall numunelerinin su banyosunda koşullandırılması.....                                                                           | 97  |
| Şekil 7.8 Dolaylı çekme mukavemeti deneyinin uygulandığı marshall numunesi .....                                                                | 99  |
| Şekil 8.1 Kireç katkı oranları- pratik özgül ağırlık ilişkisi .....                                                                             | 103 |
| Şekil 8.2 Kireç katkı oranları- briket ve agrega karışımı boşluk oranları ilişkisi .....                                                        | 103 |
| Şekil 8.3 Kireç katkı oranları- akma ilişkisi .....                                                                                             | 105 |
| Şekil 8.4 Kireç katkı oranları- stabilite ilişkisi.....                                                                                         | 105 |
| Şekil 8.5 Kireç katkı oranları- dolaylı çekme mukavemeti ilişkisi .....                                                                         | 107 |
| Şekil 8.6 Kireç katkı oranları-koşullu ve koşulsuz numunelerin dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin oranları ilişkisi .....                    | 107 |
| Şekil 8.7 Düşük sıcaklıktaki numuneler için kireç katkı oranları- dolaylı çekme mukavemeti ilişkisi.....                                        | 109 |
| Şekil 8.8 Kireç katkı oranları- düşük sıcaklıktaki koşullu ve koşulsuz numunelerin dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin oranları ilişkisi..... | 109 |
| Şekil 8.9 Kireç katkı oranları – koşulsuz kireç katkılı numunelerin kireç katkısız numunelere göre mukavemet artış oranları.....                | 111 |
| Şekil 8.10 Kireç katkı oranları - koşullandırılmış kireç katkılı numunelerin kireç katkısız numunelere göre mukavemet artış oranları.....       | 111 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                                                                                        | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1 Düşük stabilitenin sebepleri ve sonuçları .....                                                                            | 8     |
| Çizelge 2.2 Düşük durabilitenin sebepleri ve sonuçları.....                                                                            | 8     |
| Çizelge 2.3 Geçirgenliğin sebepleri ve sonuçları.....                                                                                  | 9     |
| Çizelge 2.4 Düşük işlenebilirliğin sebepleri ve sonuçları.....                                                                         | 10    |
| Çizelge 2.5 Düşük yorulma direncinin sebepleri ve sonuçları .....                                                                      | 11    |
| Çizelge 3.1 Aşınma deneyi için gerekli deney numune tipleri ve miktarları .....                                                        | 17    |
| Çizelge 3.2 Aşınma deneyi için tabakalardaki sınır değerler .....                                                                      | 18    |
| Çizelge 3.3 Donma deneyi için dane boyutu sınır değerleri ve ağırlıkları .....                                                         | 19    |
| Çizelge 3.4 Dona dayanım deneyi için tabakalardaki sınır değerler.....                                                                 | 19    |
| Çizelge 3.5 Yassılık indeksi tayini için alınacak minimum numune miktarları .....                                                      | 22    |
| Çizelge 3.6 Bitümün kimyasal kompozisyonu.....                                                                                         | 25    |
| Çizelge 3.7 Geçerlilik için penetrasyon değerleri arasındaki maksimum farklar .....                                                    | 29    |
| Çizelge 3.8 Parlama noktası için basınç düzeltme değerleri .....                                                                       | 34    |
| Çizelge 3.9 Yol üst yapılarında kullanılan asfalt çimentolarının özellikleri .....                                                     | 37    |
| Çizelge 4.1 Katkı maddelerinin etki alanları .....                                                                                     | 57    |
| Çizelge 5.1 Düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörler.....                                                                       | 61    |
| Çizelge 5.2 Lineer regresyon parametreleri.....                                                                                        | 75    |
| Çizelge 6.1 No.1 (1/2" - no.4) agrega için elek analizi ve gradasyon limitleri .....                                                   | 82    |
| Çizelge 6.2 No.2 (3/4" - 1/2") agrega için elek analizi ve gradasyon limitleri .....                                                   | 83    |
| Çizelge 6.3 Taş tozu (no.4 - 0,00) agrega için elek analizi ve gradasyon limitleri.....                                                | 84    |
| Çizelge 6.4 Kaba agrega için özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu hesabı .....                                                   | 85    |
| Çizelge 6.5 İnce agrega için özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu hesabı.....                                                    | 86    |
| Çizelge 6.6 Filler malzemenin özgül ağırlık hesabı.....                                                                                | 86    |
| Çizelge 6.7 Tip-2 için karışım yüzdeleri.....                                                                                          | 86    |
| Çizelge 6.8 Değişik tipteki malzemelerin belirlenen elek analiz sonuçları.....                                                         | 87    |
| Çizelge 6.9 Hazırlanan agrega karışımı için elek analizi ve şartname değerleri.....                                                    | 87    |
| Çizelge 6.10 Çalışmada kullanılan bağlayıcının karakteristiği .....                                                                    | 89    |
| Çizelge 6.11 Çalışmada kullanılan sönmüş kirecin karakteristiği .....                                                                  | 90    |
| Çizelge 8.1 Karışım için gerekli malzeme miktarları .....                                                                              | 101   |
| Çizelge 8.2 Dört tip karışıma eklenen sönmüş kireç miktarları.....                                                                     | 101   |
| Çizelge 8.3 Hazırlanan numunelerin ortalama özgül ağırlık ve boşluk oranı deney verilerini gösteren rapor.....                         | 102   |
| Çizelge 8.4 Dört ayrı tip karışım için hesaplanan ortalama akma ve stabilite değerleri .....                                           | 104   |
| Çizelge 8.5 Oda sıcaklığında tutulan numuneler için tespit edilen ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri.....                     | 106   |
| Çizelge 8.6 Düşük sıcaklıkta hazırlanan numuneler için tespit edilen ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri.....                  | 108   |
| Çizelge 8.7 Her iki sıcaklıktaki numuneler için dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin kireç katkısız numune değerlerine oranları ..... | 110   |

## ÖNSÖZ

Dünyada en çok tercih edilen ulaşım sistemi olan karayolu yapıları, yapım ve onarım maliyetleri açısından pahalı yatırımlardır. Şüphesiz ki, Türkiye gibi sınırlı ekonomik imkanları olan ülkelerde, karayolu yatırımlarının; yapıldığı bölgenin ulaşım ihtiyaçlarını karşılamasının yanı sıra, o bölgenin trafik ve çevresel şartları göz önüne alınarak tasarlanması ve en ekonomik şekilde gerçekleştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Çevre ve iklim koşullarının, üstyapı bozukluklarının oluşumunda önemli bir etken olduğu bilinmektedir. Ayrıca, kullanıldığı bölgenin çevre ve iklim şartlarına göre tasarlanmış bir üstyapıda bozulmalar oluşmakta, bu da yolun hizmet performansını düşürmekte ve hatta ömrünü kısaltmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, günümüzde karayolu üstyapı teknolojilerinin geliştirilerek, yollarda oluşabilecek bozulmaların engellenmesi ve yol kalitesinin artırılması bir zorunluluk haline gelmiştir.

Günümüzde, üstyapıda oluşabilecek bozulmaların oluşumunun önlenmesi veya kontrol altında tutulması amacıyla, birçok asfalt katkı maddeleri (asfalt modifiye ediciler) kullanılmaktadır. Genel olarak bir asfalt modifiye edicinin kullanımı üstyapı maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle doğru yerde ve gerektiğinde asfalt modifiye edici malzeme kullanılması çok önemlidir.

Bu çalışmada; asfalt karışımında katkı malzemesi olarak kullanılan sönmüş kirecin, soğuk iklim şartlarına maruz kalan esnek üstyapıda oluşabilecek düşük sıcaklık çatlakları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma boyunca danışmanlığımı üstlenen ve her aşamada bana yol gösteren, yardım ve desteğini esirgemeyen Hocam Sayın Öğr. Gör. Dr. Mustafa Sinan YARDIM Bey ile araştırma konusunun belirlenmesinde, deneysel çalışmaların yürütülmesinde, sonuçların değerlendirilmesinde ve özgün eserin ortaya konulmasında önemli katkıları olan Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Halit ÖZEN Bey'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında yaptığım deneylerde bana gerekli her türlü yardımı sağlayan tüm Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı ve İsfalt A.Ş. Asfalt Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

18.06.2007

İnş. Müh. Musa SEÇGİNLİ

## ÖZET

Karayolu esnek üstyapılarında bozulmalar, üstyapı üzerine etkiyen trafik ve çevresel şartlara bağlı olarak oluşmaktadır. Taşıt yükleri üstyapıya sırasıyla dingiller ve dingiller vasıtasıyla tekerleklerle aktarılacak suretiyle etkimekte, bu sebeple de üstyapıda çekme ve basınç gerilmeleri meydana gelmektedir. Bunun dışında ortam sıcaklığının değişmesi de üstyapıda gerilmelere sebebiyet vermektedir.

Asfalt kaplama soğuk hava şartlarında büzölmeye çalışırken, altındaki tabaka ile ara yüzeyde oluşan sürtünme, kaplamanın büzölmesini engelleyici etki oluşturur ve bu nedenle kaplamada gerilmeler meydana gelir. Söz konusu soğuk iklim koşulları nedeniyle üstyapıda oluşan çekme gerilmeleri, çekme dayanımını aştığında kaplama üzerinde enine çatlaklar oluşur. Karayolu doğrultusuna dik olarak oluşan bu çatlaklara “düşük sıcaklık çatlakları” denir. Bu çatlaklardan sızan sular, çatlakları zamanla derinleştirmekte ve asfalt karışımının erken bozulmasına yol açarak üstyapıya büyük zararlar vermektedir.

Bu çalışmada, asfalt karışımına filler malzemesi yerine belirli oranlarda katılan sönmüş kirecin, kaplamanın düşük sıcaklık dayanımına etkisi araştırılmaktadır. Bu amaçla; kireç katkısız ve %2, %4, %6 kireç katkılı olmak üzere dört çeşit numune Marshall tasarım yöntemine göre tasarlanarak toplam 104 adet asfalt briketi üretilmiş ve hazırlanan bu numunelerin havada ve suda ağırlıkları ile yükseklikleri alınarak hacim özgül ağırlıkları ve boşluk oranı değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra üretilen numunelere (belirli aşamalardan geçirildikten sonra) Marshall stabilitesi ile dolaylı çekme mukavemeti deneyleri uygulanmıştır.

Uygulanan deneylerin sonucunda, sönmüş kireç katkısının karayolu üstyapısının soğuğa ve su etkilerine karşı direncini artırdığı tespit edilmiştir. Genel olarak suda ve düşük sıcaklıkta koşullandırılan kireç katkılı malzemelerin mukavemet değerlerinin, katkısız numune değerlerine göre yüksek çıktığı gözlenmiştir. Tasarlanan karışımlar içinde en uygun deney sonuçlarını ise %4 kireç katkılı numuneler sağlamıştır. Bu nedenle, soğuk iklim şartlarının görüldüğü bölgelerde kullanılan asfalt kaplamalara %4 oranında sönmüş kireç katılmasının oluşabilecek çatlakların engellenmesinde etkili olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar sözcükler: Karayolu esnek üstyapısı, düşük sıcaklık çatlakları, Marshall stabilitesi, dolaylı çekme mukavemeti, sönmüş kireç

## ABSTRACT

The distirctions on highway pavement occur according to the trafic and enviromental factors that effect the superstructure. Vehicle loads affect the superstructure by transferring from the axles to the wheels; and cause tension and compression stress in the superstructure. Moreover, the changes in the enviroment temperature cause stresses in the pavement.

While the asphalt pavement tries to shrink in cold air conditions; the friction between the layer under it and the mesolayer prevents it from shrinking, so stresses eventuate in the pavement. When the mentioned stresses that occur in the pavement in cold air conditions exceed the tension strength; lateral cracks generate in the pavement. The crack which form perpendicularly to the highway axis are called “low temperature cracking”. The water leaking from these crack get deeper by time; cause early damages in the asphalt mixture and compose major harm in the pavement.

In this study, the effects of adding hydrated lime in certain proportions instead of filler material on cold air resistance is analyzed. With this purpose, a total number of 104 asphalt bricets (lime free, %2, % 4, %6 lime added) were produced. The weights of these samples in air and water, the heights of the samples were measured to calculate their density and void rates. After that, Marshall stability and indirect tension strength tests were applied to the samples (after some certain stages).

As a result of the tests, the addition of hydrated lime is determined to increase the strength of the highway pavement against cold temperaturesand water effects. Generally the strength values of lime conditioned materials are to be higher than that of the lime-free materials. Among the premediated mixtures; the best experiment results were obtained with %4 lime-added samples. As a consequence; it is thought to be effective to prevent the interstitials in the highways in the cold climate conditions.

**Key Words:** Highway flexible pavement, low temperature cracking, Marshall stability test, indirect tension strength, hydrated lime

## 1 GİRİŞ

Geçmişten günümüze ulaşım sistemleri toplumların gelişiminde önemli bir paya sahip olmuştur. Günümüzde ulaşım sistemlerinin kalite özellikleri, bir toplumda ekonomik ve kültürel kalkınmışlık göstergelerinden biri olarak sunulmaktadır. Dünyada ve şüphesiz ülkemizde en çok tercih edilen ulaşım sistemi karayoludur. Ülkemizde, insan ve yük taşımacılığının çok büyük bir kısmı karayolu sistemleri tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, özellikle ağır yük taşımacılığının ve çevresel koşulların etkisiyle karayolu üstyapılarında bozulmalar meydana gelmekte ve karayollarının hizmet ömrü kısalmaktadır.

Karayolu esnek üstyapılarında bozulmalar, trafik yükleri ve iklim koşullarından kaynaklanan gerilmeler sebebiyle oluşur. Meydana gelen bu bozulmalar yolun hizmet performansı ile sürüş konforunu düşürmenin yanı sıra, can ve mal kayıplarına yol açabilmekte ve ülke ekonomisini de olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca bozulan karayolu bir müddet sonra kullanılamaz hale gelebilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, günümüzde karayolu üstyapı teknolojilerinin geliştirilerek, yollarda oluşabilecek bozulmaların engellenmesi ve yol kalitesinin artırılması bir zorunluluk haline gelmiştir.

Çevre ve iklim koşulları, üstyapı bozukluklarının analizinde dikkate alınan önemli bir konudur. Bu koşulların, üstyapının davranışını ziyadesiyle etkilediği, yapılan araştırmalar sonucunda açık bir şekilde belirlenmiştir. Yağışsız ve kurak bir bölgede, iyi sonuç veren üstyapı tipi, yağışlı bir bölgede çevre ve iklim koşullarından dolayı daha kısa bir hizmet ömrüne sahip olmaktadır. Koşullar uygun olmadığı zamanki (yağışlardan, don çözülmelerinden dolayı taban zeminlerinin suya doymun hale gelmesi gibi) trafik yükünün yola verdiği zarar, uygun koşullar altında vereceği zarardan çok daha büyüktür (Umar ve Ağıar, 1985).

Genelde uzun süre soğuk iklim koşullarına maruz kalan yollarda oluşan düşük sıcaklık çatlakları, özellikle Kanada, ABD ve İskandinav ülkelerinde sık görülen bir karayolu üstyapı bozukluğudur. Bu çatlaklar, ülkemizde daha çok, uzun süre soğuğa ve kara maruz kalan doğu bölgelerimizde görülmektedir.

Soğuk iklim koşulları nedeniyle, üstyapıda oluşan çekme gerilmeleri, çekme dayanımını aştığında kaplama üzerinde düşük sıcaklık çatlakları meydana gelir. Bu çatlaklardan sızan sular, çatlakları zamanla derinleştirmekte ve asfalt karışımının erken bozulmasına yol açarak üstyapıya büyük zararlar vermektedir. Ayrıca, çatlaklardan sızan su, altyapı malzemesinin ufalanmasına neden olarak yollarda çöküntülere de yol açabilmektedir.

### 1.1 Çalışmanın Amacı

Geçmişten günümüze düşük sıcaklık çatlakları üzerinde bir çok araştırma ve analiz yapılmış, yarım yüzyılı aşkın devam eden çalışmalara rağmen bu soruna kalıcı bir çözüm bulunamamıştır. Düşük sıcaklık çatlaklarının tam olarak anlaşılabilmesi için bir çok model oluşturulmuş, fakat bu modellerden hiçbirisi problemi tanımlamada ve çözmede tek başına yeterli olamamıştır. Bir çok çevresel ve fiziksel faktörün, düşük sıcaklık çatlaklarının oluşumunda etkili olması, bu problemin çözümünü daha da karmaşık hale getiren etkenlerden biridir.

Düşük sıcaklık çatlakları gibi agrega karışımlarında kullanılan mineral filler malzemenin, asfalt kaplamalar üzerindeki etkisi de henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Bunun nedenleri ise; bu konuda yeterli sayıda araştırma yapılmamış olması ve yapılan araştırmalarda da birbiriyle çelişkili sonuçlar ortaya çıkmasıdır. Ancak genel olarak kullanılan filler malzemesinin karışım boşluklarını doldurarak asfalt betonunun deformasyonlara karşı dayanımını artırdığı söylenebilir. Agrega karışımlarında kullanılan filler malzemenin, asfalt kaplamanın düşük sıcaklık çatlak direncini nasıl ve ne derecede etkilediği konusu ise henüz bilinmemektedir.

Bu çalışmada, yukarıda belirttiğimiz düşük sıcaklık çatlakları ve bu çatlakların oluşumunda filler malzemesinin etkisi konusunda yapılan çalışmaların yetersizliği de göz önüne alınarak; bitümlü asfalt karışımlara filler malzemesi yerine belirli oranlarda katılan sönmüş kirecin, soğuk hava koşullarına maruz kalan karayolu esnek üstyapılarda oluşabilecek düşük sıcaklık çatlaklarına etkisinin tespiti amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, kireç katkısız ile %2, %4, %6 kireç katkılı olmak üzere dört tip agrega karışımı dizayn edilmiş ve bu agrega karışımlarının her birine %4,73 oranında bitüm ilave edilerek 104 adet asfalt briketi üretilmiştir. Üretilen briketlere (belli aşamalardan geçirildikten sonra) Marshall stabilitesi ile dolaylı çekme mukavemeti deneyleri uygulanmış ve elde edilen deney sonuçları analiz edilmiştir.

### 1.2 Çalışmada İzlenen Yöntem

Bu çalışmada, yukarıda belirtilen amaca yönelik olarak Ümraniye Asfalt Fabrikasından kaba agrega, ince agrega ve taş tozu olmak üzere üç çeşit agrega malzemesi temin edilmiştir. Alınan bu malzemeler, belirli oranlarda eleklerden geçirilerek belirlenen gradasyon değerlerine uygun şekilde agrega karışımları hazırlanmıştır. Daha önce Marshall tasarım yöntemiyle asfalt karışımının optimum bitüm muhtevası belirlenmesi amacıyla İsfalt laboratuvarında yapılan deneylerin sonuçları ve bitüm yüzdesi için şartname sınırları

incelenerek, bu deneyde kullanılacak bitüm muhtevası oranı agrega karışımının %4,73`ü (54 gr) olarak belirlenmiştir.

Bu malzemelerden karışım oluşturulurken, karışımdan daha önce belirlenen oranlarda filler malzemesi eksiltiilerek, yerine aynı oranlarda sönmüş kireç katılmıştır. Son olarak, söz konusu agrega karışımlarına daha önce belirlenen oranda bitüm ilave edilerek Marshall briketleri üretilmiştir.

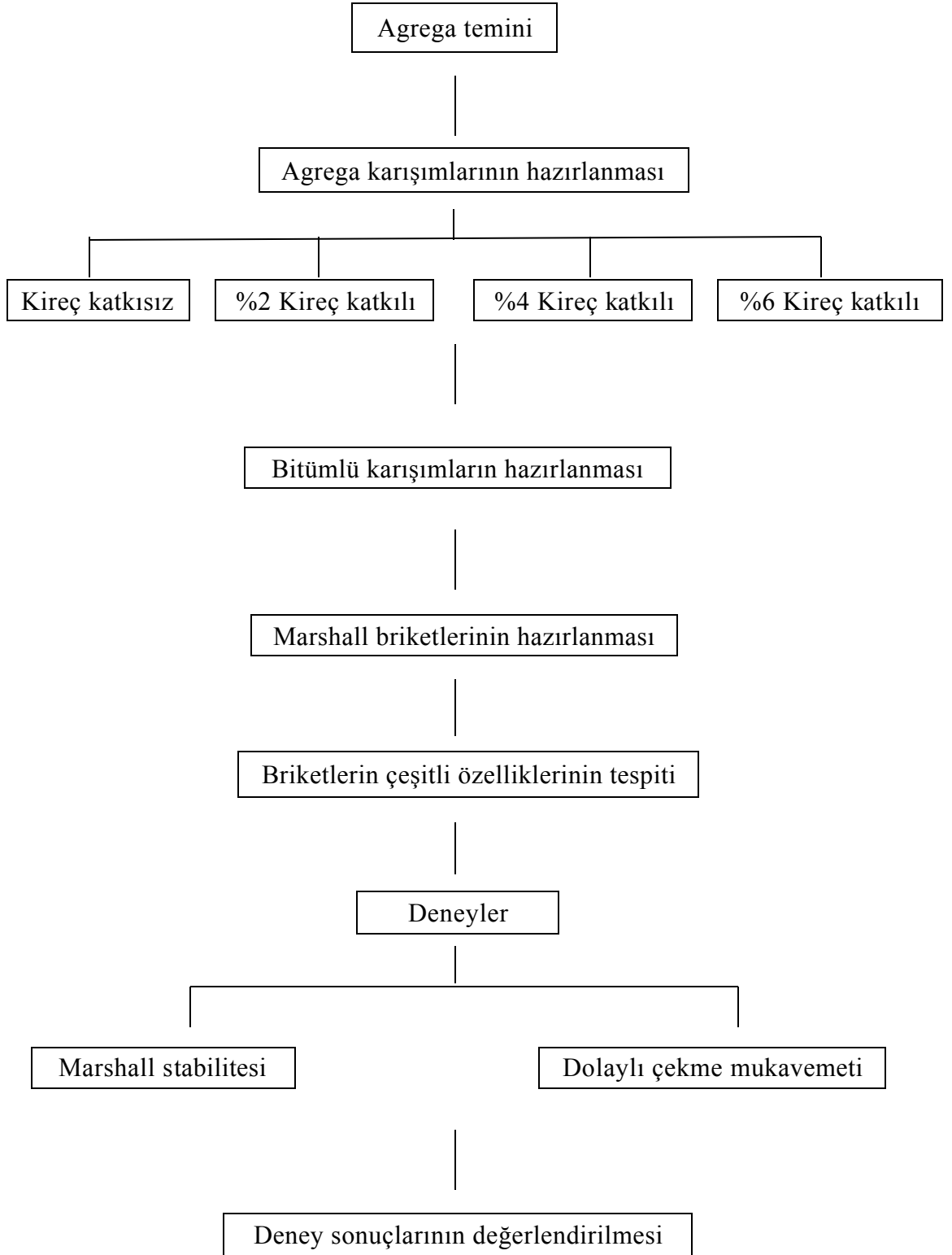
Laboratuar şartlarında dört farklı karışımda (kireç katkısız, %2, %4, %6 kireç katkılı) üretilen Marshall briketlerinin özgül ağırlık, hacim değerleri ile hava boşluk oranları tespit edilmiş ve bu değerler analiz edilmiştir. Daha sonra, yarısı 60 °C sıcaklıktaki suda koşullandırılan (suyun üstyapıya etkisinin anlaşılabilmesi için) numunelerin bir kısmı oda sıcaklığında, bir kısmı da düşük sıcaklıkta (5 °C) bir gün boyunca bekletilerek deney aşamasına geçilmiştir.

Üretilen karışımların performanslarını belirlemek amacıyla;

- Marshall Stabilitesi
- Dolaylı çekme mukavemeti

deneyleri uygulanmıştır.

Son olarak, uygulanan deneyler sonucunda dört tip karışım için stabilite, akma ve dolaylı çekme mukavemeti değerleri tespit edilmiş ve bu değerler analiz edilerek kireç katkısının düşük sıcaklık çatlama mukavemetine etkisi değerlendirilmiştir. Söz konusu çalışmaya ilişkin akış şeması Şekil 1.1`de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Çalışmanın akış şeması

## 2 KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Karayolu yapısı, önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak saptanmış olan bir güzergah boyunca, doğal zeminin istenilen yükseltilere getirilmesi ve üzerinde motorlu taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi amacıyla inşa edilen yapıların tümü olarak tanımlanabilir.

Karayolu yapısı, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Üstyapılar ise esnek ve rijit olarak ikiye ayrılırlar. Bu çalışmada karayolu esnek üstyapıları üzerinde durulacaktır.

### 2.1 Karayolu Üstyapısı

Karayolu üstyapısı, düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak, trafik yüklerini altyapının taşıyabileceği değerlere indirmek, altyapıyı dış etkenlerden korumak amacı ile altyapı üzerine inşa edilen kaplama, temel ve alttemelden oluşan tabakalı bir yol yapısıdır (Şekil 2.1) (Ilıcalı, 2001).

|          |              |
|----------|--------------|
| KAPLAMA  | Aşınma       |
|          | Binder       |
| TEMEL    | Bağlayıcılı  |
|          | Bağlayıcısız |
| ALTTEMEL | Bağlayıcısız |

Şekil 2.1 Karayolu tabakaları (Özen, 2005)

#### 2.1.1 Kaplama Tabakası

Taşıtlara uygun bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak, trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı koymak ve yapıya sızan yüzeysel su miktarlarını ve temel tabakasına iletilen kayma gerilmelerini azaltmak amacı ile temel tabakası üzerine inşa edilen bir tabakadır.

Üstyapılar bu tabakada kullanılan malzemenin özelliğine göre,

1. Esnek üstyapı (bitümlü bağlayıcı kullanılır)
2. Rijit üstyapı (bağlayıcı olarak çimento kullanılır.) adlarını alırlar (Özen, 2004).

### 2.1.2 Temel Tabakası

Kaplama ile alttemel tabakaları arasına yerleştirilen, granülometrisi ile fiziki özellikleri alttemel tabakasına göre daha iyi olan doğal kum, doğal çakıl veya kırmataş ile az miktarda ince malzemeden oluşan tabakadır. Bu tabaka kaplamadan intikal eden trafik yükünün tabana yayılmasını ve suyun uzaklaştırılmasını sağlar (Yayla, 2002).

### 2.1.3 Alttemel Tabakası

Tesviye yüzeyi üzerine serilen incesi az, kum, çakıl, taş kırığı, yüksek fırın cürufu gibi daneli malzemeden oluşan tabakadır. Kaplamadan gelen yüklerin tabana yayılmasında alttemele yardım etmekle birlikte, su ve don tesirlerine karşı da tampon vazifesi görür. aban zemininin durumuna göre, bazı hallerde bu tabakanın inşasından vazgeçilebilir (Yayla, 2002).

## 2.2 Karayolu Üstyapısına Gelen Etkiler

Karayolu üstyapısına gelen etkiler trafik ve iklim etkileri olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bu etkilerin oluşturduğu gerilmeler, karayolu üstyapısını zamanla bozar ve üstyapının performansını düşürür. İlerleyen zamanda üstyapı kullanılamaz hale gelebilir.

### 2.2.1 Trafik Etkileri

Karayolu üzerinde seyreden taşıtların ağırlıkları, dingil sayılarına göre değişen büyüklüklerde, tekerlek bandajları aracılığı ile kaplama sathına iletilmektedir. Taşıtların hızlanma ve frenleme evrelerinde, bandajla kaplama arasındaki sürtünmeye bağlı olarak oluşan yatay yükler üstyapıyı etkilemektedir. Dingil yükleri, üstyapının kalınlığının saptanmasında göz önüne alınan önemli faktörlerden biridir. Dingil yükleri arttıkça, üstyapının kalınlığının artırılması ve/veya daha kaliteli malzeme kullanılması gerekmektedir.

### 2.2.2 İklim Etkileri

Sıcaklığın düşmesi durumunda bitümlü kaplama tabakası büzülme istemekte; temel tabakası kaplama ile arasındaki sürtünmeye bağlı olarak bu hareketi önlemeye çalışmakta ve bu esnada kaplama tabakasında çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Esnek üstyapıdaki asfaltın hacimsel genleşme katsayısının, karışımın içindeki mineral agreganın hacimsel genleşme katsayısından daha büyük olması, sıcaklık düşmesiyle, agrega daneleri arasındaki asfalt filminde, çekme gerilmelerinin doğmasına neden olabilmektedir.

Sıcaklık düşüşü, zemini ve zemin suyunu etkilediğinden, zemin boşluklarındaki suyun donuncaya kadar soğumasıyla, önce buz kristalleri daha sonra buz mercikleri ve sonuçta ise

don kabarması olayı oluşmaktadır. Don kabarması nedeni ile, bitümlü kaplama tabakasında oluşan çekme gerilmeleri, kaplamanın mukavemetini aşarak çatlakların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle; üstyapının oturduğu taban zemininin, dona karşı duyarlılığı, yolun inşa edileceği bölgenin; donma indeksi, don penetrasyon derinliği ve hidrolik koşullar gibi hususlar değerlendirilerek üstyapıda dona karşı önlemin gerekli olup olmadığı araştırılmalıdır (Umar ve Ağar, 1985).

### 2.3 Karayolu Esnek Üstyapısından Beklenen Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Esnek üstyapının yukarıda belirtilen etkilere karşı uzun süre dayanabilmesi ve performansını koruyabilmesi için bazı koşulları sağlaması istenmektedir. Esnek üstyapı dizayn edilirken şu özellikler göz önüne alınır:

1. Stabilite
2. Durabilite (dayanıklılık)
3. Esneklik
4. Yorulmaya karşı direnç
5. Kaymaya karşı direnç
6. Geçirimsizlik
7. İşlenebilirlik (Önal ve Kahramangil, 1993).

#### 2.3.1 Stabilite

Stabilite, malzemenin düşey ve yatay trafik yükleri altında oluşan basınç, çekme ve kayma gerilmelerine karşı göstermiş olduğu dirençtir (İlıcılı, 2001).

Karışımın stabilitesi, agregalar arasındaki içsel sürtünmeye ve bağlayıcının kohezyonuna bağlıdır. Agregalar arasındaki içsel sürtünme; agregaların şekilleri ve yüzey dokuları ile ilgilidir. Kohezyon ise, yükleme hızı (trafik hızı) ve asfalt bağlayıcının vizkozitesi arttıkça artar; kaplamanın sıcaklığı arttıkça azalır (Asphalt Institute, 1996).

Esnek üstyapıdaki bağlayıcı miktarının artmasıyla stabilite değeri de artar; fakat bu artış devamlı olarak gerçekleşmez. Belli bir maksimum değerden sonra bağlayıcı miktarı arttıkça stabilite değeri düşüş gösterir (Çizelge 2.1).

Aşırı yüksek stabilite değerlerine sahip asfalt karışımlarında (esnek yapılarını belirli ölçülerde kaybedeceklerinden), aşırı trafik yükü altında çatlamlar meydana gelebilir. Bu nedenle, bir asfalt karışımı dizayn edilirken, tespit edilen stabilite değerlerinin o karışımın uygulanacağı yerdeki trafik ve iklim koşullarına uygun olmasına dikkat edilmelidir.

Çizelge 2.1 Düşük stabilitenin sebepleri ve sonuçları (Kurtis, 2003)

| DÜŞÜK STABİLİTE                                             |                                                     |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Sebepler                                                    | Sonuç                                               |
| Karışımda gerekenden fazla asfalt yüzdesi                   | Tekerlek izi oluşumu ve kuma                        |
| Karışımda aşırı miktarda kum yüzdesi                        | Sıkıştırma sırasında yumuşama ve sıkıştırma zorluğu |
| Yuvarlak agrega, kırılmamış ya da az kırılmış agrega yüzeyi | Tekerlek izi oluşumu                                |

### 2.3.2 Durabilite (Dayanıklılık)

Esnek üstyapının, oksidasyona ve karışımdaki agregaların parçalanmaya karşı koyabilme kabiliyetine “durabilite” adı verilir. Genellikle sıcak karışımın durabilitesi, maksimum bağlayıcı miktarı, karışımda sağlam agrega kullanmak ve karışımı maksimum geçirimsizlik sağlayacak biçimde sıkıştırmak şeklinde üç faktörle sağlanmaktadır (IDTM, 2002).

Karışımdaki bağlayıcı miktarı arttıkça durabilite artmaktadır; çünkü agregaları saran asfalt film kalınlığı ne kadar yüksek olursa, karışımın yaşlanmaya direnci o oranda artar. Böylece kaplamanın orijinal halde kalma süresi uzamaktadır. Ayrıca karışımdaki bağlayıcının miktarının artırılması sonucunda, karışımdaki hava boşlukları azalacak ve sonuçta kaplamanın içine, su ve hava girişi zorlaşacaktır (Kigguende ve Robert, 1998). Durabilitedeki düşüş çeşitli sebeplere bağlıdır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 Düşük durabilitenin sebepleri ve sonuçları (Kurtis, 2003)

| DÜŞÜK DURABİLİTE                             |                                                                                                                         |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sebepler                                     | Sonuç                                                                                                                   |
| Karışımda gerekenden az asfalt yüzdesi       | Agrega tanelerinin, yerlerinden ayrılması ile yüzeyden aşağıya doğru ve kenarlardan içe doğru gelişen bozulma (Sökülme) |
| Karışımda yüksek hava boşluğu yüzdesi        | Karışımın erken yaşlanması ve bu yüzden çatlak ve ayrılmaların oluşması.                                                |
| Karışımda, suya hassas agregaların kullanımı | Bağlayıcının, agrega yüzeyinden soyulması.                                                                              |

### 2.3.3 Geçirimsizlik

Asfalt betonunun içine, hava ve su girişine karşı koyma direncine “geçirimsizlik” denir ve karışımın içindeki hava boşluklarının oranı ile ilişkilidir. Hava boşluğu, kaplamaya su ve havanın girişine neden olsa da, bu boşlukların sayısından çok, boşlukların karakterleri, geçirimsizlik için daha önemlidir. Bu karakteristik özellikler, boşlukların boyutu, boşlukların birbiri ile bağlantı seviyeleri ve bunların kaplama yüzeyine ulaşp ulaşmadıkları olarak ifade edilebilir (Kurtis, 2003). Aşağıda geçirgenliği artıran sebepler ve sonuçları verilmiştir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3 Geçirgenliğin sebepleri ve sonuçları (Kurtis, 2003)

| GEÇİRGEN KARIŞIM                        |                                                                                             |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sebeup                                  | Sonuç                                                                                       |
| Karışımnda gerekenden az asfalt yüzdesi | Sökölme                                                                                     |
| Karışımnda yüksek hava boşluğu yüzdesi  | Su ve hava kaplamaya kolayca girerek, oksidasyona ve agregaların parçalanmasına neden olur. |
| Yetersiz sıkıştırma                     | Kaplamaya su girer ve dayanım azalır.                                                       |

### 2.3.4 İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın yerleştirilmesi ve sıkıştırılması sırasında karşılaşılan kolaylık olarak ifade edilebilir. İşlenebilirlik, karışım dizayn parametrelerinde, agregaların kökeninde ve/veya gradasyonda yapılacak değişikliklerle yükseltilebilir (Johnson, 2000).

Yüksek miktarda kaba agrega içeren sert sıcak karışımlar, taşıma sürecinde segragasyona eğilimlidirler ve bu tip karışımları sıkıştırmak oldukça zordur. Bunları işlenebilir hale getirmek amacıyla, karışıma ilave ince malzeme ve/veya bağlayıcı katılmaktadır. Elde edilen yeni karışımın da, gerekli tüm dizayn kriterlerini mutlaka sağlaması gereklidir (Gardiner & Brown, 2000). Çeşitli sebeplerle işlenebilirlik düşebilir (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4 Düşük işlenebilirliğin sebepleri ve sonuçları (Kurtis, 2003)

| DÜŞÜK İŞLENEBİLİRLİK                 |                                                                                  |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Sebepler                             | Sonuç                                                                            |
| Büyük miktarda kaba agrega           | Sıkıştırma zorluk                                                                |
| Çok düşük karışım sıcaklığı          | Kaplanmamış agregalar, durabilite eksikliği, sıkıştırmak için fazla sert karışım |
| Karışım, çok miktarda kum            | Sıkıştırma esnasında karışımın hareketi                                          |
| Karışım, az miktarda ince agrega     | Karışım çok geçirgen                                                             |
| Karışım, yüksek miktarda ince agrega | Karışım çok kuru, yetersiz durabilite                                            |

### 2.3.5 Esneklik

Bitümlü tabakaların, yolun alt tabakasındaki çökmelerden kaynaklanabilecek deformasyona çatlama karşı koyabilme yeteneğine “esneklik” adı verilir. Esnekliğin yetersizliği yolda çatlamalara neden olur. Kararlı ve esnek bir bitümlü karışımın elde edilebilmesi için, yazın kıvamını koruyabilen, kışın ise kırılma eğilimine girmeyen bir bağlayıcı gereklidir (Umar ve Ağar, 1985).

### 2.3.6 Yorulmaya Karşı Direnç

Karışımın tekrarlı dingil yüklerinden kaynaklanan tekrarlı eğilmelere, karşı koyabilme yeteneği olarak ifade edilebilir. Gereksiz sıkıştırma, gerekse dizayn hatalarından dolayı yüksek hava boşluğuna sahip kaplamaların yorulma ömürleri, bu nedenlerle şiddetle düşmektedir. Kaplamanın, yaşlanması sonucu sertleşmesi de, yorulmaya karşı dirençini azaltmaktadır (Harold vd, 1995). Aşağıda yorulmaya karşı direnci düşüren sebepler ve sonuçları verilmiştir (Çizelge 2.5).

Çizelge 2.5 Düşük Yorulma direncinin sebepleri ve sonuçları (Kurtis, 2003)

| DÜŞÜK YORULMA DİRENCİ                |                                                   |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Sebeup                               | Sonuç                                             |
| Karışımđ gerekenđ az asfalt yüzdesi  | Yorulma çatlakları                                |
| Karışımđ yüksek hava boşluğu yüzdesi | Erken yaşlanma ve buna bağılı yorulma çatlakları  |
| Yetersiz sıkıştırma                  | Erken yaşlanma ve buna bağılı yorulma çatlakları  |
| Yetersiz üstyapı kalınlığı           | Büyük eğilmeler ve buna bağılı yorulma çatlakları |

### 2.3.7 Kayma Direnci

Asfalt karışımın, tekerlekle yol yüzeyi arasında oluşan sürtünme direnimine “kayma direnci” adı verilir (İlcalı, 2001).

Bitüm muhtevası açısından zengin karışımlarda ileriki zamanda, kasma meydana gelme ihtimali olduğundan kayma direnci düşebilir. Bu durum trafikte güvenlik açısından sakıncalar doğurabilir.

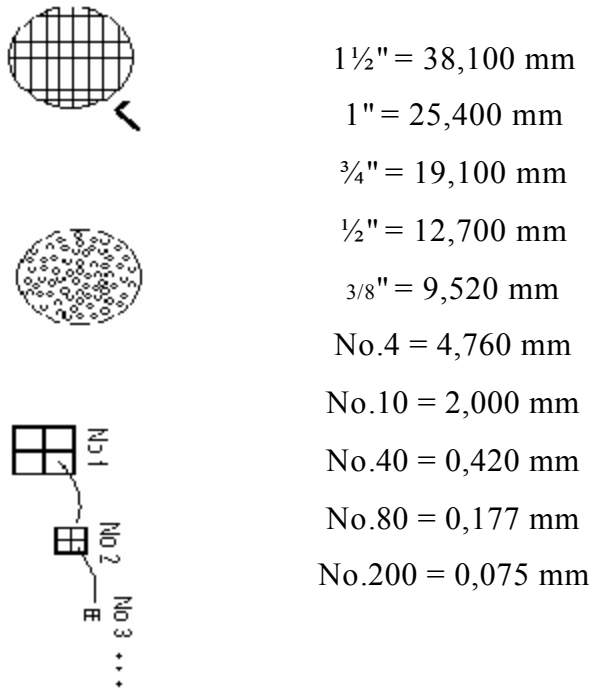
### 3 KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPISINDA KULLANILAN MALZEMELER

#### 3.1 Agregalar

Üstyapının gerek ağırlıkça gerek hacimce önemli bir kısmını teşkil eden agreg, yol yapımında kullanılan ana malzeme olmakla birlikte, yola etkiyen yüklerin meydana getirdiği gerilmelerin taşınmasında önemli rol almaktadır. Bu yüzden yolların projelendirilmesi safhalarında istenilen verimin elde edilmesi için, yol mühendislerinin çeşitli tipteki agregaların karakteristiklerini iyi bilmeleri gerekmektedir (İlıcılı, 2001).

##### 3.1.1 Agreg, Tipleri

Kum, kırılmış çakıl, kırılmamış çakıl, kırılmış taş, cüruf, taş tozu gibi beton, bitümlü kaplama, granüler temel ve alt temel yapımında kullanılan sert ve sağlam doğal mineral bileşiklere mineral agreg, denir. Mineral agreg,lar içinde standart eleklerden 4,76 mm. açıklığa karşılık gelen No.4 elek üzerinde kalan kısmına kaba; 4,76 mm. ile 0,075 mm. elek açıklığına karşılık gelen kısma ince; 0,075 mm boyutundaki No.200 elekten geçen agregaya ise filler denir. Aşağıda agreg, gradasyonu için kullanılan standart elek boyutları gösterilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Agreg, gradasyonları için kullanılan elek boyutları (Özen, 2004)

##### 3.1.2 Agreg, Gradasyonu

Agreg, karışımlarındaki agreg, danelerinin boyutları dikkate alınarak ve toplam ağırlığının

yüzdesi (%) olarak ifade edilen dane boyutu dağılımına gradasyon denir.

#### 3.1.2.1 Gradasyon Tipleri

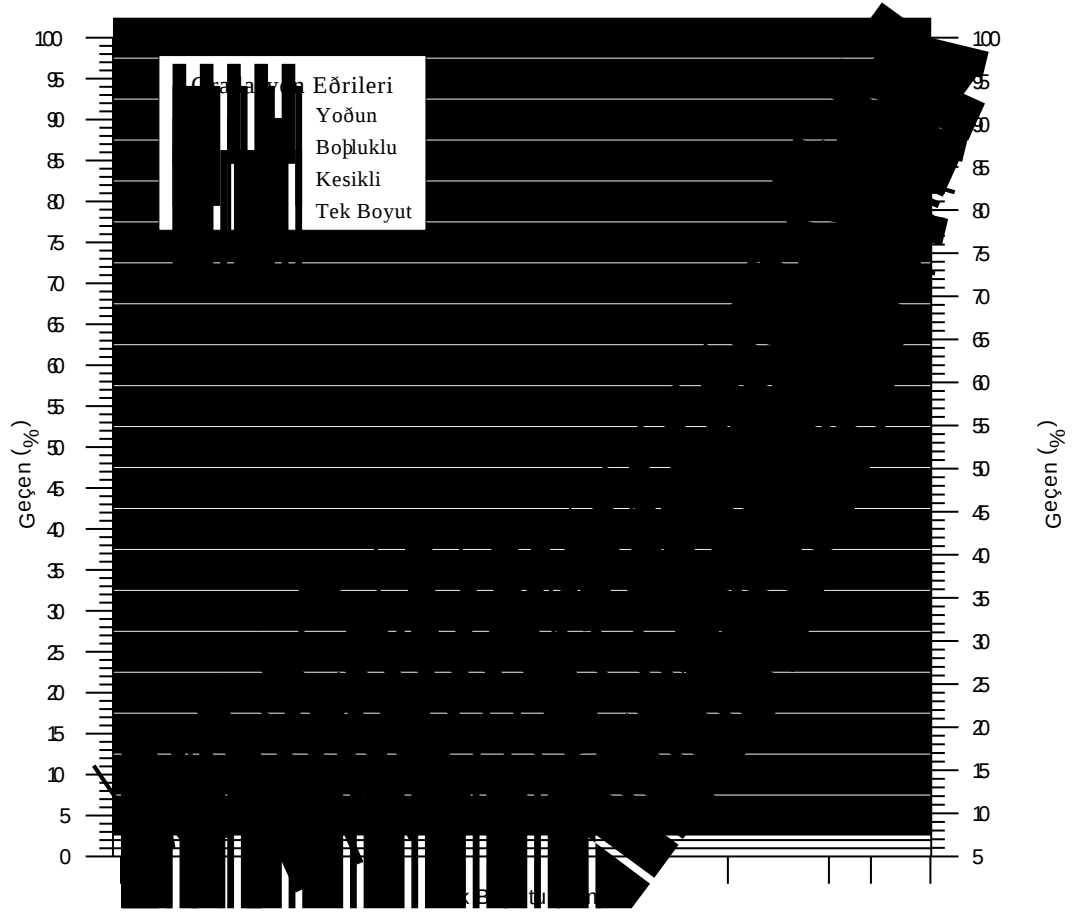
Gradasyonlarında filler veya ince agrega olmayan veya çok az olan agrega karışımları açık gradasyonlu karışımlardır. Bu tür agrega karışımları, sıkıştırıldıklarında çok yüksek hava boşluğu içerir.

Yoğun gradasyonlu agregalar ise bitümlü karışımlarda kullanıldığı zaman düşük boşluk ve yüksek stabilite veren, kaba agregadan fillere kadar her boyuttan yeterli malzeme bulunduracak şekilde gradasyona sahip agrega karışımlarıdır .

Bütün agrega danelerinin boyutlarının birbirine çok yakın olduğu agrega karışımları ise tek boyutlu gradasyona sahip karışımlar olarak nitelendirilir.

Son olarak da gradasyonunda ara boyutlardaki agrega fraksiyonlarının bulunmadığı veya çok az olduğu karışımlara ise kesikli gradasyona sahip karışımlar denir.

Bitümlü sıcak karışımın yapımında kullanılacak agregaların seçiminde, malzemenin elde edilebilirliği, maliyeti ve kalitesi dikkate alınır. Agregaların bitümlü kaplama yapımı için uygun olup olmadığı ise fiziksel özellikler ve bir dizi deneysel yöntemle çeşitli özelliklerinin ve karakteristiklerinin ortaya konması neticesinde tespit edilir. Aşağıda çeşitli gradasyon tiplerine ait gradasyon eğrileri gösterilmektedir (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2 Agrega gradasyon tipleri ve dağılımları (Özen, 2004).

### 3.1.3 Bitümlü Kaplamalarda Kullanılan Agrega

Bitümlü kaplamalarda kullanılacak agreganın kökeni ne olursa olsun, her kaplama tipi için şartnamelerde verilen fiziksel özellikleri sağlaması gerekir. Ancak aranan bütün koşulları sağlayan bir agregayı, karayolu üstyapısında kullanılabilir. Tanıtılan üç tip malzemenin her biri, bitümlü karışımın ayrı ayrı özelliklerini kontrol eder.

Bitümlü karışımındaki iri agreganın yüzdesi % 40-50'ye çıkarılırsa, karışımın mekanik direncini arttıran bir iskelet oluşur ve karışım direncinde önemli bir artış hissedilir. İnce agreganın ise iri agreganın oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışım elde edilmesini sağlar (İlcalı, 2001).

#### 3.1.3.1 Agrega Karışımlarında Kullanılan Mineral Filler Malzeme ve Önemi

Bilindiği gibi mineral filler 0,075 mm'lik elekten geçen agreganın malzemesidir. Ancak bu koşulu sağlayan bütün malzemeler filler görevini görmez. Filler düzgün bir granülometrik bileşime sahip olmalıdır. Mineral filler bitümlü malzemeyle reaksiyona girmemelidir. Mineral filler taş tozu, mermer tozu, portland çimento, sönmüş kireç veya benzeri maddelerden oluşabilir (İlcalı, 2001).

Asfalt betonu karışımlarda mineral fillerlerin yorulma ve plastik deformasyona etkileri üzerinde, hem literatürde çok az sayıda kaynak vardır hem de asfalt konusunda çalışan bir çok kişi tarafından iyi anlaşılmamıştır. Bunun nedeni olarak filler konusunda yeterli araştırma yapılmadığı söylenebilir (Terzi, 2000).

Mineral filler, toplam agreganın çok küçük bir yüzdesini oluşturduğu halde, karışımın özelliklerinin düzenlenmesinde önemli rol oynar. Filler, bitümlü karışımlarda ince agrega oranını artırmak, boşluk miktarını azaltmak ve yüksek sıcaklıklarda asfalt betonunun deformasyona karşı dayanımını artırmak için kullanılır. Filler genellikle bitümlü karışım içinde % 3 ile % 9 oranları arasında kullanılır. Belli bir orana kadar filler, boşlukları doldurduğu için, ince agrega gradasyonunu değiştirir ve böylece agrega tanecikleri arasında daha fazla temas noktası sağlayarak, daha yoğun karışımların elde edilmesinde rol oynar. Bunun yanı sıra, bitüm ile birlikte ince agregaya karşı kayganlaştırma ve bağlayıcı etkisi göstererek harç elde etmeyi sağlar.

Mineral fillerlerin asfalt yol karışımlar, üzerine etkisi şöylece özetlenebilir:

1. Farklı mineral fillerler, asfalt çimentosuna eklendiğinde farklı rijitlik etkileri gösterir.
2. Zaman–sıcaklık değişim fonksiyonu, filler/asfalt oranı 1'den az olan asfalt veya mineral filler tarafından etkilenmez.
3. Karışımlara eklenen mineral filler, Marshall stabilite ve hava boşluğunu etkilemez.
4. Esneklik modülü değeri (kısa-süreli elastik tepki) mineral fillerin katılma etkisini yansıtmaz (Terzi, 2000).

### 3.1.4 Agregalara Uygulanan Deneyler

Agregaların, karayolu üstyapısında kullanılabilmesi için, aşınmaya ve donmaya karşı dirençlerinin, özgül ağırlık, su absorpsiyonu, soyulma değerlerinin, elek analizleri ve dane şekillerinin, sürtünme etkileriyle oluşacak cilalanmaya karşı dirençlerinin bilinmesi gerekmektedir. Ancak bu özelliklerin tamamının üstyapı tabakalarının tümünde bilinmesine de gerek yoktur. Örneğin, temel tabakasında kullanılacak bir agrega numunesi için cilalanma deneyi uygulanmaz.

Birçok ülkede kullanılan fiziksel deneyler, yol agregalarının özellikleri hakkında sayısal bilgiler vermektedir. Yukarıda adı geçen tüm deneylerin güvenilir olması için denenecek numunenin özenli bir şekilde alınmış temsili numune olması gerekir. Aksi durumda, o numune için yanlış değerler bulunacaktır (İlıcılı, 2001).

#### 3.1.4.1 Elek Analizi

Bu deney yöntemi, standartlarda nitelikleri verilmiş olan elekleri kullanarak agreganın dane büyüklüğünün dağılımının saptanmasını amaçlar (Şekil3.3).

Eleme işlemi elle ya da eleme makinesiyle yapılır. Elek serisi içindeki elek sayısı ve numaraları, malzeme hakkında yeterli bilgiyi verecek sayıda olmalıdır. Örneğin bir bitümlü kaplamada kullanılacak agreganın elek analizi için genellikle 25,00 mm`den, 0,075 mm`ye yani No.200 eleğe kadar olan elekler kullanılır. Eleklerde eleme sathı kare gözlü tel elek kafeslerdir (Ilıcalı, 2001).



Şekil 3.3 Elek Analizi deneyi için kullanılan standart elek serisi

Elek analizine girecek numune miktarı, kullanılacak en büyük dane boyutuna göre seçilir. Numuneler elekler üzerinde en az 2 dakika sarsıldıktan sonra her bir elek üzerinde kalan ve eleği geçen agrega ağırlıkları % 0,1 duyarlılıkla saptanır. Bu ağırlıkların toplamı ile yükleme miktarı arasında % 2,0`dan fazla fark oluşur ise deney tekrarlanır. Elek analizi deneyinde, eleğin fazla yüklenmesi önemli yanlışlara neden olduğu için elekler üzerindeki numune ağırlıkları ve dane boyutları sınırlandırılmıştır. Deney, kullanılan elek serisi içindeki her bir elekten geçen miktarın, toplam numune ağırlığının yüzdesi olarak hesaplanıp grafik olarak gösterilmesiyle tamamlanır (Ilıcalı, 2001).

### 3.1.4.2 Aşınma (Los Angeles) Deneyi

Bu deney, agregaların aşınmaya karşı dayanıklılığını gösterir. Bu işlem, Los Angeles aşınma makinesi ile yapılır (Şekil 3.4). Alet iki ucu kapalı iç çapı 710 mm ve iç uzunluğu 510 mm olan içi boş çelik bir silindirden oluşur. Aşındırma sürecini kısaltmak için 46,8 mm çapında ve 390-444 gr ağırlığında dökme demir ya da çelik bilyeler kullanılır.



Şekil 3.4 Los Angeles aşındırma makinesi

Çizelge 3.1 Aşınma deneyi için gerekli deney numune tipleri ve miktarları (Ilıcalı, 2001)

| GEÇTİĞİ<br>ELEK | ÜZERİNDE<br>KALDIĞI ELEK | GRANÜLOMETRİ SINIFI |      |      |      |
|-----------------|--------------------------|---------------------|------|------|------|
|                 |                          | A                   | B    | C    | D    |
| 37,5 mm         | 25 mm                    | 1250                |      |      |      |
| 25 mm           | 19 mm                    | 1250                |      |      |      |
| 19 mm           | 12,5 mm                  | 1250                | 2500 |      |      |
| 12,5 mm         | 9,5 mm                   | 1250                | 2500 |      |      |
| 9,5 mm          | 6,3 mm                   |                     |      | 2500 |      |
| 6,3 mm          | 4,76 mm                  |                     |      | 2500 |      |
| 4,76 mm         | 2,36 mm                  |                     |      |      | 5000 |
| TOPLAM          |                          | 5000                | 5000 | 5000 | 5000 |
| KÜRE SAYISI     |                          | 12                  | 11   | 8    | 6    |

Hazırlanan deney numunesi ve aşındırıcı yükler aşındırma makinesine konur ve makinenin ağzı sıkıca kapatılır. Makine dakikada 30-33 devir hızla döndürülerek yaklaşık 500 devir sonrası makineden çıkarılır. No.12 elekten geçirilir. Elek üstünde kalan kısım yıkanır ve 110 derecede değişmez ağırlığa kadar kurutulur ve tartılır. Numunenin ilk ağırlığı cinsinden bulunan yüzde, malzemenin aşınma kaybıdır (Ilıcalı, 2001). Çeşitli kaplama türleri için aşınma kaybı sınır değerleri aşağıda verilmiştir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 Aşınma deneyi için tabakalardaki sınır değerler (Ilıcalı, 2001)

| Tabaka veya kaplama türü | Maksimum aşınma sınır değeri (%) |
|--------------------------|----------------------------------|
| Alt temel                | 50                               |
| Granüler temel           | 40                               |
| Bitümlü temel            | 35                               |
| Binder tabakası          | 35                               |
| Aşınma tabakası          | 30                               |
| Sathi kaplama            | 35                               |

#### 3.1.4.3 Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (Dona Dayanım) Deneyi

Agregaların hava etkileriyle donarak ufalanmaya karşı olan dirençleri hakkında laboratuarda kısa süre içinde karar verebilmek amacıyla uygulanan hızlandırılmış bir deneydir. Bu deneyde doygun halde sodyum sülfat ya da magnezyum sülfat çözeltisi kullanılır. Çözeltinin hazırlanması için saf ve susuz sodyum sülfat tuzu 25-30 °C'de su içinde iyice karıştırılarak yavaş yavaş çözülür. Her litre su için en az 250 gr sodyum sülfat tuzu ya da en az 750 gr kristalize sodyum sülfat tuzu katılır. Çözelti aynı şekilde magnezyum sülfat tuzu veya kristalize hali ile de hazırlanabilir.

Şartname sınırları içinde kalacak şekilde elenmiş (Çizelge 3.3) ve 110 derecede kurutulmuş olan agregalar belirli miktarlarda tel sepetler ve elekler üstüne konularak, üzeri en az 2 cm. kaplanacak biçimde sodyum sülfat ya da magnezyum sülfat çözeltisi içine daldırılır ve kabın üzeri kapatılır. Sıcaklığı 21 °C olan ortamda 16-18 saat bekletilir. Daldırma süresi sonunda agrega numunesi çözeltiden çıkarılır ve 5 dakika süzmeye bırakılır ve 110 °C etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulur. Etüvden çıkarıldıktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulur. Anlatılan işlemler zinciri 5 kez tekrarlanır. En son tekrardan sonra etüvden çıkarılan numune soğutulup, çözelti tamamen temizleninceye kadar suyla yıkanır. Daha sonra tekrar değişmez ağırlığa kadar etüvde kurutulup tartılır. Deney sonrasında her elek üzerinde kalan numune ağırlığı, ilk numune ağırlığı arasındaki fark donma kaybıdır.

Şartname sınırları içinde kalacak şekilde elenmiş (Çizelge 3.3) ve 110 derecede kurutulmuş olan agregalar belirli miktarlarda tel sepetler ve elekler üstüne konularak, üzeri en az 2 cm kaplanacak biçimde sodyum sülfat ya da magnezyum sülfat çözeltisi içine daldırılır ve kabın üzeri kapatılır. Sıcaklığı 21 °C olan ortamda 16-18 saat bekletilir. Daldırma süresi sonunda agrega numunesi çözeltiden çıkarılır ve 5 dakika süzmeye bırakılır ve 110 °C etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulur. Etüvden çıkarıldıktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar

soğutulur. Anlatılan işlemler zinciri 5 kez tekrarlanır. En son tekrardan sonra etüvden çıkarılan numune soğutulup, çözelti tamamen temizleninceye kadar suyla yıkanır. Daha sonra tekrar değişmez ağırlığa kadar etüvde kurutulup tartılır. Deney sonrasında her elek üzerinde kalan numune ağırlığı ile ilk numune ağırlığı arasındaki fark donma kaybıdır.

Çizelge 3.3 Donma deneyi için dane boyutu sınır değerleri ve ağırlıkları (İlcalı, 2001)

| Dane boyutu (mm.) |                  | Ağırlık (gr.) |
|-------------------|------------------|---------------|
| İRİ AGREGA        | 63,00-50,00      | 3000          |
|                   | 50,00-37,50      | 2000          |
|                   | 37,50-25,00      | 1000          |
|                   | 25,00-19,00      | 500           |
|                   | 19,00-12,50      | 630           |
|                   | 12,50-9,50       | 330           |
|                   | 9,50-4,75        | 300           |
| İNCE AGREGA       | 4,75-2,35        | 100           |
|                   | 2,36-1,10        | 100           |
|                   | 1,80-600 $\mu$ m | 100           |
|                   | 600-300 $\mu$ m  | 100           |

Tespit edilen kaybın ilk ağırlığa göre yüzdesi ise donma kaybı yüzdesidir. Şartnamede belirtilen dane boyutlarına göre bulunan donma kayıpları o agrega için uygulanacak özgün granülometriye çevrilir (İlcalı, 2001). Çeşitli kaplama türleri için donma kaybı sınır değerleri Çizelge 3.4`de verilmiştir.

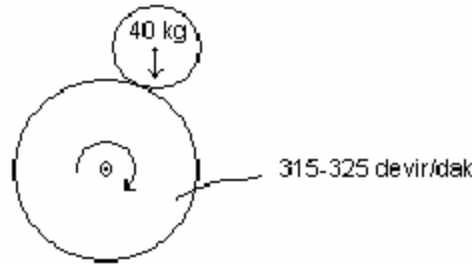
Çizelge 3.4 Dona dayanım deneyi için tabakalardaki sınır değerler (İlcalı, 2001)

| Tabaka veya kaplama türü | Maksimum kayıp sınır değeri (%) |
|--------------------------|---------------------------------|
| Alt temel                | 25                              |
| Granüler temel           | 15                              |
| Bitümlü temel            | 12                              |
| Binder tabakası          | 10                              |
| Aşınma tabakası          | 10                              |
| Sathi kaplama            | 12                              |

#### 3.1.4.4 Cilalanma Deneyi

Bu deneyin amacı, çeşitli yol agregalarının trafik altındaki sürtünme tesiriyle ne dereceye kadar cilalanacaklarını laboratuvarında kısa bir zamanda saptamaktır. Agreganın cilalanma değeriyle, kaymaya karşı olan direnci arasındaki ilişki, trafik koşulları, kaplamanın tipi gibi unsurlara bağlı olarak değişir.

Bu deneyde hızlandırılmış bir cilalanma makinesiyle kayma direncini ölçme cihazı kullanılır. Böylece yoldaki koşullara benzeyen, ancak hızlandırılmış bir cilalanma elde edilir. Hızlandırılmış cilalanma makinesi, çevresinde 14 adet numunenin yerleşebileceği, dakikada 315-325 devir hızla dönen 406 mm çapında bir demir tekerlekle, numunelerin üzerinde dönen 203 mm çapında, 50 mm genişliğinde ve numunelerin yerleştiği demir tekerleğe 40 kg yük uygulayan bir lastik tekerlekten oluşur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Cilalanma deney düzeneğinin şematik gösterimi (Özen, 2004)

Kayma direncini ölçme cihazı ise bir ucunda ağırlık olan bir pandül, bunun altında numuneye sürtünen ve belirli özellikleri bulunan lastik bir pabuç ve göstergeden oluşur (Şekil 3.6). Deney için ayrı agrega gruplarının her birinden 4 adet alınarak toplam 12 numune hazırlanır. Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak agreganın tamamı 9,5 mm elekten geçip 8 mm. elek üzerinde kalmalı, içinde yassı ve uzun daneler bulunmamalıdır. Agregalar, birer birer aralarında boşluk kalmayacak şekilde yan yana tek sıra olarak dizilir. Bir numunedeki agrega sayısı 35-50 arasında olmalı ve aralarındaki boşluk çok ince kumla doldurulmalıdır.

Hazırlanan numuneler belirli bir kür uygulandıktan sonra üzerlerine zımpara tozu ve su akıtılarak hızlandırılmış cilalanma makinesinde 6 saat süreyle cilalanmaya uğrattılır. Her numunenin deney sonucunda eriştiği cilalanma değeri, kayma direncini ölçme cihazı göstergesinden okunur. Bu işlem bir numune için 5 defa tekrarlanır ve son üç okumanın ortalaması en yakın tamsayıya yuvarlanarak alınır.

Her bir agrega grubu için hazırlanan dört numunenin değerlerinin sıralaması 5 birimden daha fazla ise deney tekrarlanır (İlcalı, 2001).



Sekil 3.6 Kayma direnci ölçme cihazı

#### 3.1.4.5 Su Etkilerine Karşı Dayanıklılık (Nicholson Yöntemi) Deneyi

Bir asfalt kaplamanın ömrü geniş ölçüde agreganın suyun etkisine karşı yapışma kabiliyetine bağlıdır. Soyulma olayı, suyun ve trafiğin bir arada etkimesiyle bağlayıcı maddenin agregadan ayrılması demektir. Deney için kırılmış agrega numunesinin 9,50-4,75 mm ya da 4,75-3,35 mm elekler arasında kalan kısmından yaklaşık 200 gr alınarak iyice yıkanıp, saf suyla birkaç defa çalkalanmasından sonra 110 °C etüvde kurutulmasıyla başlanır. Yıkanıp kurutulan agregadan yaklaşık 30 gr alınır ve 1 saat boyunca 110 °C etüvde bekletilir. Öte yandan yaklaşık 1,5 gr bitümlü malzeme 250 cm<sup>3</sup> beher içinde 110 °C kum banyosuna yerleştirilerek ısıtılır. Bitümlü malzeme eriyince etüvde ısıtılmış agrega behere dökülür ve bir cam bagetle bütün agrega tanelerinin üzeri üniform bir bitüm filmiyle kaplanıncaya kadar kum banyosunda iyice karıştırılır. Bundan sonra bitümlü agrega beher içinde kür işlemini uygulamak için 24 saat boyunca 60 °C etüvde tutulur. Bu sürenin sonunda beher etüvden çıkarılır, ve kum banyosu 100 mm. çapında petri kabına aktarılır. Kaplanmış agregaların üzeri, bagetle çok hafif darbelerle düzeltilir. Yaklaşık 10 dakika laboratuvar sıcaklığında bekletilir ve daha sonra petri kabı suyla doldurularak, üzeri cam bir kapakla kapatılır ve yeniden 24 saat bekletilmek için 60 °C etüve konur. Bu sürenin sonunda petri kabı dışarı alınarak suyu değiştirilir. Yandan gelen bir ışıkla karışımın özellikle üst yüzü gözle incelenir. Deney sonucunda tecrübe ve gözlemlerle soyulmamış sathın, bütün satha oranı soyulmaya karşı dayanıklılık olarak verilir (Ilıcalı, 2001).

#### 3.1.4.6 Yassılık İndeksi Deneyi

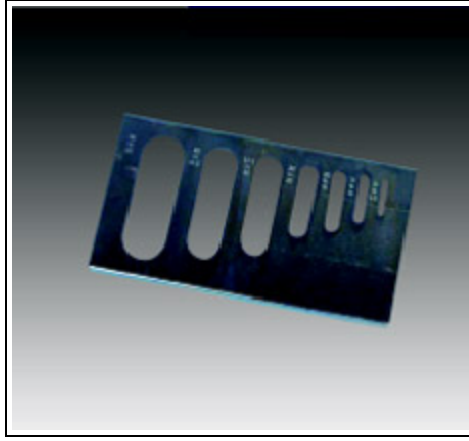
Yassı agrega, danelerinin en küçük boyutunun anma boyutuna oranının 0,6'dan küçük olması şeklinde tanımlanır. İki elek arasında kalan dane için bu iki elek boyunun aritmetik ortalaması anma boyutu olarak kabul edilir. Bir agrega numunesinin yassılık indeksi, yassı danelerin ağırlığının tüm numune ağırlığına oranı olarak bilinir. Bu deney, 63,50 mm'lik elek üzerinde kalan ve 6,35 mm'lik elekten geçen malzemeler için uygulanmaz. Aşağıda yassılık indeksi tayini için alınacak minimum numune miktarları verilmektedir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 Yassılık indeksi tayini için alınacak minimum numune miktarları (İlcalı, 2001).

| Maksimum dane boyutu (mm) | Minimum miktar (kg) |
|---------------------------|---------------------|
| 63,50                     | 25,00               |
| 50,00                     | 20,00               |
| 37,50                     | 15,00               |
| 25,00                     | 10,00               |
| 12,50                     | 5,00                |
| 9,50                      | 2,50                |
| 6,35                      | 2,00                |

Alınan numunelerin elek analizi yapılır ve her elek üzerinde kalan malzeme tartılır. Tartılan malzemelerin ağırlıklarına göre her elek arasında kalan yüzdesi bulunur.

Yassılık indeksi aleti yardımı ile her elek arasında kalan malzemenin teker teker alet üzerindeki ve ilgili dane çapına ait deliklerden geçip geçmediği kontrol edilir. Bu işlemden sonra dane kalınlığını ölçme aletinden geçen bütün malzeme tartılır. İlk malzeme miktarına oranlanarak yassılık indeksi değeri tespit edilmiş olur (İlcalı, 2001).



Şekil 3.7 Yassılık indeksi eleği

#### 3.1.4.7 Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Bu deney, agregaların sıkışık ya da gevşek birim ağırlıklarını belirleyebilmek için yapılır. Sıkışık birim hacim ağırlık ve gevşek birim hacim ağırlık deneylerinde kullanılacak numune miktarı en büyük tane boyutuna bağlı olarak değişir. Sıkışık birim hacim ağırlık tespiti için belli bir ölçü kabı, 1/3 yüksekliğine kadar birim ağırlığı istenen malzeme ile doldurulur. Sathı sert olmamak şartıyla 25 kez şişlenir. Ölçü kabı, ikinci kez 2/3 yüksekliğine kadar doldurulur ve aynı işlem yapılır. Son olarak ölçü kabı tamamı doldurulur ve aynı biçimde şişlenip üst yüzü düzeltilerek tartılır. Tartım değerinden ölçü kabı ağırlığı çıkarılır ve net agreg ağırlığı bulunur. Bu rakam ölçü kabı hacmine bölüldüğü zaman birim ağırlık elde edilmiş olur.

Aynı deney içeriğinde gevşek birim ağırlık saptaması yapmak istediğimiz zaman malzeme, ölçü kabına üst kenarından 5 cm'den fazla yükseklikte olmamak şartıyla kürekle doldurulur. Agreg a sathı, elle tesviye edilir. Sıkışık birim hacim ağırlık için yapılan hesabın aynısı uygulanır. Deney en az iki kez yinelenir. İki deney sonucu arasındaki farkın % 1,0'den az olmasına dikkat edilir. Birim hacim ağırlık deneyi, hacmi bilinen ve kolay deforme olmayan herhangi bir kap yardımıyla da yapılabilir (İlcalı, 2001).

#### 3.1.4.8 Özgül Ağırlık ve Su Emme (Absorbsiyon) Deneyi

Özgül ağırlık, belli hacimdeki numune ağırlığının, aynı hacimdeki +4 °C'deki suyun ağırlığına oranıdır. Bu deneyin genel amacı agreganın hacim-ağırlık ilişkilerini saptayabilmektir. Özgül ağırlık deneyleri ince ve iri agregalar için ayrı ayrı yapılır (Umar ve Açar, 1985).

a) İnce agreg a için deneyin yapılışı: Yıkanmış ve kurutulmuş ince malzemeden yaklaşık 500 gr numune alınır, ince agreg a özgül ağırlığı piknometresine konur ve piknometreyle birlikte tartılır. Daha sonra piknometre yarısına kadar damıtık suyla doldurulup 24 saat bekletilir. Bu

süre sonunda vakum yardımı ile piknometre içindeki hava emilir. Üst kısımda tamamen berrak su oluştuğunda, piknometre taşınmaya kadar damıtık su ile doldurulur. Kapağı, hava kabarcığı kalmayacak biçimde kapatılır ve 25 °C su banyosunda 1-1,5 saat bekletilir. Piknometre havlu ile kurutulup 0,1 gr'a duyarlı terazide tartılır. Deney, iki numune üzerinde uygulanır ve sonuçların ortalaması alınır.



Şekil 3.8 Özgül ağırlık tespiti için kullanılan piknometre

$$\text{Zahiri özgül ağırlık} = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)} \quad (3.1)$$

A: Piknometre boş ağırlığı (gr)

B: Piknometrenin suyla dolu ağırlığı (gr)

C: Piknometre içinde kuru numuneyle birlikte ağırlığı (gr)

D: İçinde numune bulunan piknometrenin, numune üzerinde kalan kısmı suyla doldurulduktan sonraki ağırlığı (gr)

İnce agreganın su emme yüzdesi, numunenin doymuş yüzey kuru durumundaki ağırlığıyla kuru ağırlığı arasındaki farkın, numunenin kuru ağırlığına bölünmesiyle bulunur. Doymuş yüzey kuru hali, gözle anlaşılmasından dolayı deneyi yapan kişinin tecrübesi ön plana çıkmaktadır. Doymuş yüzey kuru hali kesik koni yöntemi uygulanarak da tespit edilir. Kesik koni yönteminde ince agrega, konik kaba yerleştirilir ve 25 kez tokmaklanır. Kalıp, dik olarak kaldırıldığında nem fazlaysa ince agrega konik şeklini muhafaza eder. Bu durumda kurutma işlemi sürdürülür. Konikliğin serbestçe bozulması agreganın doymuş yüzey kuru hale geldiğini ifade eder ve tartıldığı zaman da doymuş yüzey kuru ağırlık tespit edilir.

b) Kaba agrega için deneyin yapılması: Malzemenin 4,00 mm'lik elek üzerinde kalan kısmından en az 2 kg alınır ve iyice yıkanır. Numunenin etüvde kurutulmuş ağırlığı, doymun yüzey kuru durumdaki ağırlığı ve sudaki ağırlığı saptanır. Son olarak kaba agreganın kuru özgül ağırlık, doymun yüzey özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık değerleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanır (İlcalı, 2001).

$$\text{Kuru özgül ağırlık} = \frac{A}{(B-C)} \quad (3.2)$$

$$\text{Doymun yüzey özgül ağırlık} = \frac{B}{(B-C)} \quad (3.3)$$

$$\text{Zahiri özgül ağırlık} = \frac{A}{(A-C)} \quad (3.4)$$

$$\text{Su emme yüzdesi} = \frac{(B-A)}{A} \quad (3.5)$$

A: Etüvde kurutulmuş ağırlık (gr)

B: Doymun yüzey kuru durumundaki ağırlık (gr)

C: Sudaki ağırlık (gr)

### 3.2 Bitümlü Bağlayıcılar

Bitüm, doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da projenik kökenli (doğal, ısı etkisiyle oluşan ergime sonucu meydana gelen) hidrokarbonların bir karışımı ya da bunların her ikisinin bir kombinasyonu olup, çoğu defa bunların gaz, sıvı, yarı-katı ya da katı halde olabilen, metal dışı türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbondisülfürde (CS<sub>2</sub>) tamamen çözülen madde olarak tanımlanır. Çizelge 3.6'da bitümü oluşturan maddeler gösterilmiştir (Umar & Ağar, 1985).

Çizelge 3.6 Bitümün kimyasal kompozisyonu

| Element  | Kütle yoğunluk yüzdesi |
|----------|------------------------|
| Karbon   | 82-88                  |
| Hidrojen | 8-11                   |
| Sülfür   | 0-6                    |
| Oksijen  | 0-1,5                  |
| Nitrojen | 0-1,0                  |

### 3.2.1 Bitümlü Bağlayıcı Tipleri

#### 3.2.1.1 Asfalt

Koyu kahverenginden siyaha kadar değişen, kuvvetli bağlayıcı özelliği olan, kıvamlılık bakımından katı, yarı-katı ya da sıvı halde olabilen, doğal halde bulunan ya da ham petrolün arıtılmasıyla elde edilen ve başlıca hidrokarbonlardan oluşan bir maddedir. Doğal ve yapay tipleri mevcuttur.

Doğal asfaltlar genelde mineral maddelerle karışmış halde bulunurlar ve kullanılabilir hale getirmek için birtakım işlemlerden geçirmek gerekir. Göl asfaltı ve kaya asfaltı örnek olarak verilebilir.

Yapay asfaltlar ise ham petrolün arıtılmasından elde edilir. Damıtma kulelerinde kolay uçucu kısımlar üst kesimden çıkarlar ve soğutucularda yoğunlaştırılarak ayrılırlar. Hafif, orta ve ağır ürünler olarak sınıflandırıldığı ve ayrıldığı zaman kule dibinde biriken kalıntı maddeleri de genel itibarıyla asfaltı oluşturur (İlcalı, 2001).

Asfalt Çimentoları: Kalıntı maddelerinin daha ileri damıtılmasından SC sınıfı yavaş kür olan, yol yağları elde edilir ve geriye asfalt çimentosu kalır. Koşulların değiştirilmesiyle, istenilen penetrasyonda asfalt çimentosu elde edilir.

Yol üstyapısında kullanılan asfalt çimentoları, özellik ve kıvam bakımından doğrudan doğruya bitümlü kaplamalarda kullanılmak için hazırlanmış petrol kökenli asfaltlardır.

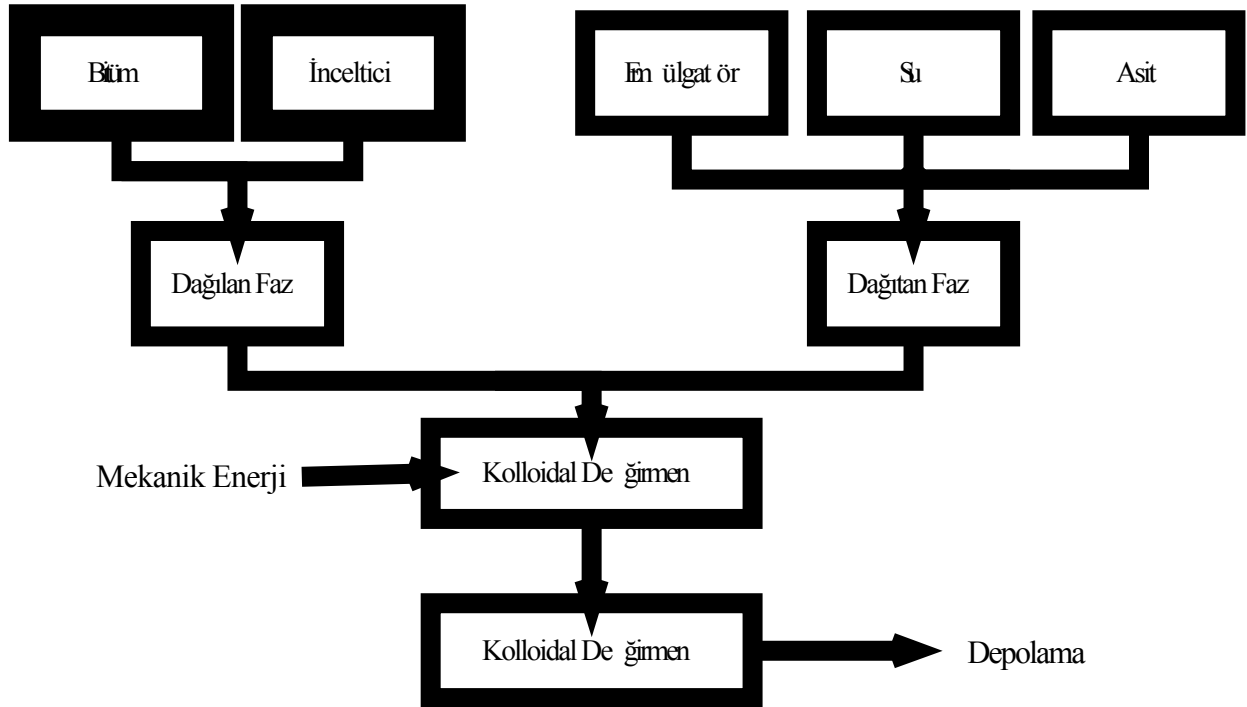
AC ile gösterilen asfalt çimentoları, kıvamlılığı gösteren ve 10-300 arasında değişen penetrasyon derecelerine göre sınıflanır (İlcalı, 2001).

Sıvı Petrol Asfaltları: Asfalt çimentosuyla, kaynama noktası düşük olan yani kolay uçan bir çözücü karıştırılması sonucu çabuk kür olan RC sıvı petrol asfaltları, orta derecede uçucu bir çözücünün karıştırılmasıyla orta hızda kür olan MC sınıfı sıvı petrol asfaltları, ağır yağlarla inceltirilerek yavaş kür olan SC sıvı petrol asfaltları elde edilir.

Sıvı petrol asfaltlar kendi aralarında kinematik viskozite değerlerine bağlı olarak çeşitli tiplere ayrılırlar. Sıvı petrol asfaltları, asfalt malzemesi ve çimentolu temel tabakalarının satırlarında kür malzemesi olarak kullanılırlar (İlcalı, 2001).

Asfalt Emülsiyonları: Emülsiyon, birbiri içinde çözünmeyen iki sıvıdan, birinin ötekisi içinde küçük küre tanecikleri halinde üniform olarak dağılmasıdır. Asfalt emülsiyonları da asfalt çimentosu küreciklerinin su içinde dağılmasından oluşur. Bu işlem mekanik olarak yapılır, ancak asfalt küreciklerinin birbirine yapışarak sudan ayrılmalarını önlemek için emülgatör

denilen katkı maddeleri kullanılır. Aşağıda asfalt emülsiyonu imalatı teorik şeması gösterilmektedir (Şekil 3.19)



Şekil 3.9 Asfalt emülsiyonu imalatı teorik şeması (Özen, 2004)

Asfalt emülsiyonları da emülgatör cinsine göre anyonik ya da katyonik asfalt emülsiyonları olarak ayrılırlar.

Bir asfalt emülsiyonu agregayla karıştırıldığı ya da bir yolun sathına püskürtüldüğü zaman emülsiyon kesilir, yani asfalt kürecikleri sıvı ortamdan ayrılarak agreganın üzerine yapışır (Şekil 3.10). Serbest kalan su ise buharlaşır. Yolda kullanılan asfalt emülsiyonları da çabuk kesilen RS, orta hızda kesilen MS ve yavaş kesilen SS asfalt emülsiyonları olarak üç tipte bulunmaktadır.

Emülsiyonların kullanımı dünya genelinde son dönemler içinde artmaktadır. Ülkemizde ise emülsiyonun tüketimi istenilen düzeye ulaşmamıştır. Asfalt emülsiyonları belli başlı olarak sathi kaplamalarda, karışım kaplamalarda, harç kaplamalarda, yama ve onarım işlerinde ve de penetrasyon makadam yol kaplamalarında kullanılmaktadır (İlıcılı, 2001).



Şekil 3.10 Asfalt emülsiyonları için kesilme mekanizması (Özen, 2004)

### 3.2.1.2 Katran

Katran, başlıca kömürün ve odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılmasından elde edilir. Bu şekilde elde edilen katrana ham katran denir. Genellikle katran, bu şekilde değil, arıtıldıktan sonra kullanılır. Yol kaplamalarında bağlayıcı olarak kullanılan katranın kömür kökenli olması tercih edilir.

RT sembolü ile gösterilen yol katranları, kıvamlılıklarına göre RT-1, RT-2, RT-3 ... RT-12 ve RTCB-5, RTCB-6 olarak toplam 14 sınıfa ayrılır. Numaralar büyüdükçe kıvamlılık artar (İlcalı, 2001).

### 3.2.2 Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler, bağlayıcının teknik şartnamelerde istenilen kurallara uygun olup olmadığının belirlenmesi için yapılır.

#### 3.2.2.1 Penetrasyon Deneyi

Bitümlü bağlayıcıların kıvamlılığı penetrasyon deneyi ile tespit edilir. Penetrasyon, standart bir iğnenin belirli yük altında, belirli süre içinde, belli sıcaklıktaki bağlayıcıya dikey doğrultuda batma uzunluğudur. Penetrasyon birimi 0,01 cm'dir ve penetrasyon cihaz göstergesindeki her taksimat 0,1 mm'ye eşittir. Şekil 3.11'de penetrasyon deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Penetrasyon deney düzeneği (Özen, 2005)

Penetrasyon deneyine tabi tutulacak numune yumuşama noktası sıcaklığını geçmeyecek kadar (max. 90 °C) ısıtılıp, kap içerisinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde iyice karıştırıldıktan sonra metal veya camdan yapılmış, dibi düz silindirik olan numune kabına doldurulur.

Numune 5-30 °C bir ortama soğumaya bırakılır. Soğutma süresi, hacmi 180 cm<sup>3</sup>'e kadar olan numunelerde derinliği 44 mm'ye kadar olanlar 60-90 dakika; derinliği 45-60 mm'ye kadar olanlar 90-120 dakika süreyle soğumaya bırakılırlar. Daha sonra numuneler aktarma kabının içine alınır ve sabit sıcaklıktaki su banyosunda 1-1,5 saat bekletilir.

İçinde numune kabı bulunan aktarma kabı penetrasyon cihazının tablası üzerine konulur. İstenilen ağırlık ile yüklenmiş iğne numune yüzeyine temas edecek şekilde ayarlanır. Bir ışık kaynağı yardımıyla numune yüzeyi aydınlatılır. İğnenin ucu numune ile temas edecek fakat batmayacak konuma getirilir.

Numune üzerinde kabın kenarına ve birbirine 10 mm'den daha yakın olmayan noktalardan en az 3 deneme yapılır. Bu denemeler 2 dakika içinde yapılmazsa numune ve aktarma kabı yeniden su banyosuna konulur. Ölçümler tekrarlanır. İğne ise her ölçüm öncesi temizlenmelidir.

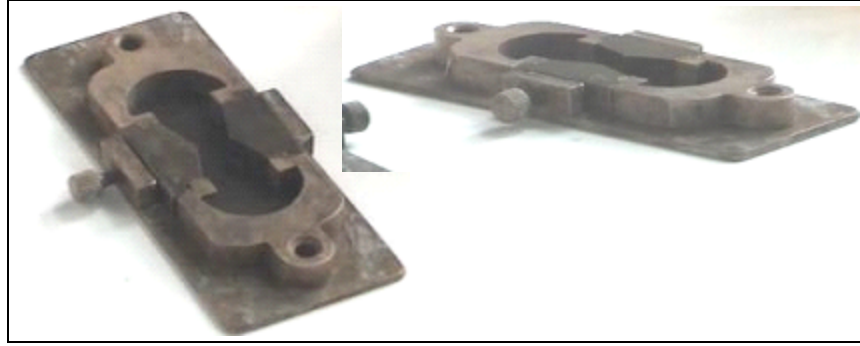
Denemelerin geçerli olabilmesi için penetrasyon değerleri arasında oluşacak en büyük fark değerlerinin (Çizelge 3.7) aşılması durumunda ikinci bir numune ile deney tekrarlanır. Yapılan deneylerden sonuç alınamaz ise dikkate alınmadan yinelenir. Bu yöntemde kabul edilebilir değerlerin ortalaması penetrasyon değeri olarak kabul edilir (İlcalı, 2001).

Çizelge 3.7 Geçerlilik için penetrasyon değerleri arasındaki maksimum farklar  
(Özen, 2005)

|                                         |     |        |         |      |
|-----------------------------------------|-----|--------|---------|------|
| 0,1 mm. olan penetrasyonlar             | ?49 | 50-149 | 150-249 | ?250 |
| En düşük ve en yüksek penetrasyon farkı | 2   | 4      | 6       | 8    |

### 3.2.2.2 Düktilite Deneyi

Düktilite deneyi, bitümlü bağlayıcıların uzama kabiliyetini göstermektedir. Bitümlü bir maddenin düktilitesi, standart bir kalıpta (Şekil 3.12) hazırlanmış bir bitüm numunesinin her iki ucundan çekilerek uzatılması sonucunda koptuğu andaki mesafenin cm cinsinden ifadesidir. Deney yapılacak bitüm numunesi mümkün olan en düşük sıcaklıkta ısıtılarak akıcı hale getirilir. Akıcı hale getirilen numune 297 mikronluk elekten süzülür. Bitüm numunesi vazelinle yağlanmış pirinç düktilite deney kalıbına doldurulur. Kalıp içindeki numuneler oda sıcaklığında 30 ila 40 dakika bekletilir. Numuneler soğuduktan sonra 25 °C su banyosuna alınır ve burada 30 dakika bekletilir.



Şekil 3.13 Düktilite deney düzeneğinde kullanılan pirinç kalıpları (Özen, 2005)

Su banyosundan çıkartılan numunenin kalıp üzerinden taşan kısmı spatula yardımı ile kalıp üst seviyesinde kalacak şekilde kesilir. Numune tekrar 25 °C su banyosunda 1,5 saat bekletilir. Kalıp içindeki numune su banyosundan çıkarılır. Kalıbın altındaki pirinç ve yanlardaki kalıplar sökülür. Numune bekletilmeden düktilite cihazına (Şekil 3.13) yerleştirilir. Numune 5 cm/dakika hızla, kopuncaya kadar çekilir. Asfalt numunesinin koptuğu andaki mesafesi cihaz kenarındaki cetvelden okunur (İlçalı, 2001).



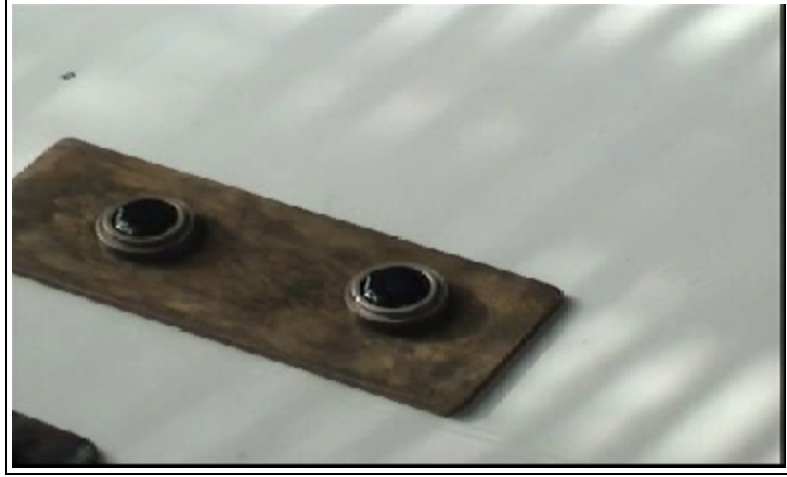
Şekil 3.13 Düktilite deney düzeneği ve deneyin uygulanması (Özen, 2005).

Anlatılan biçimde yapılan üç deney sonucunun ortalaması alınarak numune için düktilite değeri tespit edilmiş olunur. Normal bir deneyde kopma, çekilmekte olan bitüm numunesinin belirli bir yerde birbirinden ayrılması veya iplik şeklini alarak kesit alanının sıfır olmasıdır. Deney sırasında dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da asfalt numunesinin suyun üst yüzeyine veya tabanına temas etmemesidir (İlçalı, 2001).

### 3.2.2.3 Yumuşama Noktası Deneyi

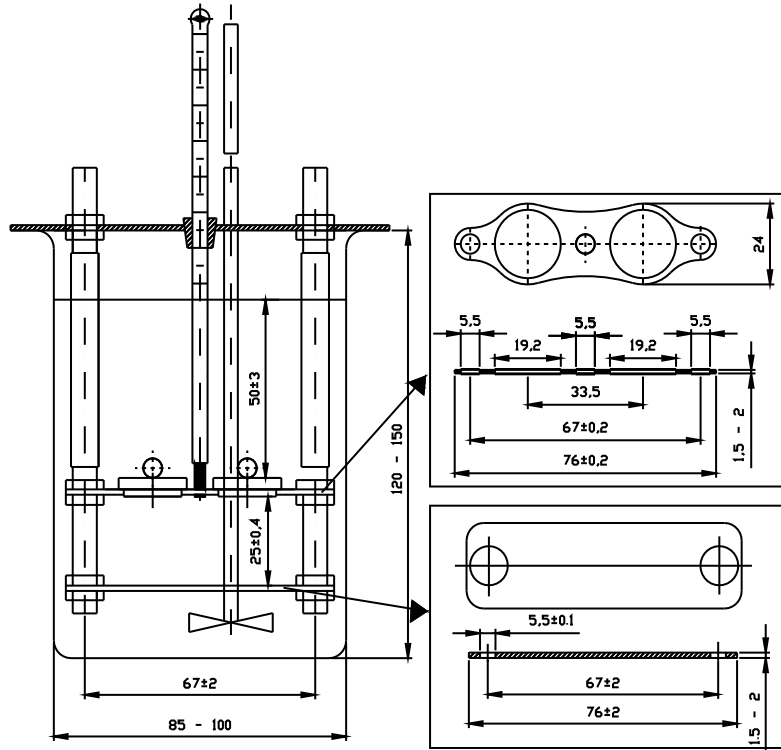
Bitümlü bağlayıcıların sıcaklık karşısındaki davranışları farklılık göstermektedir. Bitümlü maddelerin yumuşaması belli bir sıcaklıkta gerçekleşmez. 25 °C sıcaklıkta aynı penetrasyona sahip 2 bitümlü bağlayıcı farklı sıcaklıkta farklı özellikler gösterebilir. Bu davranışları ölçmek için halka ve bilye metodu kullanılmaktadır.

Bitüm numunesi ısıtılarak akıcı hale getirilir. İçinde hava kabarcığı kalmayacak kadar karıştırılır. Pirinç levha üzerine yapışmayı önleyici vazelin gibi bir madde sürüldükten sonra pirinçten yapılmış standart halkalar levha üzerine konur (Şekil 3.14). Numune halka içine dökülür ve üst seviyeyi geçecek şekilde doldurulur. Numune 1 saat süreyle soğutulur ve taşan numune kesimleri spatula ile düzeltilir.



Şekil 3.14 Halka içinde hazırlanmış olan deney numuneleri (Özen, 2005)

Yumuşama noktası 80 °C veya daha düşük olan maddelerde deney yapılırken deney düzeneği (Şekil 3.15) yardımı ile düzenekte bulunan cam kaba 8,25 cm yükseklikte 5 °C saf su koyulur. İçinde numune bulunan halka su içine sarkıtılır. Bilye halka üzerine ve numune ortasına yerleştirilir. Su sıcaklığı dakikada 5 derece artacak şekilde beher ısıtılmaya başlanır. Deneyin ilk 3 dakikasından sonra bu yükselme hızı 0,5 °C olmalıdır. Halka içindeki bitümlü maddenin camın dibine temas ettiği anda okunan sıcaklık değeri yumuşama noktası değeridir. Bu deney iki numune için yapılır ve sonuçların ortalaması alınır.



Şekil 3.15 Yumuşama noktası için halka tutucu ve deney düzeneği (Özen, 2005)

Yumuşama noktası 80 °C ve daha yüksek olan bitümlü numuneler için su yerine gliserin kullanılır. Deneyin başlangıç sıcaklığı yaklaşık 30 °C olmalıdır.

Yumuşama noktası 150 °C`den daha yüksek olan numuneler için silikon esaslı yağ kullanılır. Deneyin başlangıç sıcaklığı ise 100 °C dolaylarında olmalıdır (Ilıcalı, 2001).

#### 3.2.2.4 Viskozite Deneyi

Bu deney, petrol ürünlerinin ve yağların kıvamlılığını tespit etmek için yapılmaktadır. Bitümlü bir maddenin viskozite değeri yükseldikçe kıvamlılığı artmakta yarı katı hale geçmektedir.

Viskozite değeri standart bir tüp içine konan bitüm numunesinin belirlenen deney sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra 60 cm<sup>3</sup> hacmindeki toplama kabını doldurması için geçen zamanın saniye cinsinden değeridir.

Viskozite deneyi sırasında standart tüp olarak universal delikli tüp kullanılıyorsa Saybolt Ünlversal; furol delikli tüp kullanılıyorsa Saybolt Furol viskozitesi adını alır. Furol viskozitesi, ünlversal viskozitenin yaklaşık onda biri kadardır.

Akma zamanı 32 saniyeden fazla olan yağlar ve damıtılmış petrol ürünlerinin viskozitesi saybolt ünlversal ile tespit edilir. Saybolt furol viskozitesi ise akma zamanı 25 saniyeden fazla olan fuel-oil ve benzeri destilasyon ürünlerine uygulanır. Deney sırasında viskozimetre cihazı

(Şekil 3.16) hava akımlarının etkisinde kalmamalı ve deney numunesi toz ve buhardan etkilenmemelidir.

Deneye başlanmadan önce numunenin bulunduğu tüpler temizlenmelidir. Tüpün alt deliğine hava sızdırmayacak şekilde mantar tıpa takılır. Deney numunesi tüplere konmadan önce 149 mikronluk elekten süzdürülür. Numune, tüp içine alındıktan sonra bir dakika karıştırılır ve aynı zamanda termometre ile sıcaklığı kontrol edilir. Karıştırma sırasında sıcaklık değişmiyor ise termometre ve cam baget numuneden çıkarılır. Toplama kabı deney tüpünün altına yerleştirilir. Numune tüpü altındaki mantar tıpa çekilir. Kronometre çalıştırılır. Numune miktarı, toplama kabı üstündeki işaret çizgisine geldiği anda kronometre durdurulur. Bu ana kadar geçen zaman saniye cinsinden viskozite değeri olarak kaydedilir (İlcalı, 2001).



Şekil 3.17 Viskozite deney düzeneği

#### 3.2.2.5 Parlama ve Yanma Noktası Deneyi

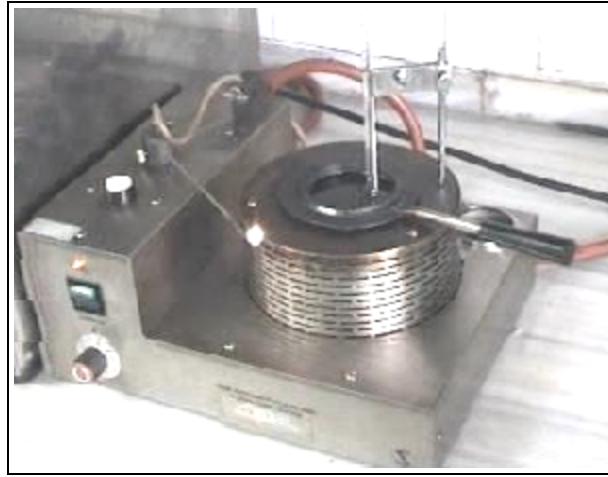
Petrol ürünlerinin parlama ve yanma noktalarının bilinmesi özellikle uygulamalar sırasında doğabilecek tehlikelerin önlenmesi açısından çok önemlidir.

Deney cihazı olarak Cleveland açık kap deney düzeneği kullanılır (Şekil 3.17). Deney cihazı, hava akımı olmayan, yatay ve sabit bir yüzey üzerine yerleştirilir. Deney sırasında parlama noktası tespiti için deney yerinin fazla ışık almaması gerekir. Deney kabı kullanılmadan önce iyice temizlenir. Termometre, numune kabı tabanından 6,35 mm yukarıda ve numune kabının yarıçapının ortasına dikey gelecek şekilde yerleştirilir.

Deney yapılacak bitümlü malzeme çalışma sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra (yaklaşık 140-160 °C) deney kabına yüzeyinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde doldurulur. Numune

sıcaklığı başlangıçta dakikada 14-17 °C arttırılır. Parlama noktasına yaklaşıldığı anlarda sıcaklık arttırma hızı dakikada 5-6 °C olacak şekilde düşürülür. Beklenen parlama noktasına 28 °C önceden başlanarak sıcaklığın her 3 °C yükselmesinde numune üzerinden deney alevi geçirilir. Deney alevinin çapı yaklaşık 4 mm olmalıdır. Deney alevi kabın üzerinden yaklaşık 1 saniye içinde geçirilmelidir. Numune yüzeyinde herhangi bir noktada tutuşma görüldüğü an termometreden okunan sıcaklık değeri parlama noktası olarak kaydedilir.

Tatbik edilen alev sonucu numune yüzeyinde 5 saniyeden fazla bir yanma meydana geldiği anda ise termometrede okunan sıcaklık değeri yanma noktası olarak kaydedilir.



Şekil 3.17 Cleveland açık kap cihazı (Özen, 2005)

Deney yapılan yerde atmosfer basıncı 95,3 kPa değerinden küçük ise sonuçlara düzeltme değeri eklenmelidir (Çizelge 3.8). Aynı kişi tarafından aynı deney cihazı ile yapılan iki deney sonucu arasındaki fark 8 °C fazla olmamalıdır. İki aynı laboratuarda elde edilen deney sonucu arasındaki fark ise 6 °C fazla olmamalıdır (İlçali, 2001).

Çizelge 3.8 Parlama noktası için basınç düzeltme değerleri (Özen, 2005)

| Atmosfer basıncı (kPa) | Düzeltilme miktarı (°C) |
|------------------------|-------------------------|
| 95,3-88,7              | 2                       |
| 88,6-81,3              | 4                       |
| 81,2-73,3              | 6                       |

#### 3.2.2.6 İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi

Bu deney ile 0,32 cm kalınlığında bir asfalt filminin 5 saat süre ile 163 °C ısıtılması sonucu kütleinde oluşacak kayıp tespit edilmektedir. Bitümlü malzemelerin sıcaklık ve hava etkileriyle özellikle penetrasyon ve duktilite değerlerinde oluşacak değişimler bu yöntemle belirlenmektedir.

Temsili olarak alınan numune ısıtılıp karıştırıldıktan sonra numune kabına dökülür. Numune miktarı yaklaşık 50 gr olmalıdır. Kap içindeki bitüm numunesi oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra 0,01 gr hassasiyetli terazide tartılır.

Etüv 163 °C deney sıcaklığına ayarlandıktan sonra hazırlanmış 2 adet numune cihaz içindeki rafa yerleştirilir (Şekil 3.18). Döner raf dakikada 5-6 devirlik hızla döndürülür. Deney süresi, numunenin etüve yerleştirilmesinden sonra sıcaklık 162 °C ulaştığı anda başlar. Bu andan itibaren numune etüvde 5 saat süre ile 163 °C bekletilir. Numune kabının etüvde bekleme süresi hiçbir zaman 15 dakikayı aşmamalıdır. Süre bitiminde numuneler etüvden çıkarılır ve oda sıcaklığında soğutulup tartılır. Ağırlık kaybının, ilk ağırlığa oranı yüzde değeri olarak ısıtma kaybını verir.



Şekil 3.18 İnce film halinde ısıtma deney aleti

Numunenin, deney sonrasındaki penetrasyonu bulunarak orijinal penetrasyona oranlanır. Oranlanan orijinal penetrasyona göre yüzdesi tespit edilir. Aynı şekilde numunenin ısı kaybından sonraki düktilitesi de tespit edilir (Ilıcalı, 2001).

#### 3.2.2.7 Özgül Ağırlık Deneyi

Bitümlü maddelerin özgül ağırlığı, 25 °C hacmi bilinen bir bitüm numunesinin aynı sıcaklık ve hacimdeki suyun ağırlığına bölünmesinden elde edilen orandır.

Yüksek viskoziteye sahip olan sıvı ve yarı-katı bağlayıcılar ile asfalt emülsiyonlarının özgül ağırlık tayininde piknometre yöntemi uygulanır (Şekil 3.19)



Şekil 3.19 Bağlayıcı özgül ağırlığının piknometre ile tespiti

Piknometre temizlenip kurutulduktan sonra hassas terazide tartılır. Daha sonra piknometreye saf su konur ve kapağı kapatıldıktan sonra 25 °C su banyosunda en az 40 dakika bekletilir. Taşan su varsa temiz bir bezle temizlenip, tartım yapılır. Özgül ağırlık tayini yapılacak bitüm numunesinden piknometrenin yarısını dolduracak miktarda alınır. Isıtılarak akıcı hale getirilen numune, kabın üst kısımlarına bulaştırmadan ve hava kabarcığı oluşturmada dikkatlice piknometreye dökülür. Yarısına kadar bitüm numunesi ile doldurulan piknometre oda sıcaklığına kadar soğutulur. Kapağı ile birlikte tartılır. Tartılan numuneye su ilave edilerek kapağı kapatılır ve 25 °C su banyosunda 40 dakika bekletildikten sonra tekrar tartılır. Deney sonucunda özgül ağırlık aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\text{Özgöl ağırlık} = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)} \quad (3.6)$$

A: Piknometre ağırlığı (gr)

B: Piknometrenin saf su ile dolu ağırlığı (gr)

C: Yarısına kadar numune doldurulan piknometre ağırlığı (gr)

D: Numuneye su ilave edilmesinden sonraki ağırlık (gr)

Bağlayıcılar ile ilgili deneylerin bilinmesiyle yol üst yapılarında kullanılan asfalt çimentolarının seçimi arasında doğrudan ve önemli ilişkiler mevcuttur. Nitekim karışım içerisindeki bağlayıcının değer ve özelliklerinin bilinmesi, üstyapı tipinin seçimi ve üst yapıda gözlenmek istenen performans değerleri üzerinde etki yaratacaktır.

Bu bağlamda özetlenebilecek olan temel bağlayıcı kriterlerinin incelenip, üst yapı veya hangi amaç için uygun değerler arasında kaldığı tespit edilip, bu esaslar doğrultusunda hangi bağlayıcının kullanılması gerektiği ortaya koyulmalıdır (Ilıcalı, 2001).

Nitekim şu anda da ülkemizde kullanılan ve çeşitli bitüm sınıfları için değer aralıkları veren asfalt çimentosu özellik ve değerleri mevcuttur (Çizelge 3.9).

Çizelge 3.9 Yol üst yapılarında kullanılan asfalt çimentolarının özellikleri<sup>1</sup> (İlcalı, 2001)

| SINIFLAR ›                                                                              | 10         | 20         | 30         | 40         | 60         | 75         | 120        | 150        | 200        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| ÖZELLİKLER v                                                                            | 20         | 30         | 40         | 50         | 70         | 100        | 150        | 200        | 300        |
| Penetrasyon<br>(25 °C, 100 gr, 5 sn)                                                    | 10<br>20   | 20<br>30   | 30<br>40   | 40<br>50   | 60<br>70   | 75<br>100  | 120<br>150 | 150<br>200 | 200<br>300 |
| Yumuşama noktası<br>(Halka-bilya ile, °C olarak)                                        | 63<br>73   | 57<br>67   | 52<br>62   | 49<br>59   | 45<br>55   | 44<br>49   | 40<br>46   | 37<br>44   | 27<br>37   |
| Düktilite<br>(25 °C, 5 cm/dak,<br>cm olarak)                                            | 5<br>---   | 15<br>---  | 40<br>---  | 100<br>--- | 100<br>--- | 100<br>--- | 100<br>--- | 100<br>--- | 100<br>--- |
| İnce film halinde<br>Isıtma kaybı<br>(3,2 mm, 163 °C, 5 saat,<br>ağırlık kaybı yüzdesi) | ---<br>0,5 | ---<br>0,5 | ---<br>0,5 | ---<br>0,8 | ---<br>0,8 | ---<br>1,0 | ---<br>1,0 | ---<br>1,0 | ---<br>1,0 |
| Isıtma kaybı sonrası<br>penetrasyon<br>(Orjinalin yüzdesi olarak)                       | 60<br>---  | 60<br>---  | 60<br>---  | 58<br>---  | 54<br>---  | 50<br>---  | 46<br>---  | 43<br>---  | 40<br>---  |
| Isıtma kaybı sonrası<br>düktilite<br>(25 °C, 5 cm/dak,<br>cm olarak)                    | ---<br>--- | ---<br>--- | ---<br>--- | ---<br>--- | 50<br>---  | 75<br>---  | 100<br>--- | 100<br>--- | 100<br>--- |
| Parlama noktası<br>(Cleveland açık kap, °C)                                             | 275<br>--- | 250<br>--- | 250<br>--- | 230<br>--- | 230<br>--- | 230<br>--- | 220<br>--- | 200<br>--- | 175<br>--- |

### 3.3 Kireç ve Kireç Katkısının Sıcak Asfalt Karışımına Etkisi

Bilinen en eski bağlayıcılardan birisi olan kireç, eski Babil, Mısır, Finikeliler, Hitit ve Persler tarafından hava kireci olarak yapıda kullanılmıştır. Romalılar devrinde ise su kireci bulunmuş ve su içi inşaatlarında kullanılmıştır. Anadolu ve Ortadoğu’da kireç çoğunlukla döşemelerde ve duvarlarda kullanılmıştır. Kullanılan kireç harcı; kırılmış kireçtaşı, kül ve kumun açık ateşte pişirilip, yeniden kırılıp, elenmesi ile elde edilmiştir.

Sönmüş kirecin ilk uygulamaları mağara duvarlarına yapılan resimlerde görülmüştür. Kireç mağaralarda iç ve dış dekorasyon ve sıva yapımında kullanılmıştır. Eski Mısır, Kıbrıs, Girit ve Mezopotamya'nın değişik yörelerinde kirecin bir yapı malzemesi olarak kullanılmasına ait örneklerle rastlanılmıştır (Ün, 2007).

20. yüzyılın başında hızla gelişen kimya ve demir çelik endüstrisi ile çok büyük miktarlarda

<sup>1</sup> Her sınıf için yazılan değerlerden üstte ifade edilen minimum, alttaki maksimum olarak aralık belirtilmiştir.

kireç kullanılmaya başlanmıştır. Kirecin inşaat endüstri, tarım ve çevre sektörlerindeki gün geçtikçe artan kullanımı, kireç üretim yerlerinin yaygınlığının, kullanım yerlerine yakınlığının, üretim teknolojisinin geliştirilmesinin ve bu sayede fiyatının diğer rakip kimyasallara oranla ziyadesiyle ucuz olmasının bir sonucudur. Birçok kimyasal prosesin (nötralizasyon, absorpsiyon, kostikleştirme gibi) ana girdisi olması, kimyasallarla çabuk reaksiyona girerek istenmeyen maddeleri bünyeden uzaklaştırması, pahalı kimyasalların geri kazanılmasındaki rolü, organik canlılar için besi maddesi olması, ucuzluğu ve kolay bulunması gibi nedenler bu malzemenin yaygın biçimde kullanılmasında önemli rol oynamaktadır (Kılıç ve Anıl, 2006)

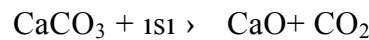
### 3.3.1 Kirecin Yapısı ve Kullanıldığı Yerler

Kirecin ham maddesi olan ve doğada bol miktarda bulunan kireçtaşı, karbonatlı tortul kayacık ve fosiller için kullanılan genel bir deyim olup, yapısında prensip olarak kalsiyum karbonat veya kalsiyum karbonat/magnezyum karbonat bileşikler (CaCO<sub>3</sub> / MgCO<sub>3</sub>) kombine halde bulunur. Bunun yanı sıra içinde değişik oranlarda demir, alüminyum, silisyum, kükürt gibi safsızlıklara da rastlanabilir. Dünya’da çok değişik formasyon ve tiplerde kireçtaşı mevcuttur. Bunlar orijin, jeolojik formasyon, mineralojik yapı, kristal yapısı, kimyasal bileşim, renk ve sertlik özelliklerine göre sınıflandırılır (Örneğin tebeşir, marn, traverten gibi) (Çolak, 2006).

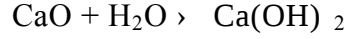
İçindeki kalsiyum karbonat veya magnezyum karbonat oranını baz alarak yapılan sınıflandırmaya göre kireçtaşı cinsleri şöyle sıralanır:

- |                                         |                                                      |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1. Çok yüksek kalsiyumlu kireçtaşı (KT) | : en az %97 CaCO <sub>3</sub>                        |
| 2. Yüksek kalsiyumlu KT                 | : en az %95 CaCO <sub>3</sub>                        |
| 3. Yüksek karbonatlı KT                 | : en az %95 (CaCO <sub>3</sub> + MgCO <sub>3</sub> ) |
| 4. Kalsitik KT                          | : % 5 MgCO <sub>3</sub>                              |
| 5. Magnezyumlu KT                       | : % 5-20 MgCO <sub>3</sub>                           |
| 6. Dolomitik KT (Dolomit)               | : % 20-40 MgCO <sub>3</sub>                          |
| 7. Yüksek magnezyumlu dolomit           | : % 20-46 MgCO <sub>3</sub>                          |

Kireç, en az %90 CaCO<sub>3</sub> içeren kireçtaşının kireç fırınlarında 900-1000 °C’in üzerinde kalsinasyonu sonucunda kalsiyum oksite dönüşmesiyle elde edilir:



Kalsiyum oksidin yaygın olarak kullanılan adı sönmemiş kireçtir. Kalsiyum oksit, suyla reaksiyona sokulması sonucunda kalsiyum hidroksite veya ticari adıyla sönmüş kirece dönüşür:



Söndürme işlemi sırasında sönmemiş kireç suyla ekzotermik reaksiyona girerek  $\text{Ca(OH)}_2$ 'e dönüştüğünden, ısı ile birlikte büyük bir hacim genişlemesi meydana gelir ve bu arada hacmi 2,5 kat artar.

Eğer kireç tamamen söndürülmezse, bu olay yapıda tamamlanır ve kirecin kullanıldığı yerlerde çatlak vb. kusurlar oluşur. Bu nedenle kirecin söndürülme işlemine dikkat edilmelidir. Kireç taşları, şantiyelerde açılan kireç havuzlarında, en az 15 gün su içinde bekletilmelidir.

Sönmüş kireç, bazik karakterde bir malzeme olduğundan demir ve çelikle tepkimeye girmez. Buna karşılık alüminyum, kurşun ve pirinçle kimyasal reaksiyona girebilir. Sönmüş kireç içindeki su miktarına göre çeşitli formlarda kullanılır. Kuru hidrat, kireç hamuru, kireç bulamacı (slurry), kireç sütü ve sulu kireç sönmüş kireç olarak adlandırılır (Ün, 2007).

Kirecin;

- Birçok kimyasal prosesin (nötralizasyon, absorpsiyon, kostikleştirme, gibi) ana girdisi olması,
- Kimyasallarla çabuk reaksiyona girerek istenmeyen maddeleri bünyeden uzaklaştırılması,
- Pahalı kimyasalların geri kazanılmasındaki rolü,
- Organik canlılar için besi maddesi olması,
- Ucuzluğu ve kolay bulunması
- gibi nedenler, yaygın biçimde kullanılmasında önemli rol oynamıştır.

Kireç ürünleri;

- Portland çimento ve beton yapımında hammadde komponenti,
- İnşaat harç ve sıvalarında bağlayıcı,
- Demir-çelik endüstrisinde safsızlaştırıcı,
- Gaz beton endüstrisinde bağlayıcı,
- Çevre denetiminde arıtma kimyasalı,
- Asitli toprakların rehabilitasyonunda pH dengeleyicisi,

- Çeşitli kimyasal maddelerin elde edilmesinde ara reaksiyon kimyasalı veya nihayi ürün komponenti,
- Yol zemin inşaatlarında stabilizatör ve asfalt yapımında aşınmaya karşı katkı maddesi olarak pek çok alanlarda kullanılır (Çolak, 2006).

### 3.3.2 Sönmüş Kireç Katkısının Sıcak Asfalt Karışımına Etkisi

Kimyasal olarak, sönmüş kireç güçlü bir alkali malzemedir. Büyük oranda nötrleştirme gücüne sahiptir. Kireçteki kalsiyum; agrega yüzeyindeki hidrojen, sodyum ve potasyum ile yer değiştirir. Kalsiyumca zengin yüzeyler, uzun zincirli organik asitlerle tepkimeye girerek suya karşı dirençli (yalıtılmış) yüzeyler oluşturur.

Çeşitli katışım yöntemleri ile sıcak asfalt karışımına ilave edilen ve karışım içinde faydalı reaksiyonlara girebilen sönmüş kireç, asfalt çimentosunun polar molekülleriyle reaksiyona girerek soyulmayı önlemede etkili olmaktadır. Bu moleküller, kireçle reaksiyona girdiğinde artık suya ilgi duymayan ve çözünmeyen tuzlar oluşturur. Ayrıca, sönmüş kireç parçacıklarının karışım içerisinde dağılması ile karışım daha rijit ve sağlam olmaktadır. Mekanik olarak asfalt-agrega bağının kırılması yönünde risk azaltıcı etki uygulamakta ve ortamda su olmasa dahi bu anlamda olumlu etki göstermektedir (Aksoy, 2001).

Epps (1992)<sup>2</sup>, bitümlü kaplamalarda soyulma önleyici katkı olarak sönmüş olmuş kireci kullanarak; kirecin bitümün erken yaşlanmasını geciktirdiğini ve böylece adezyon mekanizmasını iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Johansson (1995)<sup>3</sup>, kuru sönmüş kireç veya kireç harcı katılarak yapılan iyileştirilmiş asfaltların yaşlanma ve genel reolojik özellikleri üzerinde sağladığı gelişmeleri araştırmış ve sönmüş kirecin sadece yüksek sıcaklıkta değil, düşük sıcaklıkta da kaplama dayanımına olumlu yönde katkı sağladığını tespit etmiştir.

Rogge (1995)<sup>4</sup>, sönmüş kireç ile ilgili kapsamlı bir araştırma yapmıştır ve kirecin bitümle olan etkileşimi konusunda, fillere sönmüş kireç takviyesi yapılarak kaplamanın dayanımında önemli ölçüde bir artış sağlandığını göstermiştir. Bunun yanında sönmüş kirecin fiziksel sertliği arttırmadığı; sönmüş kireç ile modifiye edilmiş kaplamanın, trafik altında oluşan

<sup>2</sup> Epps, J. A., (1992), "Hydrated Lime Hot Mix," Presentation Manual, FHWA, AASHTO, NLA.

<sup>3</sup> Johansson, L., 1995, Influence of Hydrated Lime On Bitumen Hardening, Licentiate Thesis, TRITA-IP FR 95-8, Royal Institute of Technology, Highway Engineering, Stockholm.

<sup>4</sup> Rogge, D. F., Leahy, R. B. ve Blair, R., (1995), "Cold-In-Place(CIP) Recycling with Lime," Transportation Research Instit., OR State Univ., Corvallis, OR, July.

yükün kaplamaya dağılmasının, modifiye edilmemiş geleneksel kaplamaya göre daha fazla olduğunu ve deformasyonun kalıcı olmaması yönünde olumlu sonuçlar doğurduğunu ortaya koymuştur. Sönmüş kirecin düşük sıcaklık sertleşmesini arttırmasına rağmen, çatlak oluşumuna karşı direnci de aynı oranda arttırdığını, gevrekliği azalttığını; yaşlanma ile oluşan problemlere karşı etkinin yüksek sıcaklıkta düşük sıcaklığa göre daha etkili olduğunu tespit etmiştir.

Sönmüş kireç, sıcak karışım asfaltlara katıldığında meydana getirdiği yararlardan birisi de “birlikte çalışma” özelliğidir. Yararlar, bireysel kullanıldıklarında belirli olmalarına karşın, polimer katkılarla bir arada kullanıldıklarında çok daha fazla artmaktadır. Araştırmalar; kireç ve polimerlerin bir arada kullanıldıklarında, yalnız başlarına kullanılmalarına oranla oldukça büyük iyileşmelerin gözlemlendiğini vurgulamaktadırlar (Mohammed, 2000)

### 3.3.3 Sönmüş Kirecin Sıcak Karışımlara Katılma Teknikleri

Sönmüş kireç, sıcak karışımlara çeşitli biçimlerde katılabilmektedir. Genel bir kural olarak; uygulanma oranı karışımın ağırlığı cinsinden %1 oranındadır. Soyulma ve ısıl çatlama potansiyelinin yüksek olduğu durumlarda kullanılan miktar artırılabilir. Kirecin sıcak karışım asfaltlara katılma yöntemleri içerisinde yaygın olarak kullanılanlar aşağıda belirtilmektedir.

#### 3.3.3.1 Kuru Yöntem

Karışım ağırlığına bağlı olarak belirlenen oranlarda sönmüş kireç mineral fillere karıştırılır. Eklenen kirecin kaybı düşünülerek modifikasyona gerek duyulmaktadır. Son yıllarda, ASTEC tarafından önerilen “çift kutu mikseri” (double barrel mixer), ince malzemeyi etkin bir biçimde karıştırabilmek amacıyla kullanılmaktadır (Aksoy, 2001).

#### 3.3.3.2 Nemli Agregaya Uygulanma Yöntemi

Bu yöntem, çoğunlukla tercih edilmektedir. Yaklaşık olarak %2-3 düzeyinde doymun kuru yüzey koşulunu sağlayan, agreganın ihtiyaç duyduğu kireç belirlenerek karıştırılmaktadır. Plente karıştırılmadan önce yeterli karışımı sağlamak için kireçle iyileştirilmiş agrega pug mill ile işlem görür. Kuru yöntemde ulaşılan kaplanmadan daha fazla bir agrega yüzey kaplılığı oluşturmak amacıyla, kireç nemli agrega yüzeyine uygulanmaktadır. Agregaya yapışmamış bulunan kireç, karışım içerisinde dağılarak tanımlanan diğer özelliklerin iyileşmesine neden olmaktadır. Sönmüş kirecin sıcak karışımlara katıldığı bu “nemli kuru” denilebilen yöntem, göreceli olarak basittir; ancak ilave su için gerekecek işlemler plent üretimini bir ölçüde yavaşlatmaktadır (Çolak, 2006).

### 3.3.3.3 Bulamaç (Slurry) Yöntemi

Bu yöntem, kireç ve suyun bir harç formunu kullanır. Bu harç, agreganın belli bir ölçüsü olarak uygulanır. Kaba agregaya yüzeylerinin üst düzey kaplanmasını sağlamaktadır. Harç uygulandıktan sonra, agregaya ya doğrudan doğruya plente karıştırılır veya belirli bir süre agregayla kirecin reaksiyona girmesi için depo edilerek uygulanır. Kireç agregaya bağlandığı için geri kalan karışımda kirecin en az dağıldığı katıştırma türüdür (Çolak, 2006).

#### 4 KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPISINDA OLUŞAN BOZULMALAR

Karayolu üstyapısı kendine has özelliği olan sonsuz uzunluktaki bir yapıdır. Bu nedenle yol boyunca, bozulmaya etki eden faktörler sürekli değişim göstermekte olup, zemin yapısı, nem oranı, iklim, trafik gibi hususlar yolu etkilemektedir.

Yol üstyapısında meydana gelen bozulma türlerini genel olarak dört ana grupta toplamak mümkündür :

- Şekil değiştirme
- Çatlama (Kırılma)
- Ayırışma
- Kayma direnci kaybı

Bu bozulmaların genel nedenleri:

- Temel, alt temel ve taban zeminin taşıma gücü yetersizliği (hatalı projelendirme, drenaj yetersizliği), şişme ve büzülmesi,
- Trafiğin bozucu etkileri,
- İklim koşulları,
- Asfalt betonunun özellikleri olarak sıralanabilir (Umar ve Ağar, 1985).

Asfalt betonunun kendi özellikleri sebebiyle oluşan bozulmaları ise aşağıdaki nedenlere bağlamak mümkündür:

##### a) Kötü malzeme kullanılması

- İyi seçilmemiş veya iyi kontrol edilmemiş granülometri,
- Karışımda yüksek oranda yuvarlak malzeme (dere malzemesi) kullanılması,
- Niteliksiz (mukavemeti düşük) agrega kullanılması,
- Kirli agrega kullanılması,
- Çabuk cilalanan agrega kullanılması,

##### b) Asfalt betonu karışımının hatalı hazırlanması

- Asfalt yüzdesinin hatalı olması,
- Filler (<0.076 mm) yüzdesinin hatalı olması,
- Granülometrinin bozuk olması,
- Yetersiz karıştırma ve sıcaklık kontrolü,

##### c) Asfalt betonunun kaplama yapımının hatalı olması

- Yetersiz sıkıştırma,
- Aşırı sıkıştırma,
- Serme-sıkıştırma sıcaklığının düşük olması,
- Yapım sırasında meydana gelen segregasyon,
- Astar veya yapıştırma tabakasının gerekli özenle yapılmaması (Umar ve Ağar, 1985).

#### 4.1 Yol Üstyapısında Oluşan Bozulma Tipleri

##### 4.1.1 Şekil Değiştirme

Karayollarında en sık görülen bozulmalardan biri olan şekil değiştirme, genel anlamda, kaplama yüzeyinin orijinal kotuna göre değişikliğe uğramasıdır.

Şekil değiştirme, alt tabakaların (temel, alt temel ve taban) hareketlerine bağlı olabildiği gibi, asfalt betonu kaplamanın stabilitesinin yetersizliğinden de oluşabilmektedir.

Stabilite, serilmiş ve sıkıştırılmış asfalt betonunun, yük altında, şekil değiştirmelere karşı gösterdiği dirençtir. Asfalt betonunun stabilitesi, önem sırasına göre, aşağıdaki üç unsurdan oluşur:

- Mineral agrega danelerinin mekanik kenetlenmesinden doğan iç sürtünme,
- Mineral agregayı saran asfalt filminin kohezyonu ve asfalt-agrega adhezyonundan,
- Karışımın ataletinden (mineral agreganın konum değiştirmeye karşı direncinden).

Sürekli granülometrilili, sağlam, yüzeyi pürüzlü köşeli agrega kullanılır ve iyi sıkıştırma ile mekanik kenetlenme arttırılırsa gerekli iç sürtünme sağlanır. Mümkün olduğu kadar sert bağlayıcı kullanılarak stabilite arttırılabilir. Bitümlü malzeme miktarının, maksimum stabiliteyi verecek optimum değerde olması önemlidir.

Yük altında deformasyonlar ;

- a) Geçici (elastik) deformasyonlar
- b) Kalıcı (plastik) deformasyonlar

olmak üzere ikiye ayrılır. Stabilite yüksek olduğu sürece, toplam deformasyon küçük olduğu gibi bu deformasyonun “geçici” kısmı büyük, “kalıcı” kısmı çok küçüktür. Stabilitenin düşük ya da yok olması (plastisite) halinde, durum tersine döner. Sadece kalıcı deformasyonların oluşması halinde ise stabiliteden söz edilemez.

Yüksek sıcaklıklar, asfaltın termoplastik özelliklerinden dolayı stabiliteyi düşürür. Yük tekrarı da kalıcı deformasyonların artmasına neden olur. Kalıcı deformasyonların sıcaklık etkisi ve

yük tekrarı ile birikimi burada kullanılan anlamı ile şekil değiştirmeye sebep olur. Aşağıda, şekil değiştirmenin 6 tipi incelenecektir (Umar ve Ağar, 1985).

#### 4.1.1.1 Oturmalar

Oturmalar bitümlü tabakalardan bağımsız bozulmalardan olup, alt tabakalarda meydana gelen bozulmaların yüzeye yansımalarıdır.

Oturmalar aşağıdaki nedenlere bağlanabilir:

- Alt tabaka (granüler temel ve alt temel) kalınlıklarının yetersizliği nedeniyle, bu tabakalarda oluşan oturmalar,
- Tabanda oluşan oturmalar,
- Banketlerden gelmesi gereken yanıl desteğin az olmasına,
- Yer altı su seviyesinin yüksek olmasına,
- Drenaj yetersizliğine,
- Temel ve temel altı malzemelerinin taban zemininden gelen kille karışmasına.

Bu tip bozulmalar, ancak alt tabakaların sağlıklı olarak projelendirilmesi ve şartnamelere uygun şekilde yapılması ile önlenir (Umar ve Ağar, 1985).

#### 4.1.1.2 Yerel Çökmeler

Yerel çökmeleri “oturmalar” ayıran husus, isminden de anlaşılacağı üzere gibi küçük ve dairesel alanlar (0,5 – 1,5 m yarıçaplı) halinde ortaya çıkmasıdır.

Yerel çökmeler aşağıdaki nedenlerle oluşurlar:

- Yüzey tabakasının bir noktada yetersiz sıkışması,
- Temel veya alt temelin bir noktada yetersiz sıkışması,
- Belli bir noktada su toplanması (drenaj yetersizliği),
- Belli bir noktada kil yükselmesi,
- Rijitlik kazanmış temelin bir noktada ayrışmaya uğraması.

Bu tip bozulmalar, drenaj ve kil yükselmesi önlemlerinin yanında yapım sırasında yeterli kontrol ve özenli işçilik ile önlenir (Umar ve Ağar, 1985).

#### 4.1.1.3 Tekerlek İzi Oluşması

Tekerlek izi oluşması, asfalt betonu kaplamalarda en sık görülen ve gerek teknik, gerekse ekonomik açıdan çok önemli kabul edilen bozulma tipidir. Tekerlek izi (Şekil 4.1) oluşması özellikle arızalı araziye sahip, trafiği ağır ve iklimi sıcak ülkelerde problem olmaktadır.



Şekil 4.1 Tekerlek izi oluşması (URL -1, 2007)

Tekerlek izleri, üstyapıyı oluşturan tabakaların hepsinde veya bir kısmında ya da sadece bitümlü tabakalarda oluşan deformasyonların birikiminden doğar. Bu nedenle tekerlek izi oluşmasını;

- Alt tabakalara bağlı
- Bitümlü tabakalara bağlı

olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Alt tabakalara bağlı nedenler:

- a) Alt tabakaların kalınlıklarının yetersiz olması,
- b) Alt tabakaların veya tabanın konsolidasyona uğraması.

Bitümlü tabakalara bağlı nedenler:

- a) Karışımın stabilitesinin yetersiz oluşu,
  - Karışımında asfalt yüzdesinin çok yüksek olması,
  - Karışımında filler yüzdesinin çok yüksek olması,
  - Karışımında yuvarlak (dere malzemesi) kullanılması,
  - Bölge sıcaklığına göre yumuşak (yüksek penetrasyonlu) asfalt kullanılması.
- b) Aşınma tabakasının yetersiz sıkışması,
- c) Kanalize olmuş ağır trafik altında aşınma tabakasının aşırı sıkışması,

Yukarıdaki nedenlerden bir veya birkaçının varolması halinde tekerlek izi oluşmasına yol açan çevre etkilerini aşağıdaki gibi gruplandırmak mümkündür:

- Kanalize olmuş ağır trafik ve yüksek seviyede tekrarı,
- Yer altı su seviyesinin yüksek olması,
- Bölgede ki aşırı sıcaklıklar.

Trafiğin etkisi ise aşağıdaki elemanların fonksiyonudur:

- Dingil yükü,
- Lastik hava basıncı (veya değme basıncı),
- Trafik hacmi ve kompozisyonu (ağır taşıt yüzdesi ve tipleri),
- Yükleme zamanı ve yükler arasındaki zaman aralığı (taşıt hızları, ağırlık/güç oranı v.b.).

Ekonomik sonuçları çok önemli kabul edilen tekerlek izi oluşmasının önlenmesi de çok yönlü bir çalışmayı gerektirmektedir.

Asfalt betonu kaplamalar, sadece iklim ve trafik koşullarına uygun olarak inşa edilmiş, yeterli taban, alt temel ve temeller (granüler olması halinde) üzerinde kullanılmalıdır.

Bunlardan başka, bölgelerin iklim ve trafik koşullarına uygun, bozulmalara dirençli (yüksek stabilite) asfalt betonu formülleri geliştirilmelidir. Karışımlarda bölge sıcaklıklarına uygun olacak şekilde, mümkün mertebede sert bağlayıcı kullanılmalıdır (Umar ve Ağar, 1985).

#### 4.1.1.4 Ondülasyonlar

Bitümlü sıcak karışımlarda, yol üzerindeki trafiğin akışına göre, enine doğrultuda meydana gelen ve aralıkları yaklaşık olarak eşit miktardaki dalgalar şeklinde ortaya çıkan, satıh deformasyonlarına “ondülasyon” adı verilir.

Ondülasyon, plastik bir hareket sonucu oluşur. Genellikle kaplama tabakası ile ilgili stabilite eksikliği ile serim anında finişer tablasının aşağı yukarı hareket etmesi ve finişerin sık sık durup, hareket etmesinden meydana gelir (Özen, 2004).

#### 4.1.1.5 Kabarmalar

Satıh tabakasının lokal olarak yukarıya doğru hareket etmesidir. Genellikle doğal zeminin ve üst tabakaların şişmesiyle ortaya çıkar (Şekil 4.2). Doğal zeminlerin şişmesi aşağıdaki durumlarda söz konusudur:

- Doğal zemindeki suyun donması ve çözülmesi,
- Doğal zeminin, su etkisi ile şişme karakterine sahip olması (Özen, 2004).



Şekil 4.2 Kabarmalar (URL -1, 2007)

#### 4.1.1.6 Yıgılmalar

Sıcak asfalt karışımların üst kısımlarında, sıcak havalarda tekerleklerin mekanik etki ile ötelenerek, yol eksenine dik ya da paralel olarak yığılmasıyla ortaya çıkan şekil değiştirmelerdir. Yıgılmalar, özellikle temeli rijit (beton) veya yarı rijit (çimento stabilizasyonu) asfalt betonu kaplamalarda görülür (Şekil 4.3). Stabilitate yetersizliklerine, yüksek sıcaklıklara ve tabakalar arasında yapıştırma tabakası yokluğuna veya fazla yapıştırıcı kullanılmasına bağlıdır.

Yıgılmaların önlenbilmesi, yüksek stabiliteli karışım ve sert bağlayıcı kullanmakla mümkündür (Umar ve Ağar, 1985).



Şekil 4.3 Yıgılmalar (URL -1, 2007)

#### 4.1.2 Çatlamalar

Asfalt betonunda oluşan çatlamaları;

- Trafik etkisine bağlı çatlamalar
- Trafik etkisinden bağımsız çatlamalar

olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür.

Trafik etkisine bağlı çatlamlar ya ağır dingil yüklerinin tek veya birkaç defa geçmesi sonucunda, ya da yüksek sayıda geçmesi sonucunda oluşurlar ki bu ikincisine “yorulma çatlakları” denir.

Birinci halde, ağır dingil yükünün oluşturduğu gerilme asfalt betonunun eğilme-çekme direncini aşmaktadır. Yorulmada ise direnç aşılmamakta ve yüksek tekrar dolayısıyla birikime uğramaktadır.

Aşırı dingil yükleri dışında taşıtların ani hızlanma ve yavaşlamaları da çatlamlara yol açabilmektedir.

Çatlamlar, trafik yüklerine bağlı olmaksızın “çevre” etkisi, sıcaklık ve nemin değişimi ile de meydana gelebilirler. Bu etkiler, tek başlarına veya dingil yükleriyle birleşerek kaplamayı çatlatabilmektedirler (Umar ve Ağar, 1985).

#### 4.1.2.1 Timsah Sırtı Çatlakları

Timsah sırtı çatlakları, kaplamada birbirine bağlı bloklar halinde meydana gelir (Şekil 4.4). Aşırı dingil yükleri ve asfalt betonu veya diğer tabakalarda oluşan hacim değişiklikleri yol açabilir (Umar ve Ağar, 1985).



Şekil 4.4 Timsah sırtı çatlakları (URL -2, 2007)

#### 4.1.2.2 Yorulma Çatlakları

Birbirine bağlı küçük bloklar halinde ortaya çıkan çatlaklardır (Şekil 4.5). Dingil yüklerinin çok sayıda geçişi ile oluşur (Umar ve Ağar, 1985).



Şekil 4.5 Yorulma çatlakları (URL -1, 2007)

#### 4.1.2.3 Kenar Çatlakları

Kenar çatlakları, kaplama kenarından yaklaşık 30 cm içerde ve yol eksenine paralel (boyuna) olarak oluşurlar. Genellikle banketlerin yeteri kadar yanıl destek sağlayamadığı kesimlerde görülürler (Şekil 4.6).

Kenar çatlakları, drenaj yetersizliği, don, üstyapı ile banket arasında büyük nem farkı bulunması (banketlerin aniden kuruması) nedeniyle de oluşabilir. Kaplama kenarına çok yakın yoğun bitki örtüsü ve ağaçlar da yol gövdesinden su çekmek sureti ile bu tip çatlamlara yol açabilirler (Umar ve Ağar, 1985).



Şekil 4.6 Kenar çatlakları (URL -2, 2007)

#### 4.1.2.4 Derz Çatlakları

Bunlar; iki şerit arasında oluşan çatlaklardır (Şekil 4.7). Yapım hatasından oluşabilirler. Nitekim; ikinci şerit dökülürken yeterli “bindirmenin” yapılmaması zamanla iki şeridin birbirinden ayrılmasına yol açar. Meydana gelen çatlak geçirimsizliği arttırdığı gibi, ayrışmalara da zemin hazırlar. Derz çatlakları kaplama ile banket arasında da oluşabilmektedir (Umar ve Ağar, 1985).



Şekil 4.7 Derz çatlakları (URL -1, 2007)

#### 4.1.2.5 Enine Çatlaklar

Yol eksenine dik olarak oluşan çatlaklardır (Şekil 4.8). Diğer tip çatlaklara yol açan nedenler (yetersiz üstyapı kalınlığı, yetersiz drenaj v.b) enine çatlakların oluşumuna da sebebiyet verebilirler. Bunun dışında enine çatlaklar;

- a) Serim işleminin uzun süre duraklaması,
- b) Ani sıcaklık düşmelerinin kaplamada oluşturduğu gerilmeler nedeniyle meydana gelmektedir (Umar ve Ağar, 1985).



Şekil 4.8 Enine çatlaklar (URL -1, 2007)

#### 4.1.2.6 Yansıma Çatlakları

Bu çatlaklar, genellikle rijit kaplamalar üzerine takviye tabakası olarak serilen asfalt betonu kaplamalarda görülür (Şekil 4.9). Alttaki beton kaplamanın enine ve boyuna derzleri varsa,

diğer çatlakları üste yansır. Çimento veya kireç stabilizasyonlu temeller üzerine inşa edilen kaplamalarda da yansıma çatlakları oluşabilir. Alt tabakalarda daha önce oluşmuş çatlakların üste yansıması olarak çıktığından, enine, boyuna, blok veya köşegen şekil alabilirler (Umar ve Ağar, 1985).



Şekil 4.9 Yansıma çatlakları (URL -1, 2007)

#### 4.1.3 Ayrışmalar

Bu bozulma tipi, agregaların iklim ve trafiğin mekanik etkisi ile kaplamadan koparak ayrılmasıyla meydana gelir. Bağlayıcının, yerinde kalan agregadan ayrılması anlamına gelen “soyulma”, bağlayıcının yine agregadan ayrılarak yüzeye çıkması demek olan “kusma” ve agreganın pürüzlülüğünü kaybetmesi anlamına gelen “cılalanma” da bu tip bozulmalar arasında incelenebilir.

Ayrışma, asfalt betonu kaplamalı karayollarımızda çok sık görülen bir bozulmadır. Ayrışma yol açan nedenler;

- Bağlayıcının mekanik etki ile kopması,
- Karışımın kötü kalitede olması, (özellikle düşük asfalt yüzdesi, çok düşük veya çok yüksek filler yüzdesi, kirli agrega kullanılması)
- Yüzey tabakasının ince olması,
- Granüler alt temel ve teme tabandan kil yükselmesi,
- Drenaj yetersizliği,
- Yetersiz sıkıştırma,
- Nemli ve soğuk havada yapım,
- Plentte asfaltın aşırı ısıtılması,

- Yapım sırasında segregasyon oluşması,
- Ayırışmayı kolaylaştıracak kusma oluşması,
- Kimyasal maddelerin (özellikle tuz ve yağların) etkisi,
- Yüzey tabakasının alt tabakaya iyi yapışmaması,
- Su ve kil etkisi ile soyulma

olarak sıralanabilir.

Bu nedenlerin hiç biri tek başına ayırışmayı başlatamaz. Ayırışma bunlardan bir veya bir kaçının bir arada bulunması halinde, trafiğin mekanik etkisi ile başlar. Ayırışma ilerleyici karakterdedir. Zamanla artar. Kaplamanın ömrünü kısaltarak ve yolun seyir konforu ve güvenliğini azaltır. Ayırışma türleri aşağıda incelenmiştir (Umar ve Ağar, 1985).

#### 4.1.3.1 Oyuklar

Bunlar yaklaşık dairesel, 25-75 cm çapında oyuklardır (Şekil 4.10). Yukarıda sayılan nedenlerden ilk altısı bu tip bozulmaların oluşumunda önemli rol oynarlar. Oyuklar, kaliteli bağlayıcı ve karışım kullanılması, trafiğin gerektirdiği üstyapının inşası, drenaj, özenli yapım ve özellikle yeterli sıkıştırma ile önlenabilir.



Şekil 4.10 Oyuklar (URL -1, 2007)

#### 4.1.3.2 Sökülmeler

Yüzeyden alta doğru ya da kenardan içe doğru agregaların zamanla yüzeyden koparak ayrılmasıdır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Sökülmeler (URL -2, 2007)

#### 4.1.3.3 Soyulma

Mıcır danelerini saran ince asfalt filminin, su, kil ve trafiğin mekanik etkisi ile agregadan ayrılması sonucunda mıcır danelerinin çıplak kalması olayına “soyulma” denir (Şekil 4.12).

Soyulma, sürekli granülometrilili, pratik anlamda geçirimsiz kaplamalarda çok az görüldüğünden, asfalt betonu kaplamalı karayollarımızda bugün için büyük bir sorun değildir. Sathi kaplamalarda daha sık görünen bir sorundur (Umar ve Ağar, 1985).



Şekil 4.12 Soyulma (URL -2, 2007)

#### 4.1.4 Kayma Direnci Kaybı

Bu bozulma tipi, kaplamanın (taşıtların aşındırma etkisi ya da kasma nedeniyle) sürtünme katsayısının düşmesiyle oluşur. Kayma direnci kaybında, cilalanma ve kasma olmak üzere iki faktör etkilidir.

##### 4.1.4.1 Cilalanma

Bazı agregalar, özellikle kalkerden elde edilenler, başlangıçta köşeli ve pürüzlü olsalar da taşıtların aşındırma etkisiyle pürüzlüklerini kaybederek cilalı bir hal alırlar (Şekil 4.13).

Cilalanma sonucunda; kaplama-lastik arasındaki sürtünme katsayısı, özellikle kaplamanın ıslak olması halinde düşer ve 60-80 km/saat'ten yüksek hızlarda kaymalara neden olur.



Şekil 4.13 Cilalanma (URL -1, 2007)

#### 4.1.4.2 Kusma

Karışım içindeki asfaltın sıcaklık etkisi ile yükselerek yüzeye çıkması ve yüzeyde oldukça kalın bir asfalt filmi oluşması olayına “kusma” denir. (Şekil 4.13). Kusma sonucu yüzeydeki agregalar tamamen asfalt filmi ile kaplandığından sürtünme katsayısı düşmektedir.

Kusma, daha çok asfalt yüzdesi yüksek karışımlarda ve sıcak havalarda ortaya çıkar. Çok ağır dingil yükleri altında, basınçla da asfalt yüzeye çıkabilir. Asfalt yüzdesi optimum olmakla beraber, karışımda boşluk yüzdesi çok düşükse, sıcak havalarda genleşen ve boşluk bulamayan asfalt yine yüzeye çıkma eğilimi gösterecektir. Çok kalın serilen astar ve yapıştırma tabakaları da kusmaya sebep olabilir.

Karayollarımızda bakım görmüş kesimlerde sık görülen kusma, bağlayıcı ve boşluk yüzdeleri konusunda dikkatli olmak şartıyla önlenabilir (Umar ve Ağar, 1985).



Şekil 4.14 Kusma (URL -1, 2007)

#### 4.2 Üstyapıda Oluşan Bozulmalara Karşı Kullanılan Katkı Malzemeleri

Üstyapıda kullanılan katkı malzemeleri (asfalt modifiye ediciler), kaplama karışımına normal asfalt, agrega ve mineral dolgu bileşenlerinden ayrı olarak ilave edilirler. Modifiye edici maddeler genellikle kaplamada tekerlek izi oluşumu, kaplama çatlamasını, asfaltın oksidasyonunu ya da kaplamanın sudan dolayı zarar görmesini kontrol altına almak amacıyla kullanılmaktadır (Uluçaylı, 2002).

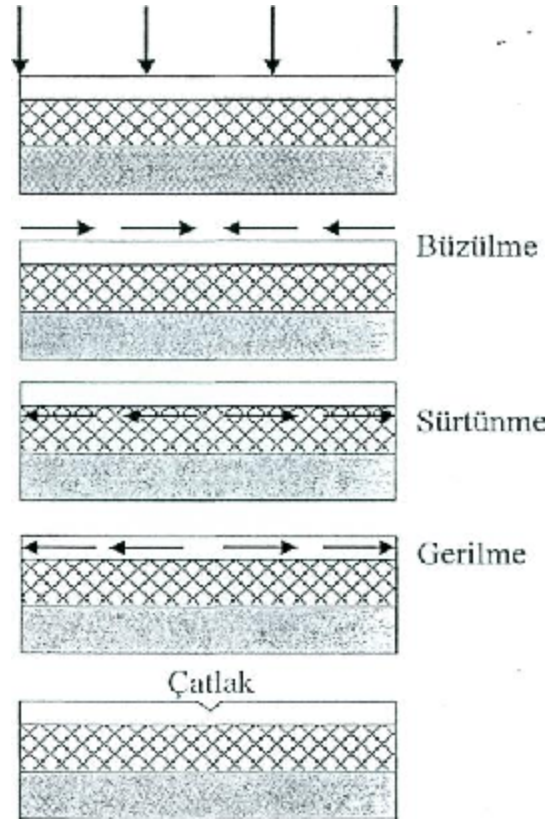
Günümüzde birçok değişik madde, asfalt katkıları ve modifiyeleri olarak değerlendirilmektedir. Kullanılan asfalt modifiye edici malzemeler başlıca aşağıdaki türlere ayrılabilirler:

- Elastomerler dahil olmak üzere polimerler,
- Metal kompleksler,
- Elemental sülfür,
- Lifler (fiber),
- Sönmüş kireç ve Portland çimentosu,
- Silikonlar,
- Fillerler,
- Organik kaymayı önleyici maddeler.

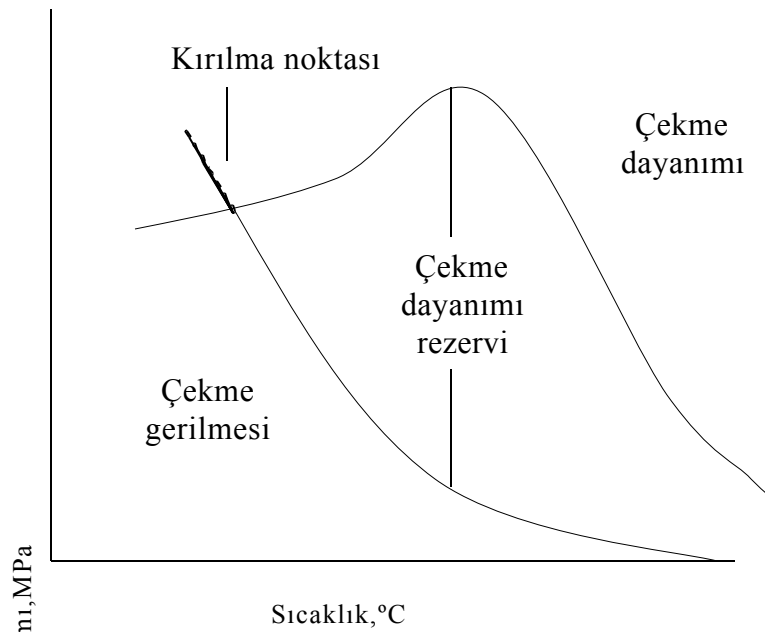
Genel olarak bir asfalt modifiye edicinin kullanımı üstyapı maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle doğru yerde ve gerektiğinde asfalt modifiye edici malzeme kullanılması çok önemlidir. Her katkı maddesinin kullanıldığı yerler ve etki alanları farklıdır. Aşağıda modifiye edici maddeler ve etkili oldukları alanlar gösterilmektedir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 Katkı maddelerinin etki alanları (Özen, 1999)

| Değişmiş Sonuç Özellikleri ile Bazı Yaygın Kullanılan Modifiyelerin Etkidiği Özellikler |                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
|                                                                                         | Kimyasal Katkıların Rolü    |
| Yağ                                                                                     | Bitümün yapısı              |
|                                                                                         | Bağlayıcılık                |
|                                                                                         | Viskozite                   |
|                                                                                         | Penetrasyon değeri          |
|                                                                                         | Yumuşama noktası            |
| Filler tozu                                                                             | Yumuşama noktası            |
|                                                                                         | Viskozite                   |
|                                                                                         | Sertlik                     |
|                                                                                         | Yoğunluk                    |
|                                                                                         | Maliyet                     |
|                                                                                         | Mekanik sağlamlık           |
| Fiberler                                                                                | Tiksotropik                 |
|                                                                                         | Çatlak direnci              |
|                                                                                         | Viskozite                   |
| Balmumu                                                                                 | Viskozite (sıcak)           |
|                                                                                         | Sertlik (soğuk)             |
|                                                                                         | Bağlayıcılık / Adhezyon     |
| APP (Ataktik polipropilen) EVA (Etilen vini asetat)                                     | Sertlik                     |
|                                                                                         | Penetrasyon değeri          |
|                                                                                         | Frass kırılma noktası       |
|                                                                                         | Yumuşama noktası            |
| SBS (stren-butodien-stren)                                                              | Penetrasyon değeri          |
|                                                                                         | Yumuşama noktası            |
|                                                                                         | Elastik geri dönüş          |
|                                                                                         | Düşük sıcaklık kırılgenliği |
| Solvent                                                                                 | Viskozite                   |
| Emülsifikasyon                                                                          | Viskozite                   |
|                                                                                         | Islatma kabiliyeti          |
|                                                                                         | Uygulama sıcaklığı          |
| Islatma ajanları                                                                        | Islatma kabiliyeti          |
|                                                                                         | Adhezyon                    |



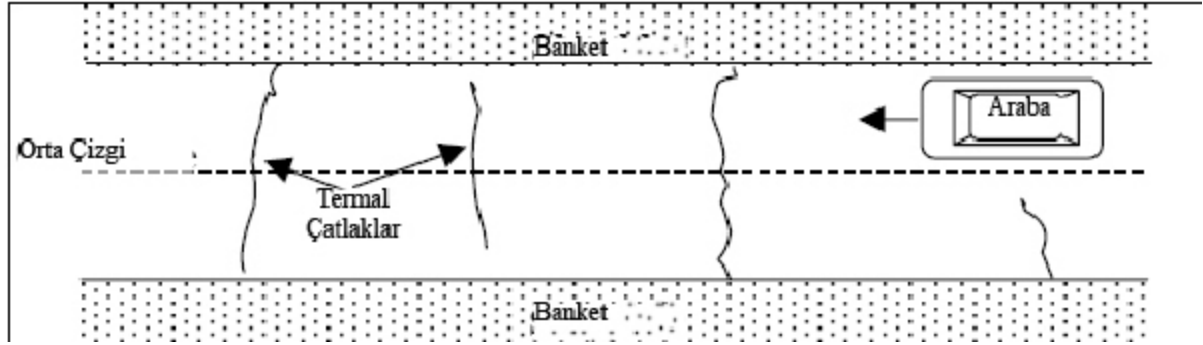
Şekil 5.2 Düşük sıcaklık çatlaklarının oluşumu (Taşdemir, 2003)



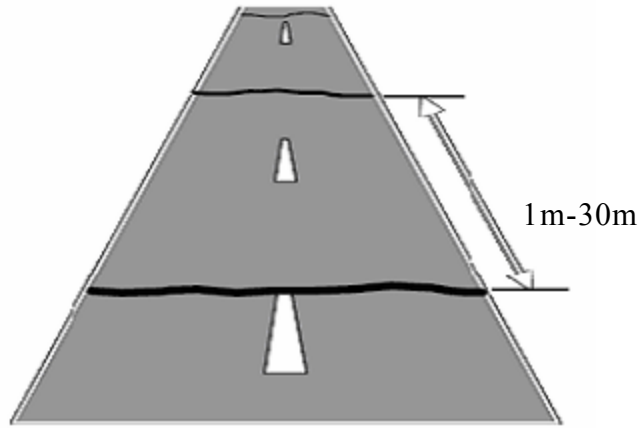
Şekil 5.3 Sıcaklığın fonksiyonu olarak tabaka içerisinde ortaya çıkan çekme gerilmesi ve kaplamanın çekme dayanımı (Taşdemir, 2003)

Bitümlü kaplamalarda, düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörler; kaplamanın yaşlanması, malzeme, çevresel etkiler ve üstyapı faktörleri olarak sıralanabilir. Bu faktörler etrafı saran düşük sıcaklığa tepki olarak yolun yüzeyinde bir dizi enine çatlaklar sonucunu doğurur (Şekil

5.4). Genel olarak çatlak aralıklarının 6 metreden 9 metreye kadar gerçekleştiği değerlendirilse de, bu aralıkların 1 metreden az ila 30 metreye kadar değişebileceğini söylenebilir (Şekil 5.4). Çatlak aralıkları yolun uzunluğu boyunca çoğu zaman düzenli olarak dağılır ancak bunun sebebi hakkında tatmin edici bir açıklama henüz yapılamamıştır.



Şekil 5.4 Düşük sıcaklık çatlak planı (Marasteanu vd., 2004)



Şekil 5.5 Düşük sıcaklık çatlaklarının yol yüzeyinde oluşma aralıkları

Bu tip çatlakların tetiklediği en önemli problem, termal çatlaklardan üstyapıya giren sudur. Dayanıklılık bakımından ele alındığında, suyun bulunması aşınma oranını artırır, bu da asfalt betonun erken bozulmasına (kalite kaybına) yol açar. Ek olarak, su sızıntısı üstyapının altında bulunan malzemenin ufak parçalara ayrılmasına neden olur. Su, bazı durumlarda termal çatlaklarda çöküntülere yol açar. Sonunda, termal çatlakın altında buz lensi oluşabilir ve bu lens çatlakın kenarlarını yukarı doğru iter. Bununla birlikte çapraz çatlakların, enlemesine çatlakların oluşabileceği gerilim odakları gibi davranabileceğini gösteren deliller mevcuttur.

#### 5.1 Asfalt Kaplamalarda Düşük Sıcaklık Çatlak Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Bitümlü kaplamalarda, düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörler; kaplamanın yaşlanması, malzeme, çevresel faktörler, üstyapı faktörleri ve diğer faktörler olarak sıralanabilir. Çizelge 5.1'de faktörlerin etki dereceleri verilmiştir.

Çizelge 5.1 Düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörler (Taşdemir, 2003)

| Faktörler                                                                                                                        | Etkisi                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Kaplamanın yaşlanması                                                                                                         |                                                                                                                                                                                 |
| 1.1 Kısa dönem yaşlanma                                                                                                          | Çok büyük                                                                                                                                                                       |
| 1.2 Uzun dönem yaşlanma                                                                                                          | Büyük                                                                                                                                                                           |
| 2. Malzeme                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                 |
| 2.1 Bitümlü bağlayıcı<br>Kıvamı (sertlik,viskozite ve penetrasyon)<br>Sıcaklığa karşı duyarlılık                                 | Çok büyük<br>Çok büyük                                                                                                                                                          |
| 2.2 Agregası tipi (şekli, yüzey yapısı ve porozitesi)                                                                            | Yok sayılacak kadar düşük                                                                                                                                                       |
| 2.3 Bitümlü karışım bileşimi<br>Bitümlü bağlayıcı oranı<br><br>Agregası gradasyonu<br><br>Filler oranı<br><br>Hava boşluğu oranı | Küçük (yaşlanmamış)<br>Büyük (yaşlandırılmış)<br>Küçük<br><br>Daha fazla mastik oranı, daha fazla çekme şekil değiştirmesi<br><br>Küçük (yaşlanmamış)<br>Büyük (yaşlandırılmış) |
| 2.4 Bitümlü karışım özellikleri<br>Sertlik<br><br>Çekme mukavemeti<br><br>Termal büzülme/genleşme katsayısı                      | Çok büyük<br><br>Küçük<br><br>Büyük                                                                                                                                             |
| 2.5 Modifiye edilmiş karışım ve bitümlü bağlayıcı katkı maddesi (polimerler gibi)                                                | Orta                                                                                                                                                                            |
| 3. Çevresel Faktörler                                                                                                            |                                                                                                                                                                                 |
| 3.1 Sıcaklık                                                                                                                     | Çok büyük                                                                                                                                                                       |
| 3.2 Soğuma hızı                                                                                                                  | Büyük                                                                                                                                                                           |
| 4. Üstyapı Faktörleri                                                                                                            |                                                                                                                                                                                 |
| 4.1 Kaplama genişliği                                                                                                            | Bilinmiyor                                                                                                                                                                      |
| 4.2 Kaplama kalınlığı                                                                                                            | Orta-büyük                                                                                                                                                                      |
| 4.3 Asfalt tabaka ile tabanındaki tabaka arasındaki sürtünme katsayısı                                                           | Orta                                                                                                                                                                            |
| 4.4 Taban zemini tipi                                                                                                            | Küçük                                                                                                                                                                           |
| 5. Diğer Faktörler                                                                                                               |                                                                                                                                                                                 |
| 5.1 Yapım etkileri (kusurlar gibi)                                                                                               | Bilinmiyor                                                                                                                                                                      |
| 5.2 Trafik etkileri                                                                                                              | Bilinmiyor                                                                                                                                                                      |

### 5.1.1 Kaplamanın Yaşlanması

Bitümlü karışım üretilirken ve serilirken, karışımda kısa dönem yaşlanma oluşmaktadır. Yol servise açıldıktan sonra ise bitümlü karışımda uzun dönem yaşlanma ortaya çıkmaktadır. Yaşlanma, bitümlü bağlayıcının sertleşmesinden kaynaklanmaktadır. Bitümlü bağlayıcı; oksijenin varlığından, ultraviyole ışınlarından ve sıcaklık değişiminden etkilenmektedir. Bu dış etkiler; bitümlü bağlayıcının sertleşmesine, penetrasyonunun azalmasına, yumuşama noktası ve penetrasyon indeksinin artmasına sebep olmaktadır. Bitümlü bağlayıcı için; oksitlenme, uçucu bileşenlerin kaybı, fiziksel sertleşme ve sızma sertleşmesi olmak üzere, dört tip sertleşme mekanizması ortaya konmuştur (Taşdemir, 2003).

**Oksitlenme:** Birçok organik madde gibi, bitümlü bağlayıcı havayla temas ettiği zaman, yavaş yavaş oksitlenmektedir. Polar oksijen içeren gruplar, yüksek molekül ağırlıklı miseller içinde oluşmakta ve bunun sonucunda bitümlü bağlayıcının viskozitesi artmaktadır. Polar hidroksil, karbonil ve karboksilik gruplar, bitümlü bağlayıcının daha sertleşmesine neden olan kompleks molekülleri meydana getirmektedirler. Oksitlenme derecesi; sıcaklığa, zamana ve bitümlü bağlayıcı film kalınlığına bağlı olmaktadır. Karıştırma sırasında, 100 °C üstündeki her 10 °C'lik sıcaklık artışı, oksitlenme oranını iki katına çıkarmaktadır. Oksitlenmeye bağlı sertleşme, yaşlanmanın esas sebebi sayılmaktadır (Taşdemir, 2003).

**Uçucu Bileşenlerin Kaybı:** Uçucu bileşenlerin buharlaşması, büyük ölçüde sıcaklığa ve havaya maruz kalma koşullarına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek penetrasyon dereceli bitüm bağlayıcılar, daha az uçucu olmaktadır. Bu nedenle yüksek penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcılarda, uçucu bileşenlerin kaybindan kaynaklanan sertleşme miktarının genellikle küçük olduğunu düşünülmektedir (Taşdemir, 2003).

**Fiziksel Sertleşme:** Genellikle oda sıcaklığında ortaya çıkmaktadır. Bu sertleşme, reçinenin yavaş kristalleşmesinin ve bitümlü bağlayıcı moleküllerinin yeniden sıralanmasının sonucu oluşmaktadır. Fiziksel sertleşme, geri dönebilen bir hal olup, ısıtmak suretiyle başlangıçtaki viskoziteyi elde etmek mümkündür (Taşdemir, 2003).

**Sızma Sertleşmesi:** Bitümlü bağlayıcının yağlı bir bileşeninin, mineral agrega içine sızması sonunda, sızma sertleşmesi görülmektedir. Bu olay, bitümlü bağlayıcının sızmaya eğilimine ve agreganın porozitesine bağlı ortaya çıkmaktadır (Taşdemir, 2003).

### 5.1.2 Malzeme

Bitümlü karışımın termal davranışını etkileyen malzeme faktörleri; bitümlü bağlayıcı, agrega tipi, bitümlü karışım bileşimi, bitümlü karışım özellikleri, modifiye edilmiş karışım ve

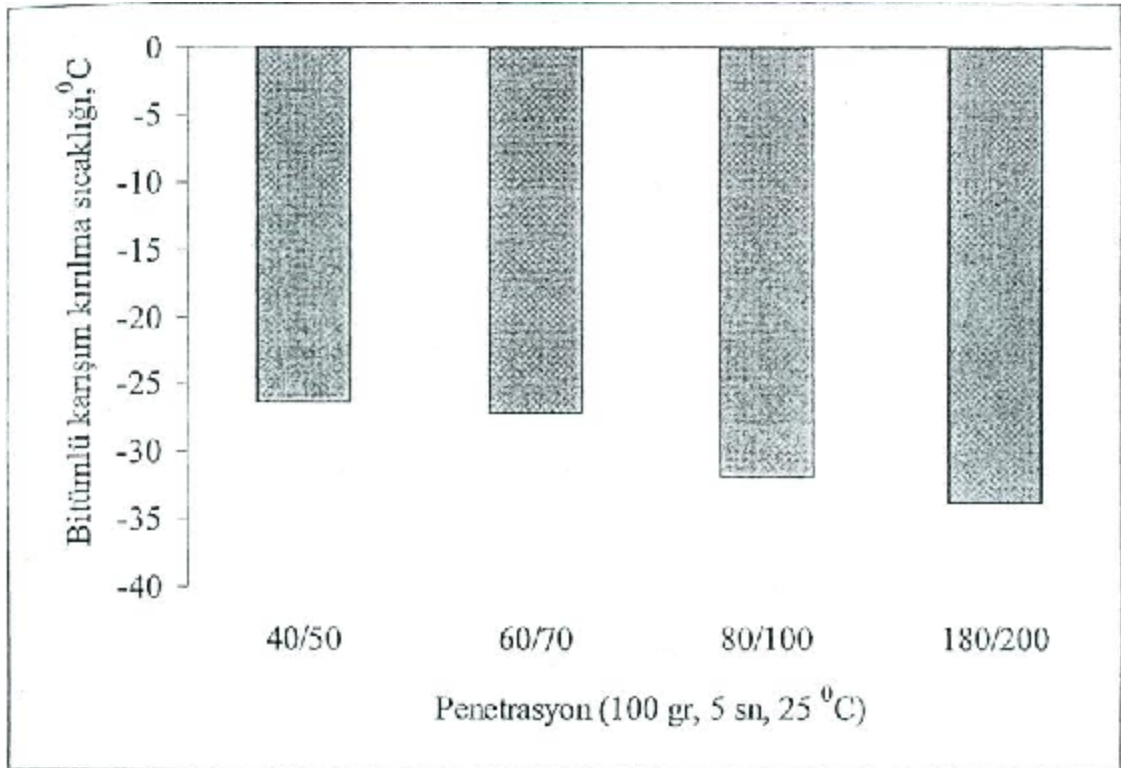
bitümlü bağlayıcı katkı maddesi olarak 5 başlık altında açıklanmıştır.

#### 5.1.2.1 Bitümlü Bağlayıcı

Bitümlü bağlayıcının özellikleri, bitümlü kaplamalarda oluşan düşük sıcaklık çatlakları bakımından diğer bozulma türlerine göre daha fazla önem taşımaktadır. Bu özellikler, bitümlü bağlayıcının kıvamı ve sıcaklığa karşı duyarlılığı şeklinde sıralanabilir.

Kıvamı (Sertlik, viskozite ve penetrasyon): Yapılan araştırmalar, bitümlü bağlayıcının sertlik (stiffness), penetrasyon ve yumuşama noktası gibi reolojik parametrelerinin, bitümlü karışımın kırılma sıcaklığındaki davranışları üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle bitümlü bağlayıcının sıcaklık-sertlik ilişkisinin, genellikle bitümlü karışımlarda düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen en önemli faktör olduğu kanıtlanmıştır. Yüksek penetrasyona sahip bitümlü bağlayıcılar ile yapılmış karışımlarda, sıcaklık azalırken sertlik artış hızı daha düşük olmakta ve düşük sıcaklık çatlakları oluşma riski azalmaktadır (Taşdemir, 2003).

Şekil 5.5'de görüldüğü gibi, daha yumuşak bitümlü bağlayıcı kullanımı (yani yüksek penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanımı), karışımın kırılma sıcaklığını belirgin şekilde düşürmektedir.



Şekil 5.5 Farklı penetrasyon derecelerine sahip bitümlü bağlayıcılarla yapılmış karışımların kırılma sıcaklıkları (Taşdemir, 2003)

**Sıcaklığa Karşı Duyarlılık:** Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılığı, bitümlü bağlayıcının kıvamının sıcaklıkla değişmesi özelliği olarak tanımlanmaktadır. Bu özellik bitümün penetrasyon indeksi (PI) değeriyle ifade edilir.

Düşük PI değerine sahip bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılıkları daha yüksek olmaktadır. Sıcaklığa karşı duyarlılığı düşük olan bitümlü bağlayıcılarla yapılmış bitümlü karışımlar; düşük sıcaklıklarda düşük sıcaklık çatlaklarına, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna daha dirençli olmaktadır (Taşdemir, 2003).

#### 5.1.2.2 Agrega Tipi

Bilindiği üzere düşük sıcaklık çatlakları, yolda enine yönde oluşmaktadır. Enine çatlaklara karşı maksimum direncin; yüksek aşınma direncine, düşük emme kabiliyetine ve düşük don kaybına sahip olan agregalarla sağlanabileceği düşünülmektedir. Emme kabiliyeti yüksek olan agregalar, karışımın düşük sıcaklık karşısındaki dayanımını azaltabilmektedirler. Çünkü, karışımda agregayı saracak bitümlü bağlayıcı filmi, agreganın emme kabiliyetinin yüksek olması durumunda daha ince olmaktadır. Fakat araştırmacılar; agrega tipinin, karışımın düşük sıcaklık altındaki özelliklerini önemli derece etkilemediğini göstermişlerdir. Araştırmacılar, çalışmalarında, RC kodlu (köşeli, yüzey yapısı pürüzlü, emme kabiliyeti yüksek kalker taşı) ve RPI kodlu (köşeli, yüzey yapısı pürüzsüz, yüksek oranda  $\text{SiO}_2$  içeren agrega) farklı iki tip agrega ile üretilen bitümlü karışımlar kullanmışlardır. RPI ve RC kodlu agregaları içeren karışımların, kırılma sıcaklıkları arasında belirgin bir fark olmadığı görülmüştür. Söz konusu çalışmada, bütün karışımlarda aynı agrega gradasyonu ve bitümlü bağlayıcı kullanılmış, fakat RC kodlu agrega ile yapılan karışımlarda bitümlü bağlayıcı oranının, RH kodlu agrega ile yapılan karışımlardan yaklaşık %1 yüksek olduğu izlenmiştir. Agregalara RC ve RH kodları, Malzeme Referans Kütüphanesi (Material Reference Library - MRL) tarafından verilmiştir (Taşdemir, 2003).

#### 5.1.2.3 Bitümlü Karışım Bileşimi

Bitümlü bağlayıcı oranı, agrega gradasyonu, filler oranı ve hava boşluğu oranı, bitümlü karışımın düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direncini etkileyebilecek bileşenler olmaktadır.

**Bitümlü Bağlayıcı Oranı:** Bitümlü bağlayıcı oranındaki değişiklik, karışımın düşük sıcaklık çatlakları performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmamaktadır. Bitümlü bağlayıcı oranının arttırılması, düşük sıcaklıklarda bitümlü karışımın termal büzülme katsayısını büyütmede, fakat sertliğini azaltmaktadır. Bu nedenle, bitümlü bağlayıcı oranı arttırıldıktan sonra bitümlü karışımda yine bitümlü bağlayıcı oranı arttırılmadan önce ortaya çıkan gerilme

benzeri termal gerilmeler ortaya çıkmaktadır.

Agrega Gradasyonu: Zeng (1995)<sup>3</sup>, farklı karışım türleri (yoğun gradasyonlu bitümlü karışım, ABT, stone mastik asfalt, ABS) üzerinde yaptığı testler sonucunda, agrega gradasyonunun, karışımın kırılma sıcaklığı üzerinde fazla bir etkiye sahip olmadığını belirtmiştir.

Filler Oranı: Araştırmalar filler oranının artmasıyla karışımdaki mastik oranının artacağı ve dolayısıyla çekme şekil değiştirmesinin artacağı belirtilmiştir (Taşdemir, 2003).

Hava Boşluğu Oranı: Genelde hava boşluğu oranının, karışımın kırılma sıcaklığı üzerinde dolaylı da olsa etkisi bulunduğu görüşü ağırlık kazanmış olsa da, araştırmalar sonrasında ortak bir sonuca ulaşılamadığı için hava boşluğu oranının yaşlanma ile birlikte karışımın kırılma sıcaklığına etkisi hakkında kesin bir şey söylemek mümkün değildir. %4'den daha az hava boşluğu oranı ve %8'den daha büyük hava boşluğu oranlarının incelenerek karşılaştırılması, konunun aydınlanması için faydalı olacaktır (Taşdemir, 2003).

#### 5.1.2.4 Bitümlü Karışım Özellikleri

Düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen bitümlü karışım özellikleri; sertlik, çekme mukavemeti ve termal büzülme/genleşme katsayısı şeklinde sıralanabilir.

Sertlik: Düşük sıcaklıklarda, bitümlü kaplamaların sertlik modülü ile düşük sıcaklık nedeniyle oluşan çatlaklar arasında güçlü bir ilişki vardır. Bitümlü karışımın sertliği ve kırılma sıcaklığı, sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sertlik asıl olarak bitümlü bağlayıcının fonksiyonu iken, bitümlü karışımın özelliği olarak kendini göstermektedir.

Kısa süreli yüklemelerde ve düşük sıcaklıklarda bitümlü karışımların sertlik modüllerinin sabit bir değere erişerek malzemenin elastik modülü değerine eşit veya çok yakın bir değere geldiği, yapılan laboratuvar deneyleriyle ispatlanmıştır. Diğer bir deyişle, bitümlü karışımlar kısa süreli yüklemelerde ve düşük sıcaklıklarda elastik davranış göstermektedirler. Yol üstyapısının yüzey ve bazen temel tabakasını oluşturan bitümlü kaplamaların sertlik modülleri, yol koşullarına maruz kaldıkları yükleme süreleri ve sıcaklıkların büyüklüklerine göre 280000 kg/cm<sup>2</sup> ile 70 kg/cm<sup>2</sup> arasında değişebilmektedir.

Bitümlü karışımların sertlik modülü, karışımı oluşturan ve fiziksel özellikleri etkileyen faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sertlik modülündeki bu farklılıkların nedenleri aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir:

- Bitümlü bağlayıcı penetrasyonunun azalması, bitümlü karışımın sertliğinin artmasına neden olmaktadır.

- Bitümlü bağlayıcı oranının artması, bitümlü karışımın sertliğinin azalmasına yol açmaktadır. Bu artış, stabilite için gerekli optimum bitümlü bağlayıcı oranından biraz büyük bir bitümlü bağlayıcı oranında en yüksek değerine ulaşmaktadır.
- Agregaya yüzeyinin pürüzlü ve şeklinin köşeli olması bitümlü karışımın sertliğini arttırmaktadır.
- Agregada gradasyonunun açık gradasyondan yoğun gradasyonlu hale dönüşmesi bitümlü karışımın sertliğini arttırmaktadır.
- Boşluk oranındaki azalma, bitümlü karışımın sertliğini arttırmaktadır.
- Sıcaklık düşmeleri, bitümlü karışımın sertliğinin artmasına yol açmaktadır.
- Bitümlü karışımın sertliği, yumuşak bitümlü bağlayıcı ile birlikte sülfür kullanılarak azaltılabilmektedir. Sülfür kullanımı yaygın olmadığı için, bitümlü bağlayıcının polimerle modifiye edilmesi uygun görülmektedir (Taşdemir, 2003).

**Çekme Mukavemeti:** Bitümlü karışımın çekme mukavemetinin, düşük sıcaklık çatlakları bakımından etkili bir faktör olup olmadığı hakkında yeterli veri bulunmamaktadır. Düşük yükleme hızlarında ve düşük sıcaklıklarda, modifiye edilmemiş bitümlü karışımların çekme mukavemetinin agregaya ve bitümlü bağlayıcı özelliklerinden etkilenmediği belirlenmiştir. Bitümlü karışımın çekme mukavemeti, hasır tipi jeotekstil kullanılarak artırılabilir. Bu tip bir iyileştirme ile yorulma çatlakları ve kalıcı deformasyon azaltılabilmektedir. Fakat düşük sıcaklık çatlaklarına etkisi bilinmemektedir (Taşdemir, 2003).

**Termal Büzülme/Genleşme Katsayısı:** Bitümlü bağlayıcılar, oldukça düşük sıcaklıklarda billursu yoğun bir yapıya sahip bulunmaktadır. Sıcaklığın çok artması ile bitümlü bağlayıcılar sıvı hale geçmektedirler. Bu nedenle bitümlü bağlayıcılarda, iki termal büzülme katsayısı ortaya çıkmaktadır. Termal büzülme katsayısının değiştiği sıcaklığa, billursuluğa geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) denilmektedir. Bitümlü bağlayıcılar, billursu ve sıvı durumlarında farklı fiziksel özelliklere sahip olmaktadır. Bitümlü bağlayıcının bazı özellikleri billursuluğa geçiş sıcaklığında tamamen değişmekte, bazı özellikleri de küçük sıcaklık değişimlerinde azar azar değişmektedir.

Yol kaplamasında kullanılan agregalar, farklı agregaya ocaklarından sağlandıkları için farklı mineralojik yapıya sahip bulunmaktadır. Agreganın termal özellikleri, bitümlü karışımın termal büzülme davranışı üzerinde önemli etkiye sahip olmaktadır. Agregaların hacimsel termal özelliklerinin ölçümü farklı yöntemlerle yapılabilir.

Katı durumdaki bitümlü bağlayıcının büzülme katsayısı, agreganın büzülme katsayısından 10 kat daha büyüktür. Bitümlü bağlayıcı sıvı durumda iken bu fark daha fazladır. Bu nedenle,

bitümlü karışımın termal büzülme/genleşme katsayısı bitümlü bağlayıcı oranından önemli şekilde etkilenmektedir. Bitümlü bağlayıcı oranı yükseldikçe bitümlü karışımın büzülme katsayısı büyümektedir.

Açıklamalardan anlaşılacağı üzere bitümlü bağlayıcı ve hava boşluğu oranlarındaki artış, bitümlü karışımın termal büzülme katsayısını büyütecektir. Ancak bu artışlar nedeniyle bitümlü karışımın sertliği azalacaktır. Bir nedenle, bitümlü bağlayıcı ve hava boşluğu oranı bitümlü karışımın kırılma sıcaklığı üzerinde etkili olamayacaktır (Taşdemir, 2003).

#### 5.1.2.5 Modifiye Bitümlü Bağlayıcı ve Modifiye Bitümlü Karışım

Modifikasyon işlemi iki türlü yapılabilmektedir. Birincisinde, bitümlü bağlayıcıya katkı maddesi katılarak, modifiye bitümlü bağlayıcı elde edilmektedir. İkinci modifikasyon işleminde, bitümlü karışım tesisinde bitümlü karışıma doğrudan katkı maddesi ilave edilerek modifiye bitümlü karışım üretilmektedir. Modifiye bitümlü bağlayıcıya, çeşitli standart test yöntemleri uygulanarak bitümlü bağlayıcı özelliklerindeki değişmelerin saptanması mümkün olabilmektedir. Böylece, modifiye bitümlü bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Fakat, bitümlü bağlayıcının modifiye edilmesi işlemleri için genellikle ilave ekipmanlar gerekmemekte, hazırlanan modifiye bitümlü bağlayıcının depolanması, taşınması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır. Bitümlü karışımın modifikasyonunda ise katkı maddesi üretim tesisinde ilave edilebildiğinden fazladan karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma gibi sorunlarla karşılaşılmamaktadır. Ancak bu durumda, bitümlü karışımdan modifiye bitümlü bağlayıcıyı çekerek, özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi pratik olmamaktadır.

Bilindiği gibi bitümlü bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan test yöntemleri, bitümlü karışım özelliklerinin saptanmasında kullanılan test yöntemlerine göre daha pratik ve daha kısa sürelerde yapılabilmektedir. Bitümlü karışım üzerinde uygulanan testlerde, daha uzun süreye, daha fazla işlemlere ve daha kapsamlı test ekipmanlarına gereksinim duyulmasına karşın, üstyapı performansının belirlenmesi ve değerlendirilmesinde daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmaktadır.

Bitümlü bağlayıcıların ve bitümlü karışımların modifiye edilmeleri ile, yol üstyapılarının yüksek yol sıcaklıklarında, yeterli sertliğe sahip olarak oluklanma, ötelenme ve ondülasyon gibi deformasyonlara karşı dirençli olması, düşük yol sıcaklıklarında da yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Bitümlü bağlayıcının modifikasyonunda kullanılacak katkı maddelerinin ve modifiye bitümlü

bağlayıcıların, uygulamada etkili; pratik ve ekonomik olması bakımından bazı koşulları sağlaması gerekmektedir. Bu koşullar özetle şu şekilde sıralanabilir:

- Kolay elde edilebilmelidir,
- Karıştırma sıcaklığında özelliğini kaybetmemelidir,
- Bitümlü bağlayıcı ile homojen olarak karışabilmelidir,
- Bitümlü bağlayıcıyı yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında çok fazla viskoz hale getirmeden, yüksek yol sıcaklıklarında bitümlü bağlayıcının akışkanlığa karşı direncini arttırmalıdır,
- Düşük sıcaklıklarda ise bitümlü bağlayıcının çok kırılgan ve sert olmamasını sağlamalıdır,
- Maliyeti ekonomik olmalıdır.

Katkı maddelerinin bitümlü bağlayıcı ile karıştırılmasından sonra ise aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir:

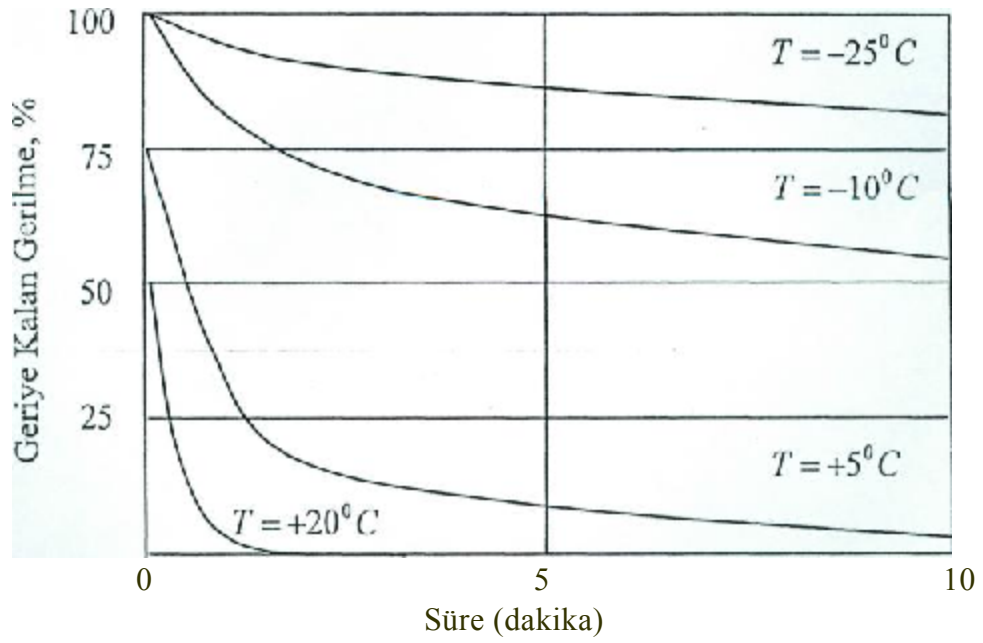
- Depolama, uygulama ve hizmet sırasında sahip olduğu özelliklerini korumalıdır,
- Uygun ekipman ile işlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdır,
- Normal uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilmelidir.

### 5.1.3 Çevresel Faktörler

Düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyebilen çevresel faktörler; sıcaklık ve soğuma hızı olarak gösterilmektedir.

#### 5.1.3.1 Sıcaklık

Kaplama yüzeyi sıcaklığı azaldıkça, düşük sıcaklık çatlaklarının oluşumu daha artmaktadır. Kaplama yüzeyi sıcaklığı, hava sıcaklığı ve rüzgar hızına bağlıdır. Sıcaklık azaldığı zaman bütün malzemeler büzülmemektedir. Eğer malzemenin hareketi bitümlü kaplama yapılarında olduğu gibi sınırlandırılırsa, sıcaklık düşüşü termal gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Çok düşük olmayan sıcaklıkta büzülme oluşmuşsa, bitümlü kaplama viskoelastik davranış göstereceğinden, termal gerilmeler rölaksasyon ile dağılabilecektir. Çok düşük sıcaklıklarda, rölaksasyon sınırlanmakta ve termal gerilmeler yok olmamaktadır (Şekil 5.6).

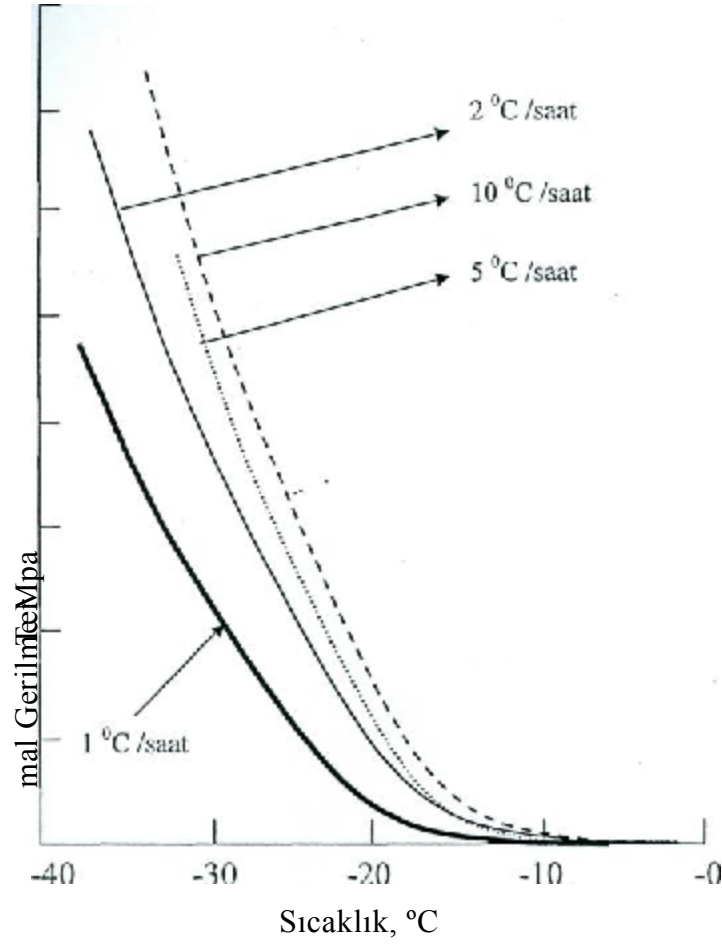


Şekil 5.6 Zaman ve sıcaklığın fonksiyonu olarak sınırlandırılmış numunedeki gerilme durumu (Taşdemir, 2003)

Sıcaklık düşüşü devam ettiğinde, sınırlandırılmış bir numunede termal gerilme artmaktadır. Kırılma sıcaklığı adı verilen sıcaklıkta termal gerilme, malzemenin çekme dayanımına ulaşmakta ve kaplama kırılmaktadır (Taşdemir, 2003)

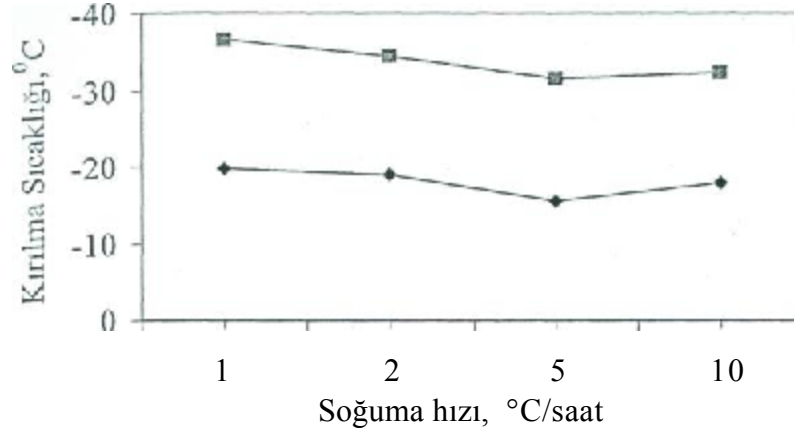
#### 5.1.3.2 Soğuma Hızı

Soğumanın hızlanması, termal çatlakların daha kısa sürede oluşmasına yol açtığı bilinmektedir. Değişik soğuma hızlarında, termal nedenlerle oluşan gerilme eğrileri Şekil 5.7'de sunulmuştur.



Şekil 5.7 Değişik soğuma hızlarında oluşan termal gerilmeler (Taşdemir, 2003)

Düşük soğuma hızlarında, numune kırılmaya yaklaştığında eğim azalmaktadır. Eğimin azalması, kırılma öncesinde numune içerisinde mikro çatlak oluşumu ve yayılması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Numune içindeki termal nedenlerle oluşan gerilmeler, yüksek soğuma hızlarında daha büyük olmaktadır. Soğuma hızı  $5\text{ }^{\circ}\text{C/saat}$ 'e yükseltildiğinde, karışımın kırılma sıcaklığı yükselmektedir. Bu soğuma hızı haricindeki hızlarda, kırılma sıcaklığı biraz daha düşük elde edilmektedir. AAG-1 ve AAK-2 kodlu bitümlü bağlayıcılar kullanılarak Jung (1994) tarafından yapılan çalışma sonuçları, Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekil 5.7 ve 5.8 yoğun gradasyonlu beton asfalt numunelerden sağlanmıştır. Şekil 5.8'de görüldüğü gibi,  $5\text{ }^{\circ}\text{C/saat}$ 'den daha büyük soğuma hızlarının, kırılma sıcaklığına etkileri küçük olmaktadır. Bulunan bu sonuçların, Şekil 5.7'de sunulan sonuçlarla uygunluk sağladığı görülmektedir (Taşdemir, 2003).



Şekil 5.8 Soğuma hızının bitümlü karışımın kırılma sıcaklığına etkisi (Taşdemir, 2003)

#### 5.1.4 Üstyapı Faktörleri

Düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen üstyapı faktörleri; bitümlü kaplamanın genişliği, kaplamanın kalınlığı, bitümlü kaplama ile altındaki tabaka arasındaki arayüzey koşulları, taban zemini cinsi ve yapım kusurları olarak sıralanabilir.

##### 5.1.4.1 Kaplamanın Genişliği

Karayollarında yapılan gözlemler sonucunda, dar kaplamalarda geniş kaplamalara göre daha kısa aralıklarda termal çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. 7,3 m genişliğindeki yeni yapılmış ikinci sınıf bir yolda çatlak aralıkları 30 m, kaplama genişliği 15 m ile 30 m arasında olan yeni yapılmış havaalanı kaplamalarında çatlak aralıkları 45 m den daha büyük olarak ölçülmüştür. Kaplama eskidikçe ikincil çatlaklar ortaya çıktığından, çatlak aralıklarının farkı belirsiz hale gelmektedir (Taşdemir, 2003).

##### 5.1.4.2 Kaplama Kalınlığı

Genellikle, bitümlü kaplama tabakasının kalınlığı arttıkça, termal çatlak oluşumu daha az olmakta, başka bir deyişle, çatlak aralıkları büyümektedir. Kaplama kalınlığı 10 cm'den başlayarak 25 cm'ye kadar arttırılan bir deneme yolu yapılmış, söz konusu çalışmada tüm değişkenler aynı tutulduğunda, çatlak aralıklarının ince kısımlarda, kalın kısımlara göre 1,5 kat daha fazla olduğu gözlenmiştir (Taşdemir, 2003).

##### 5.1.4.3 Bitümlü Kaplama ile Altındaki Tabaka Arasındaki Arayüzey Koşulları

Temel tabakası yüzeyinin astarlanması, düşük sıcaklık çatlakları oluşumunu azaltmaktadır. Bu sonuç, bitümlü kaplama tabakasının, altındaki termal büzülme katsayısı düşük olan granüler tabakaya tam olarak bağlanmasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Temel tabakasının gradasyonu,

özellikle No.200 elekten geçen malzeme yüzdesi, düşük sıcaklık çatlakları oluşumunda küçük de olsa etkiye sahiptir.

#### 5.1.4.4 Taban Zemini Cinsi

Düşük sıcaklık çatlakları, taban zemini kum olan kaplamalarda taban zemini kohezif olan kaplamalara göre daha sık oluşmaktadır. Üst üste yer alan tabakaların birbirine iyi bağlanması durumunda, iki tabaka tek tabaka gibi davranış göstermekte ve düşük sıcaklık çatlakları oluşma ihtimali azalmaktadır (Taşdemir, 2003).

#### 5.1.5 Diğer Faktörler

Düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörlere; yapım ve trafik etkileri de eklenebilir.

##### 5.1.5.1 Yapım Etkileri (Kusurları)

Yüksek sıcaklıklarda çelik silindir kullanılarak bitümlü kaplamanın sıkıştırılması ve düşük karışım sertliği, enine kusurlara neden olabilmektedir. Kaplama soğuduğunda çatlaklar, yol şerit genişliğinden daha kısa aralıklarda, bu kusurlardan başlayabilmektedir.

##### 5.1.5.2 Trafik Etkileri

Düşük sıcaklık çatlakları bakımından, trafik etkilerini göz önüne alan bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle trafiğin, düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyip etkilemediği bilinmemektedir (Taşdemir, 2003).

## 5.2 Düşük Sıcaklık Çatlak Modelleri

Varolan düşük sıcaklık çatlak modelleri mekanik ve deneysel tabanlı olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Alan verilerinin regresyon analiziyle geliştirildiği deneysel modeller, termal çatlak oluşumunda etkili parametreleri belirlemede yararlıdır. Ancak, üzerine kuruldukları verilerle sınırlıdır ve çatlama olgusuna temel seviyede tam bir açıklık getirmemektedirler. Aksine, mekanik tabanlı modeller çatlama sürecini daha temel bir seviyede açıklama hususunda malzemelerin mekaniğine daha güçlü dayanırlar. Ancak, çoğu mekanik tabanlı çatlama modeli bütün yol yapısını bütün bir sistem olarak ele almaktan çok beton asfalt yüzey üzerine odaklanmaktadır. Bu aşamada varolan modellerin hiçbirinin trafik etkilerine tam olarak açıklık getiremediği belirtilmelidir (Marasteanu vd., 2004).

### 5.2.1 Deneysel Tabanlı Düşük Sıcaklık Çatlak Modelleri

Genelde, deneysel tabanlı modeller bir kere geliştirildiklerinde ve modelde gerekli girdiler saptandığında göreceli olarak kullanımları daha kolaydır. Bazı model girdileri daha karmaşık testlere gerek duyarken (yenilenen asfaltın içe işlenmesi gibi), bazıları kolay bulunur (yol kalınlığı gibi). Buna göre, belirli bir modelin belirli bir kullanıcı için kullanım kolaylığı, öncelikle kullanıcının model girdilerini saptayabilmesine bağlıdır (Marasteanu vd., 2004). Aşağıda deneysel modellerden birkaçı sunulmaktadır.

#### 5.2.1.1 Fromm ve Phang'ın Deneysel Modeli

Fromm ve Phang (1972)<sup>5</sup> Ontario'daki 33 yol bölümünde sürdürülen test programına dayandırılan çatlama indeksini tahmin etmek için bazı regresyon denklemleri geliştirmiştir. Ontario Ulaştırma Dairesi tarafından kullanılan çatlama indeksi, “150 m uzunluğunda iki yönlü bir yolda oluşan enine çatlakların miktarı” şeklinde tarif edilen bir projede çatlama sertliğini ifade etmektedir. Çatlama indeksi hesabı şu şekilde verilmektedir.

$$I = N_m + N_f + 0.5*N_h \quad (5.1)$$

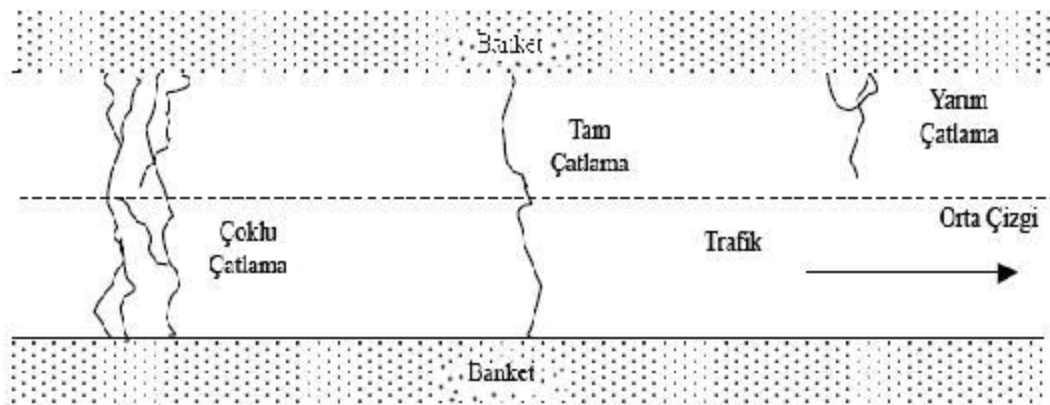
I : Çatlama indeksi

$N_m$  : 150 m yolda oluşan çoklu çatlama sayısı

$N_f$  : 150 m yolda oluşan tam çatlama sayısı

$N_h$  : 150 m yolda oluşan yarım çatlama sayısı

Düşük sıcaklık çatlakları yukarıda hesaplanan çatlama indeksi değerlerine göre gruplandırılmıştır. Aşağıda çatlama indeksine göre tanımlanan çatlama çeşitleri gösterilmektedir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 Çatlama indeksi çatlak tanımlamaları (Marasteanu vd., 2004).

<sup>5</sup> Fromm, H.J. and Phang, W.A., “A Study of Transverse Cracking of Bituminous Pavements,” Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 41, 1972, pp. 383 - 423.

Başlangıçta, statik analizde 40 kadar değişken göz önünde bulundurulmuştur. Adım adım lineer regresyon kullanılarak, parametre sayısı 10'a düşürülmüştür (Çizelge 5.2). Bütün verileri tanımlayan genel bir modele ek olarak, Ontario'nun kuzey ve güney bölgelerinde oluşan çatlakların daha iyi tanımlanabilmesi için, bu parametreler kullanılarak üç ayrı denklem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu üç model arasında, denklemlerin çatlama indeksi regresyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,6'dan 0,7'ye değişiklik göstermiştir (Marasteanu vd., 2004).

Çizelge 5.2 Lineer regresyon parametreleri (Marasteanu vd., 2004).

| Değişken | Tanımlama                                           |
|----------|-----------------------------------------------------|
| X1       | Viskozite (Yapışkanlık) oranı (%)                   |
| X2       | Donma indeksi (derece/gün)                          |
| X3       | Kritik sıcaklık, (°F)                               |
| X4       | Hava boşluğu, (% hacim olarak)                      |
| X5       | Aşınma oranı (%)                                    |
| X6       | 25° C'de Yenilenen asfaltın kıvamlılığı, (dmm)      |
| X7       | Asfalteno, (% ağırlık olarak)                       |
| X8       | Tanecikli taban, (0,075 mm elekten geçme %)         |
| X9       | Asfalt agregası (çakıl), (0,075 mm elekten geçme %) |
| X10      | Tanecikli taban, kil miktarı (Hacmi)                |
| X11      | Alt temel (Katman), (4,75 mm elekten geçme %)       |

Çizelge 5.2'de listelenen parametrelerin çoğu kendinden açıklamalıdır ve yol mühendisliğinde sıkça kullanılmaktadır (hava boşluğu, 0.075 mm elekten geçme (%) gibi). Ancak, bazı parametreler, termal çatlak problemi açısından daha spesifiktir ve daha fazla açıklanması gerekir. Bu parametreler; donma indeksi, kritik sıcaklık ve aşınma oranıdır.

**Donma İndeksi (F.I.):** Kışın sertliği ve süresinin bir ölçüsüdür. Donma derecesinin altındaki toplam derece-gün sayısı olarak ifade edilir. Ortalama, tarihi iklim verileri; kullanılarak, donma indeksi şu şekilde hesaplanır :

$$F.I. = \sum_{i=1}^n (0^{\circ}C - Tav_i) \quad (5.2)$$

Tav<sub>i</sub>: i. gündeki ortalama hava sıcaklığı

n: Kış günleri sayısı

**Kritik Sıcaklık:** Kritik sıcaklık, asfaltın akışkanlığını kaybetmeye başladığı bir sıcaklıktır. Kritik sıcaklıktan yüksek sıcaklıklarda, malzemenin yapışkan (akmaz) akıntısının, çekilmeye bağlı oluşan gerilimi karşılayacak kadar yüksek olduğu düşünülür. Tersine, kritik sıcaklıktan düşük sıcaklıklarda, termal gerilimler daha hızlı gelişir ve bu durum çatlakların oluşmasına daha müsaittir.

**Aşınma Oranı:** Fromm ve Phang (1972), aşınma oranını asfalt ve agrega arasındaki bağ kuvvetinin ve kompozit malzemenin gerilim mukavemetinin göstergesi olarak kullanmışlardır. Numune olarak alınan asfalt betonun aşınma oranını (S) görsel olarak ölçmek için aşağıdaki ifade edildiği bir kompozit çetele sistemi kullanılmıştır:

$$S = P + C + F \quad (5.3)$$

S : 1 ve 10 arasında aşınma oranı

P : Aşınma tesir indeksi

C : İşlenmemiş agrega aşınma indeksi

F : İşlenmiş agrega aşınma oranı

#### 5.2.1.2 Genel Model

Genel model, tüm üstyapı kısımları için çatlama indeksi (I) tahmini yapar. Bu denklemin Çizelge 5.2'de gösterilen temel veya alt temel parametrelerini kullanmadığına dikkat etmek gerekir:

$$I = 52.22 X_1 + 0.0007093 X_2 + 0.4529 X_3 - 1.348 X_4 - 0.07903 X_5 \quad (5.4)$$

$$0.4887 X_6 - 0.1258 X_7 - 0.1961 X_8$$

$$(R^2 = 0.6357)$$

#### 5.2.1.3 Kuzey Modeli

Kuzey Modeli, kıvamlılığı 110 dmm'ye eşit veya daha büyük olan asfalt test bölümlerini açıklar (Fromm ve Phang, 1972):

$$I = 30.30 X_1 + 0.00602 X_2 + 0.5253 X_3 - 1.280 X_4 + 0.5190 X_5 - 0.02563 X_6 - 0.0844 X_7 - 1.496 X_8 + 0.225 X_9 + 3.1043 X_{10} + 0.097 X_{11} \quad (5.5)$$

(R<sup>2</sup> = 0.6222)

#### 5.2.1.4 Güney Modeli

Güney Modeli, kıvamlılığı 110 dmm'den daha az olan asfalt test bölümlerini açıklar. Bu denklemin, genel modelde olduğu gibi, esas ve alt temel özellikleri hesaba katmadığının akılda bulundurulması gerekir:

$$I = 64.74 X_1 + 0.008279 X_2 + 0.3935 X_3 - 1.491 X_4 + 0.3246 X_5 - 0.0001481 X_6 - 0.6069 X_7 - 0.8071 X_8 - 0.6567 X_9 \quad (5.6)$$

(R<sup>2</sup> = 0.7038)

Genelde, her bir bağımsız değişkene ait katsayıların, termal çatlakla ilgili beklentilerle tutarlılık gösterdiği görülmüştür. Dikkate değer bir istisna, ancak, üstyapı hava boşluklarıyla ilgilidir. Fromm ve Phang tarafından ifade edilen hava boşluğu katsayısı, sıfırdan azdır. Başka bir deyişle, tam tersi beklendiği halde hava boşluğu ne kadar arttıysa, o kadar az üstyapı çatlağına karşılık gelmektedir. Fromm ve Phang (1972), Ontario yollarının Asfalt Enstitüsü'nün tavsiye ettiğinden daha düşük hava boşluğuyla inşa edildiğini açıklamışlardır.

Bu araştırma sonuçlarına göre, kesin olmamakla beraber, hava boşluğunun, sertliğin yerini tutabildiği ve daha fazla boşluklu az sertlikli karışımların aslında termal çatlak miktarını düşürebileceği söylenebilir.

Yukarıdaki tartışma, deneysel modellerle ilgili önemli bir noktaya dikkat çekmektedir. Şöyle ki, deneysel modeller verilerin alındığı şartlara bağlıdırlar. Bu tür bir model kullanan bir mühendis, kısıtlamaların dikkate almazsa hatalı sonuçlara ulaşılabilir (Marasteanu vd., 2004).

#### 5.2.2 Mekanik Tabanlı Termal Çatlak Modelleri

Deneysel tabanlı modellerin aksine, mekanik çatlak modelleri hesaplama yönünden çok daha karmaşıktır. Mekanik prensipleri üzerine inşaa edilen mekanik modeller, genellikle doğrusal veya doğrusal olmayan bir sistemin çözümünü gerektirir. Artan karmaşıklığa rağmen, deneysel modellerle karşılaştırıldığında termal çatlama olgusunu daha temel bir seviyede açıklamaya daha yatkındırlar.

Aşağıda incelenenler dahil çoğu mekanik termal çatlak modeli, modelleme sürecinde neredeyse sadece asfalt beton yüzey üzerine odaklanırlar (Marasteanu vd., 2004).

### 5.2.2.1 Hills ve Brien - Çatlak Sıcaklık Tahmini

Hills ve Brien (1966) ziftli karışımın çatlayacağı sıcaklığa çok iyi bir tahmin geliştirmişlerdir. Metodları daha sonra karışım hesaplama aracı için genişletilmiştir. Bu metodun çatlağın miktarı ya da frekansını değil, sadece çatlağın oluşabileceği sıcaklığı tahmin ettiğini kavramak önemlidir. Yaklaşımlarına hakim olan prensip Şekil 5.10'da resmedilmiştir. Sıcaklık sağdan sola düşerken, malzemenin tamamen dizginlendiği varsayımına bağlı olarak termal gerilme artar. Şekildeki gerilim mukavemet eğrisi laboratuvar test sonuçlarını simgelemektedir. Bu iki eğri kesiştiğinde, gerilme değerinin mukavemet değerini aştığı ve termal çatlağın oluşmaya başladığı varsayılır. Modelin esas bileşeni ısıнын neden olduğu gerilimin belirlenmesidir.

$$\sigma_i = \frac{1}{1+\nu} \cdot E \cdot \epsilon_i + \frac{\nu}{1+\nu} \cdot 3 \cdot p \quad i = x, y, z \quad (5.8)$$

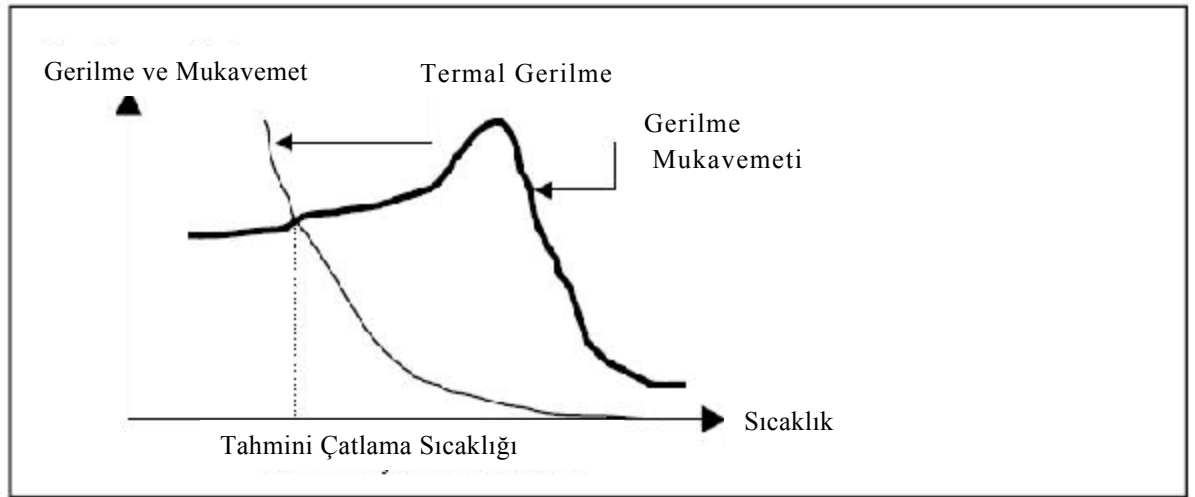
$\nu$  : Poisson oranı

$$p = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$$

E = Sertlik

$\epsilon_i$  = Zorlanma

$\sigma$  = Gerilme



Şekil 5.10 Tahmini çatlama sıcaklığı metodu (Marasteanu vd., 2004)

Tahmin modelini doğrulamak amacıyla, Hills ve Brien (1966), tahmin edilen ve ölçülen çatlama sıcaklığını karşılaştırmak için asfalt beton kirişi üzerinde bir dizi laboratuvar deneyi gerçekleştirmişlerdir.

Numuneler yaklaşık 10°C/saat'te soğutulmuş, tamamıyla zorlanmış asfalt beton kirişlerdir.

Tahminleri mükemmel olmasa da makul bir çatlak sıcaklığı yaklaşımı elde etmeyi başarmışlardır. Buna ilaveten, Hills ve Brien (1966), modellerinin, indirgenmiş çatlama sıcaklığı bakımından yumuşak bir bağlayıcı kullanmanın yararlarını tahmin ettiğini ileri sürmüşlerdir. Asfalt betonun sahte-esnek (psödo-elastik) gösteriminin doğru olduğu varsayılan Hills ve Brien (1966) yaklaşımı temelde kusursuzdur. Ayrıca, metot göreceli olarak basit ve model girdileri, iyi kurulmuş laboratuvar test metotlarıyla elde edilebilir. Ancak, çatlama miktarı değil de sadece çatlak sıcaklığı tahmininde kullanıldığı için kısıtlıdır ve böylece uygulamanın sonuçları açısından açıklayıcı değildir (Marasteanu vd., 2004).

#### 5.2.2.2 Christison, Murray ve Anderson -Termal Gerilim Tahmini

Christison, Murray ve Anderson (1973), Hills ve Brien yaklaşımını (1966) doğrulamak için Kanada'da saha test üstyapılarındaki çatlama sıcaklığını tahmin etmede bu modeli kullanmışlardır. Çalışmalarının amacı, sahada ölçülen çatlama sıcaklığı ile tahmin edilen çatlama sıcaklığını karşılaştırmak ve bir dizi farklı gerilim analizini incelemektir. Bu çalışmaya uygun olan, iki test yolu inşa edilmistir. İlk yol 1966'da Alberta'nın merkezinde, genelde St. Anne Test Yolu olarak bilinen yoldur. İkinci yol ise 1967'de Manitoba'da kurulmuştur. Ölçülen ve tahmin edilen çatlama sıcaklıkları ve zamanlar karşılaştırılmıştır. Bir dizi analizin yapıldığı bu deneyde, asfalt betonun visko-elastik bir malzeme olarak modellenmesinin karmaşıklığı göz önüne alınmamasına rağmen, gerçekçi sonuçlar ortaya çıktığı görülmüştür (Marasteanu vd., 2004).

#### 5.2.2.3 Bilgisayar Programı COLD

Finn ve arkadaşları (1977, 1986), Hills ve Brien (1966) yaklaşımını, bilgisayar programı COLD'da gerçekleştirmişlerdir. Programın üç ana kullanım amacı; binder tabakası seçme işlemine, belirli yerlerdeki belirli karışımların düşük sıcaklıkla çatlama potansiyelini belirleme ve asfalt döşemeden önce tanımlamaları geliştirmeye yardımcı olmaktır.

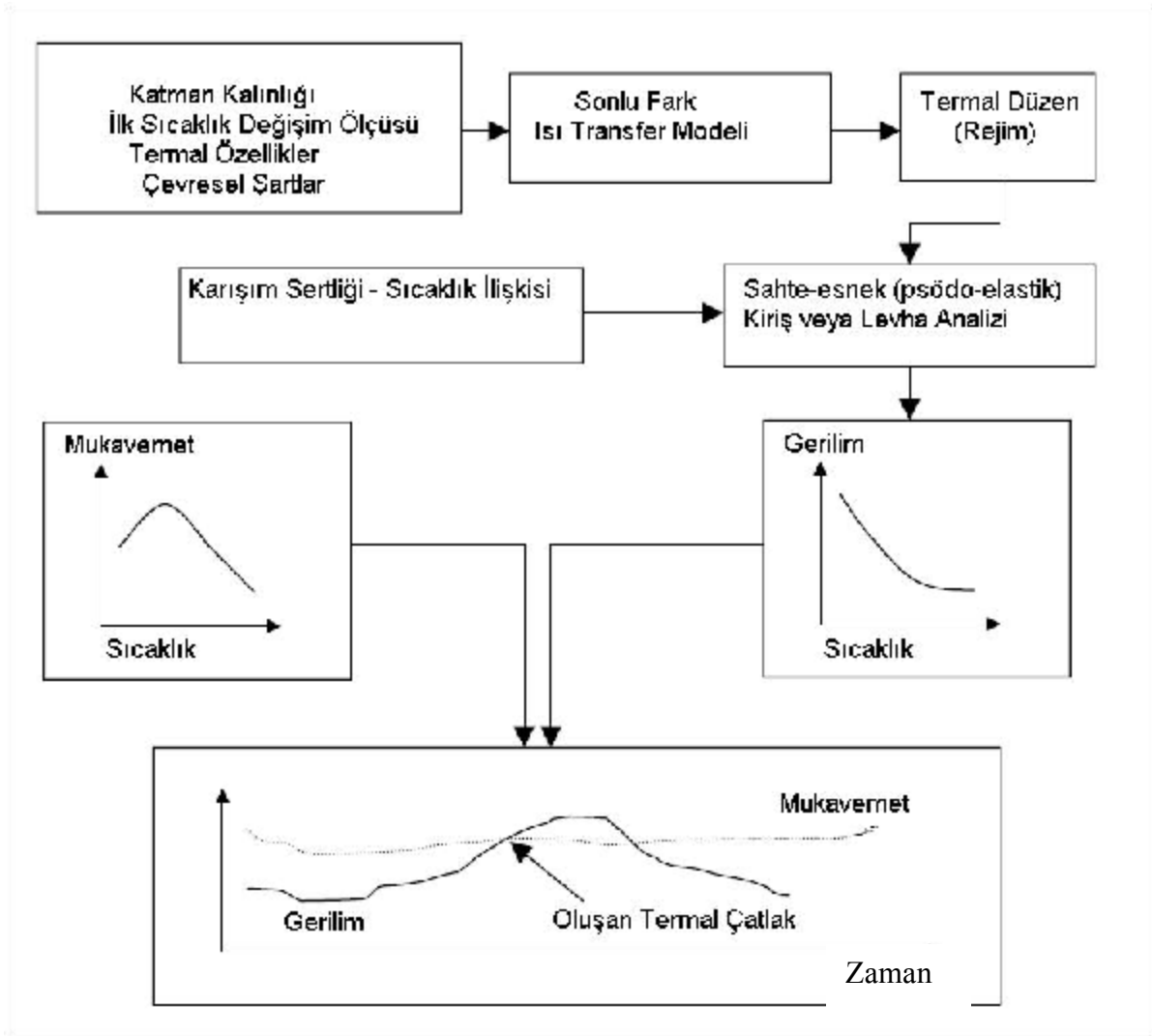
COLD'un birincil bileşeni, Şekil 5.10'un esasında gösterildiği gibi zamana karşı kuvvet ve gerilimi süperpoze etmektedir. Mukavemetin aşıldığı durumlarda çatlak oluşacağı varsayılır. Önceki iki model gibi, COLD üstyapıda oluşması beklenen çatlağın miktarını tam olarak tahmin edemez. Ancak, Utah'da yapılan bir saha doğrulama çalışması, çatlama ihtimaliyle beklenen çatlama miktarı arasında deneysel bir bağ kurmaktadır.

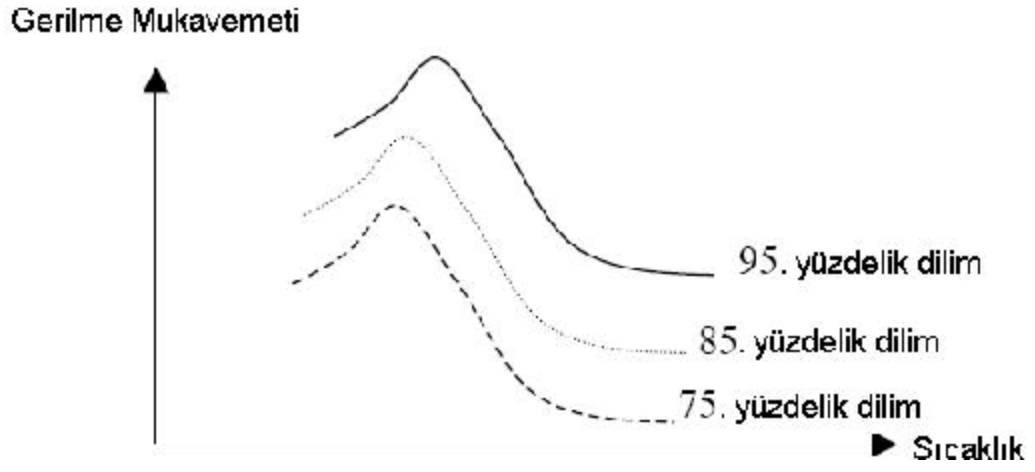
---

<sup>6</sup> Christison, J.T., Murray, D.W. and Anderson, K.O., "Stress Prediction and Low Temperature Fracture Susceptibility of Asphaltic Concrete Pavements," Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 41, 1972, pp. 494-523.

COLD'un diğer birincil bileşeni, Şekil 5.11'de gösterildiği gibi, sıcaklık ilişkisine karşı gerilme mukavemetinin gelişimidir. Bu, Hills ve Brien'in (1966) yaptığı gibi, laboratuvar testlerinden elde edilemez (düşük sıcaklıklarda dolaylı gerilme testi gibi). COLD, sıcaklıkla değişim gösteren gerilimi açıklayabilmektedir. Böylelikle, Şekil 5.12'de gösterildiği gibi değişik mukavemet yüzdelik dilimleri kullanılarak, analize güvenilirliği test etmek mümkündür. Sıcaklık eğrisine karşı daha düşük yüzdeli mukavemet kullanılarak daha yüksek bir güvenilirlik seviyesi elde edilebilir (Marasteanu vd., 2004).

Şekil 5.11 COLD yapısı (Marasteanu vd., 2004)





Şekil 5.12 Sıcaklıkla gerilme mukavemetini değişmesi (Marasteanu vd., 2004)

## 6 ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

### 6.1 Agrega

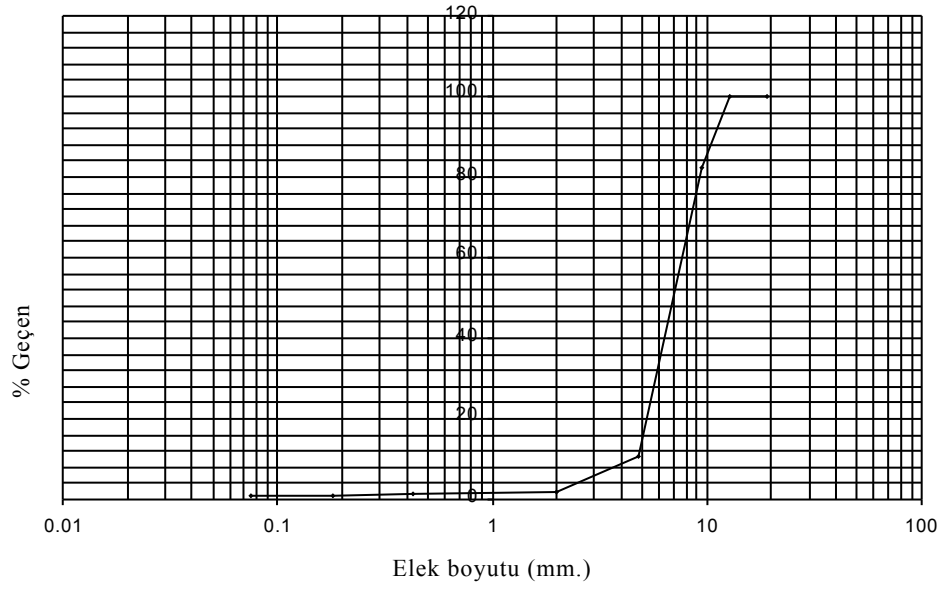
Çalışmada kullanılan agrega 1 nolu, 2 nolu ve taş tozu olmak üzere üç tip olup, İsfalt Ümraniye Asfalt Fabrikasından temin edilmiştir. Çalışma için kullanılacak olan bu agrega gruplarının elek analizleri ve temel fiziksel özellikleri tespit edilmiş ve aşağıda gösterilmiştir.

#### 6.1.1 Elek Analizleri ve Gradasyon Eğrileri

Aşağıda 1 nolu (kaba) agrega, 2 nolu (ince) agrega ve taş tozu agrega için düzenlenen elek analiz değerleri (Çizelge 6.1, 6.2, 6.3) ve bu değerler kullanılarak hazırlanan gradasyon eğrileri verilmiştir (Şekil 6.1, 6.2, 6.3).

Çizelge 6.1 No 1 (1/2" - No.4 ) Agrega için elek analizi ve gradasyon limitleri

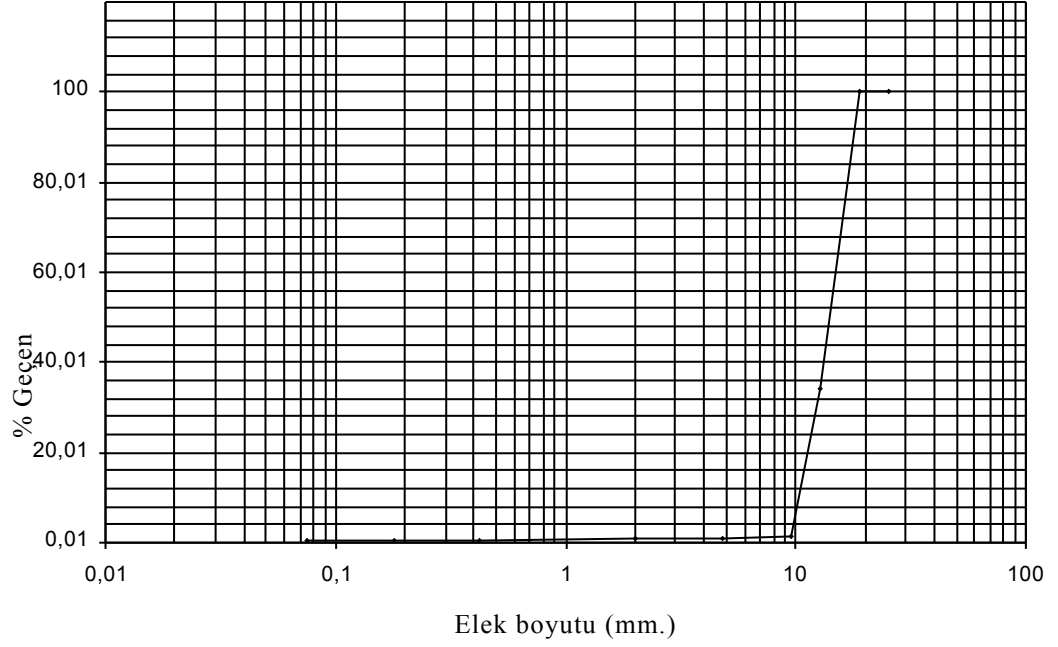
| Elek no<br>(inç)-(mm) | Gradasyon limiti<br>(% geçen için) | Kümülatif ağırlık<br>(gr) | Kümülatif olarak |         |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------|---------|
|                       |                                    |                           | % Kalan          | % Geçen |
| 1" - 25,4             |                                    |                           |                  |         |
| 3/4" - 19,1           | 100                                | 0,00                      | 0,00             | 100,00  |
| 1/2" - 12,7           | 95-100                             | 0,00                      | 0,00             | 100,00  |
| 3/8" - 9,52           | 50-90                              | 278,00                    | 17,80            | 82,20   |
| No.4 - 4,76           | 0-20                               | 1388,80                   | 89,10            | 10,90   |
| No.10 - 2,00          | 0-5                                | 1532,60                   | 98,30            | 1,70    |
| No.40 - 0,425         |                                    | 1540,40                   | 98,80            | 1,20    |
| No.80 - 0,180         |                                    | 1543,20                   | 99,00            | 1,00    |
| No.200 - 0,075        |                                    | 1544,50                   | 99,10            | 0,90    |
| Numune ağırlığı       | 1559,00 gr                         |                           |                  |         |



Şekil 6.1 No: 1 (1 1/2" - No.4 ) Agrega için gradasyon eğrisi

Çizelge 6.2 No: 2 (3/4" - 1/2") Agrega için elek analizi ve gradasyon limitleri

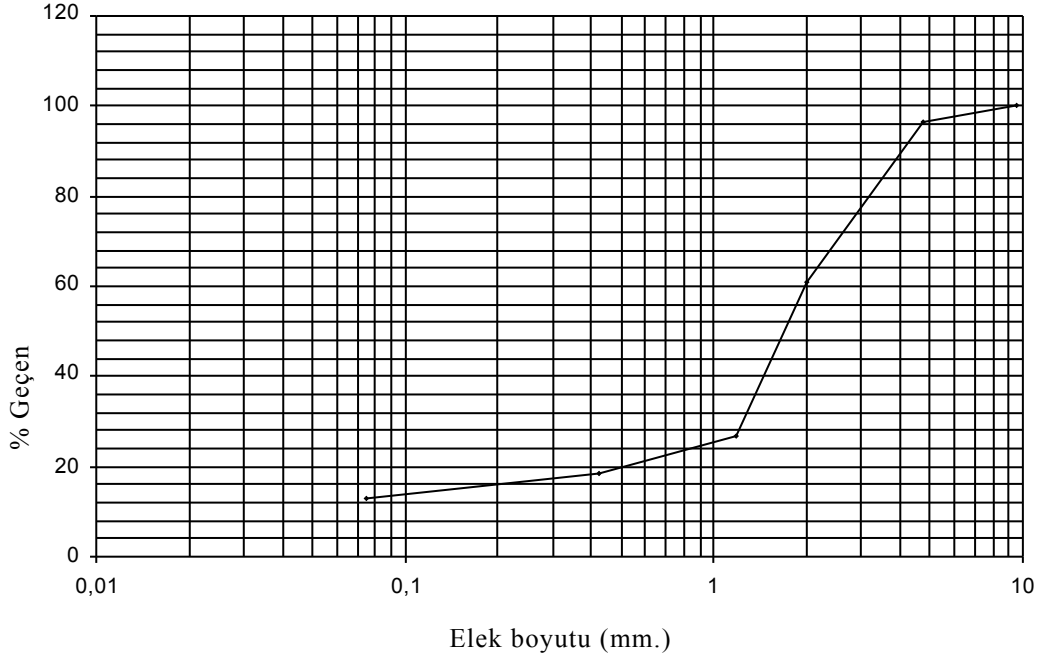
| Elek no<br>(inç)-(mm) | Gradasyon limiti<br>(% geçen için) | Kümülatif ağırlık<br>(gr) | Kümülatif olarak |         |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------|---------|
|                       |                                    |                           | % Kalan          | % Geçen |
| 1" - 25,4             | 100                                | 0,00                      | 0,00             | 100,00  |
| 3/4" - 19,1           | 95-100                             | 0,00                      | 0,00             | 100,00  |
| 1/2" - 12,7           | 10-50                              | 1003,20                   | 66,00            | 34,00   |
| 3/8" - 9,52           | 0-10                               | 1494,90                   | 98,40            | 1,60    |
| No.4 - 4,76           | 0-5                                | 1504,50                   | 99,00            | 1,00    |
| No.10 - 2,00          |                                    | 1506,80                   | 99,20            | 0,80    |
| No.40 - 0,425         |                                    | 1510,30                   | 99,40            | 0,60    |
| No.80 - 0,180         |                                    | 1511,70                   | 99,50            | 0,50    |
| No.200 - 0,075        |                                    | 1512,40                   | 99,50            | 0,50    |
| Numune ağırlığı       | 1519,40 gr                         |                           |                  |         |



Şekil 6.2 No: 2 (3/4" - 1/2" ) Agrega için gradasyon eğrisi

Çizelge 6.3 Taş Tozu (No.4 - 0,00 ) Agrega için elek analizi ve gradasyon limitleri

| Elek no<br>(inç)-(mm) | Gradasyon limiti<br>(% geçen için) | Kümülatif ağırlık<br>(gr) | Kümülatif olarak |         |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------|---------|
|                       |                                    |                           | % Kalan          | % Geçen |
| 1" - 25,4             |                                    |                           |                  |         |
| 3/4" - 19,1           |                                    |                           |                  |         |
| 1/2" - 12,7           |                                    | 0,00                      | 0,00             | 100,00  |
| 3/8" - 9,52           | 100                                | 0,00                      | 0,00             | 100,00  |
| No.4 - 4,76           | 90-100                             | 37,90                     | 3,50             | 96,50   |
| No.10 - 2,00          | 50-90                              | 431,70                    | 39,30            | 60,70   |
| No.40 - 0,425         | 20-50                              | 804,20                    | 73,30            | 26,70   |
| No.80 - 0,180         | 10-30                              | 894,50                    | 81,50            | 18,50   |
| No.200 - 0,075        | 8-18                               | 954,40                    | 87,00            | 13,00   |
| Numune ağırlığı       | 1097,10 gr                         |                           |                  |         |



Şekil 6.3 Taş Tozu (No.4 - 0,00 ) Agrega için gradasyon eğrisi

#### 6.1.2 Agrega Özgül Ağırlıkları ve Su Absorbsiyon Değerleri

Her üç tip agrega için özgül ağırlık ve su absorpsiyon değerleri hesaplanmıştır. Aşağıda hesaplanan bu değerler gösterilmiştir (Çizelge 6.4, 6.5, 6.6).

Çizelge 6.4 Kaba agrega için özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu hesabı

| Formül                       | Malzeme durumu                                              | Değerler |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------|
| A                            | Kurutulmuş malzeme ağırlığı (gr)                            | 1193,10  |
| B                            | Doygun yüzey kuru malzeme ağırlığı (gr)                     | 1200,00  |
| C                            | Doygun yüzey malzemenin sudaki ağırlığı (gr)                | 757,50   |
| $A / (B-C)$                  | Kuru özgül ağırlık ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )              | 2,696    |
| $B / (B-C)$                  | Doygun yüzey kuru özgül ağırlık ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) | 2,712    |
| $A / (A-C)$                  | Zahiri özgül ağırlık ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )            | 2,739    |
| $\frac{(B-A)}{A} \times 100$ | % Absorbsiyon                                               | 0,58     |

Çizelge 6.5 İnce Agrega için özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu hesabı

| Formül                       | Malzeme durumu                                        | Değerler |
|------------------------------|-------------------------------------------------------|----------|
| A                            | Kurutulmuş malzeme ağırlığı (gr)                      | 494,10   |
| B                            | Doygun yüzey kuru malzeme ağırlığı (gr)               | 500,00   |
| C                            | Volumetrik kap + Su + İnce Agrega (gr)                | 1007,54  |
| D                            | Volumetrik kabın su dolu ağırlığı (gr)                | 693,35   |
| E                            | Volumetrik kabın boş ağırlığı (gr)                    | 195,55   |
| $A / (B+D-C)$                | Kuru özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )              | 2,659    |
| $B / (B+D-C)$                | Doygun yüzey kuru özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2,691    |
| $A / (A+D-C)$                | Zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )            | 2,746    |
| $\frac{(B-A)}{A} \times 100$ | % Absorpsiyon                                         | 1,19     |

Çizelge 6.6 Filler malzemenin özgül ağırlık hesabı

| Formül        | Malzeme durumu                      | Değerler |
|---------------|-------------------------------------|----------|
| A             | Numune ağırlığı (gr)                | 20,00    |
| B             | Kap ağırlığı (gr)                   | 185,60   |
| C             | Kap + Su ağırlığı (gr)              | 469,24   |
| D             | Kap + Su + Numune ağırlığı (gr)     | 482,57   |
| $A / (A+C-D)$ | Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2,999    |

### 6.1.3 Agrega Karışımın Tasarlanması

Çalışma kapsamında mevcut tipteki agregalardan oluşturulan karışım, Yollar Fenni Şartnamesi Tip-2 karışım yüzdeleri ile belirlenmiştir (Çizelge 6.7). Şartname yüzdeleri ile oluşturulan karışım için her agregat tipinin elek analiz değerlerinden faydalanılarak, elekler için gereken malzeme yüzdeleri tespit edilmiştir.

Çizelge 6.7 Tip-2 için karışım yüzdeleri

| Malzeme        | Karışım içindeki yüzdesi |
|----------------|--------------------------|
| 2 nolu agregat | 15                       |
| 1 nolu agregat | 40                       |
| Taş tozu       | 45                       |
| Kum            | 0                        |

Agrega karışımı için gerekli olan yüzdelerde malzemeler alınarak, karışım oluşturulmuş ve

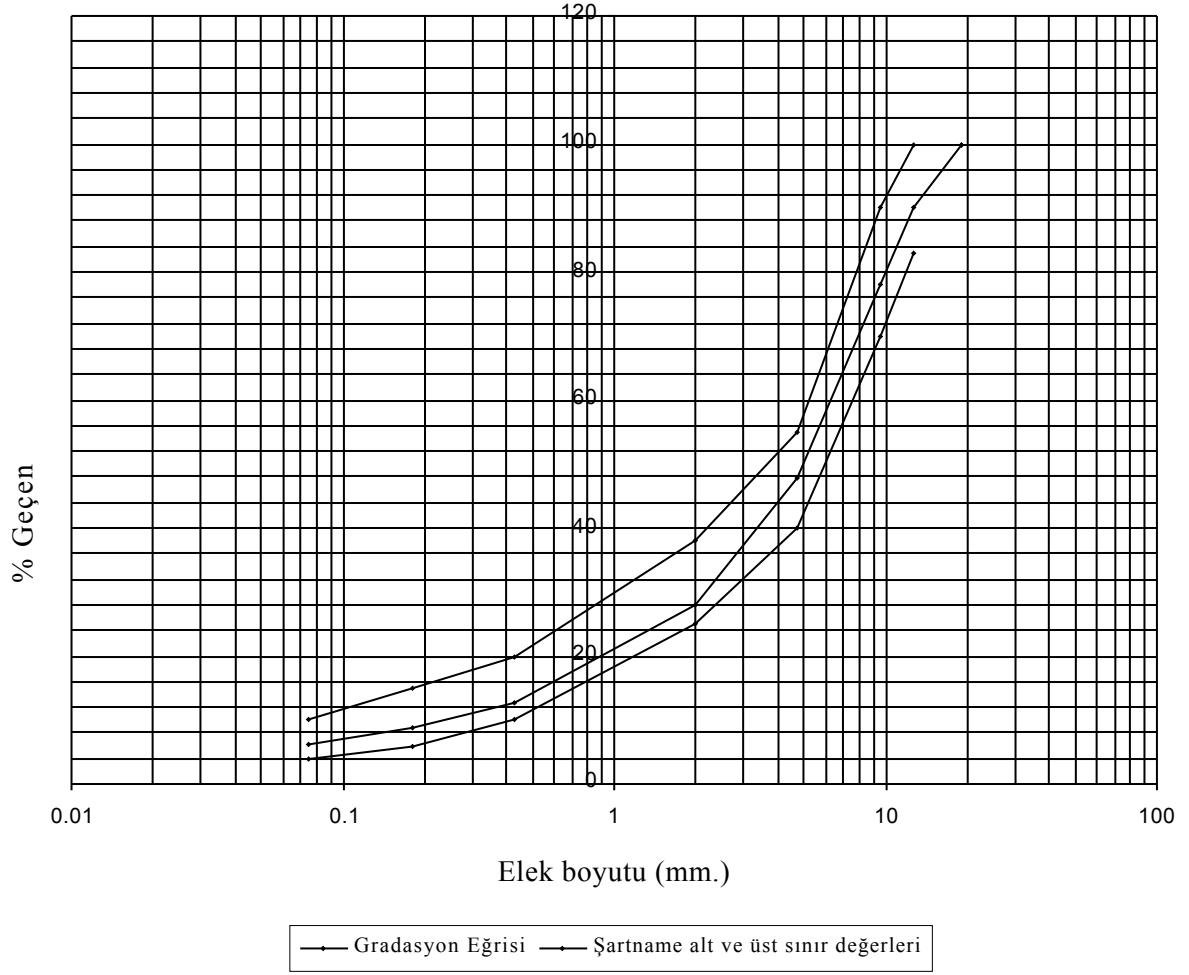
elek numaralarına göre analiz sonucunda geçen miktar yüzdeleri yazılmıştır (Çizelge 6.8). Oluşturulan karışımın elek analiz değerleri, şartname değerleri ile kıyaslanmıştır (Çizelge 6.9). Buna bağlı olarak karışımın gradasyon eğrisi oluşturulmuştur. Nitekim bu eğri mevcut şartname değerlerinin minimum ve maksimum sınır değerleri için oluşturulan eğriler arasında kalmıştır.

Çizelge 6.8 Değişik tipteki malzemelerin belirlenen elek analiz sonuçları

| Elek no | 2 nolu agrega<br>(% geçen) | 1 nolu agrega<br>(% geçen) | Taş tozu<br>(% geçen) | Kum<br>(% geçen) |
|---------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|
| 3/4"    | 100,00                     | 100,00                     | 100,00                | 00,00            |
| 1/2"    | 25,00                      | 100,00                     | 100,00                | 00,00            |
| 3/8"    | 1,60                       | 72,20                      | 100,00                | 00,00            |
| No.4    | 1,00                       | 10,90                      | 96,20                 | 00,00            |
| No.10   | 0,80                       | 1,70                       | 59,80                 | 00,00            |
| No.40   | 0,60                       | 1,20                       | 24,40                 | 00,00            |
| No.80   | 0,50                       | 1,00                       | 16,90                 | 00,00            |
| No.200  | 0,50                       | 0,90                       | 12,40                 | 00,00            |

Çizelge 6.9 Hazırlanan agrega karışımı için elek analizi ve şartname değerleri

| Elek no | 2 nolu agregadan<br>alınan (%) | 1 nolu agregadan<br>alınan (%) | Taş tozundan<br>alınan (%) | Karışım | Şartname |
|---------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------|----------|
| 3/4"    | 15,00                          | 40,00                          | 45,00                      | 100,00  | 100      |
| 1/2"    | 3,70                           | 40,00                          | 45,00                      | 88.7    | 83-100   |
| 3/8"    | 0,20                           | 28,90                          | 45,00                      | 73.9    | 70-90    |
| No.4    | 0,20                           | 4,40                           | 43,30                      | 47.9    | 40-55    |
| No.10   | 0,10                           | 0,70                           | 26,90                      | 27.7    | 25-38    |
| No.40   | 0,10                           | 0,50                           | 11,00                      | 11.6    | 10-20    |
| No.80   | 0,10                           | 0,40                           | 7,60                       | 8.1     | 6-15     |
| No.200  | 0,10                           | 0,40                           | 5,60                       | 6.1     | 4-10     |



Şekil 6.4 Agrega karışımı için gradasyon eğrisi ve şartname eğrileri ile kıyaslama

## 6.2 Bitüm

Çalışma kapsamında Tüpraş rafinerisinden temin edilen AC 60/70 asfalt çimentosu bağlayıcısı kullanılmıştır (Şekil 6.5). Daha önce yapılmış deneyler ışığında optimum bitüm muhtevası agregaya karışımının % 4,73'ü (54,4 gr) olarak belirlenmiştir. Bu bağlayıcıya ait olan önemli özellikler ve kriterler aşağıda gösterilmiştir (Çizelge 6.10).



Şekil 6.5 Çalışmada kullanılan AC 60/70 bağlayıcı

Çizelge 6.10 Çalışmada kullanılan bağlayıcının karakteristiği

| Deneyin adı                                                                          | Birim              | Değeri            | Şartname değeri |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| Özgöl ağırlık                                                                        | gr/cm <sup>3</sup> | 1,019             | ---             |
| Parlama noktası<br>(Cleveland açık kap, °C)                                          | °C                 | 310               | > 230           |
| Penetrasyon<br>(25 °C, 100 gr, 5 sn)                                                 | pen                | 63,7 ± 1,1        | 60-70           |
| Düktilite<br>(25 °C, 5 cm/dak, cm olarak)                                            | cm                 | 100 cm'de kopmadı | > 100           |
| İnce film halinde<br>Isıtma kaybı<br>(3,2 mm, 163 °C, 5 saat, ağırlık kaybı yüzdesi) | %                  | 0,1               | < 0,8           |
| Isıtma kaybı sonrası penetrasyon<br>(Oriijinalin yüzdesi olarak)                     | %                  | 58,6              | > 54,0          |
| Isıtma kaybı sonrası düktilite<br>(25 °C, 5 cm/dak, cm olarak)                       | cm                 | 100 cm'de kopmadı | > 50            |
| Yumuşama noktası<br>(Halka-bilya ile, °C olarak)                                     | °C                 | 49,0 ± 0,707      | 45-55           |

### 6.3 Sönmüş Kireç

Bu çalışmada, gradasyonu belirlenen agrega karışımından %2 (23 gr), %4 (46 gr), %6 (69 gr), oranlarda filler malzemesi eksiltilerek, yerine aynı oranlarda sönmüş kireç ilave edilmiştir. Kullanılmış olan sönmüş kirecin özellikleri aşağıda belirtilmektedir (Çizelge 6.11).

Çizelge 6.11 Çalışmada kullanılan sönmüş kirecin karakteristiği

| Söndürülmüş Toz Kireç (Ca(OH) <sub>2</sub> ) |                    |          |
|----------------------------------------------|--------------------|----------|
| Özellikler                                   | Deney Yöntemi      | Oran (%) |
| Toplam CaO ( % )                             | EN 459-2 Mad. 4.2. | 85,78    |
| Aktif Ca(OH) <sub>2</sub> ( % )              | TS 32 Mad. 1.1.3.  | 82,04    |
| MgO ( % )                                    | EN 459-2 Mad. 4.3  | 3,52     |
| Toplam CaO+MgO ( % )                         | TS                 | 89,3     |
| Kızdırma Kaybı ( % )                         | En 459-2 Mad. 4.5. | 22,51    |
| Asitte Çözünmeyen ( % )                      | TS 32 Mad. 1.1.5.  | 1,41     |
| R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( % )          | TS 32 Mad. 1.1.9.  | 0,47     |
| SO <sub>3</sub> ( % )                        | EN 459-2 Mad. 4.6. | 1,47     |
| CO <sub>2</sub> ( % )                        | EN 459-2 Mad. 4.4. | 3,89     |
| Fiziksel Özellikler                          |                    |          |
| İncelik-90 mikron üzeri (%)                  | EN 459-2 Mad. 5.2. | 6,0      |
| Yoğunluk gr/dm <sup>3</sup>                  | EN 459-2 Mad. 5.8. | 472      |

## 7 ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEYLER

### 7.1 Marshall Stabilitesi Deneyi

Bu deneyin amacı, maksimum dane büyüklüğü 25 mm`ye kadar olan iri agregaya içeren kaplama karışımlarının, Marshall Metodu ile boşluk oranı, özgül ağırlık, stabilite ve akma değerlerinin bulunarak, en uygun karışım hesabının yapılması ve bu kaplamalara ait imalat ve sonrası için gerekli bilgilerin elde edilmesidir. Hazırlanan karışımların hesaplanan ve ölçülen tüm özellikleri, (optimum bitümlü karışımlar için) Çizelge 7.1`de verilen Marshall karışım tasarım kriterlerine göre değerlendirilmektedir.

Çizelge 7.1 Marshall karışım dizayn kriterleri

| Marshall metodu<br>karışım kriterleri | Hafif trafik |       | Orta derecede<br>trafik |       | Ağır trafik |       |
|---------------------------------------|--------------|-------|-------------------------|-------|-------------|-------|
|                                       | Min.         | Maks. | Min.                    | Maks. | Min.        | Maks. |
| Marshall stabilitesi, kg              | 334          | -     | 534                     | -     | 800         | -     |
| Akma, A, 1/100 inc.                   | 2            | 4.5   | 2                       | 4     | 2           | 3.5   |
| Hava boşluğu, P <sub>a</sub> , %      | 3            | 5     | 3                       | 5     | 3           | 5     |
| Asfaltla dolu hava<br>boşluğu, VFA, % | 70           | 80    | 65                      | 78    | 65          | 75    |

#### 7.1.1 Agregaya Karışımı Tartım Değerlerinin Belirlenmesi

Mevcut olan üç farklı (kaba, normal, ince) tipteki agregaya ve tip 2 için belirlenmiş olan karışım oranları ile şartname aralığında gradasyon tespiti yapılmıştır.

Elekt boyutlarına karşılık gelen malzeme yüzdeleri yardımıyla, Marshall numunelerinin hazırlanması için kullanılacak olan 1150 gr sabit ağırlıktaki agregaya karışımının oluşturulması gerekmektedir. Bunun için 1150 gr briket numunesine karşılık gelen her elekt boyutundaki malzeme ağırlıkları eklenerek, agregaya karışımı oluşturulur. Tartımın kolay ve hatasız yapılabilmesi için, en kaba malzemeden en ince malzemeye kadar yüzde oranları ile tespit edilen miktarlar kümülatif olarak toplanır ve tablo oluşturularak belirlenir. Daha sonra bu değerler ile yapılan ve her elekt arası malzemeyi içeren toplam 1150 gr`lık karışımlar oluşturulur ve deney için hazır hale getirilir (Şekil 7.1).



Şekil 7.1 Marshall briketleri için hazırlanan 1150 gramlık agreg a karışım numuneleri

#### 7.1.2 Farklı Kireç Yüzdelerine Göre Agreg a Karışım larının Hazırlanması

Agreg a karışım ları hazırlanırken dört çeşit karışım oluşturulur. Birinci karışım yukarıda belirtildiği şekilde kireç katkısız olarak hazırlanır. Diğer karışım lara filler malzemesi yerine sırasıyla %2, %4 ve %6 karışım yüzdeleri için belirlenen 23 gr, 46 gr, 69 gr ağırlıklarında sönmüş kireç eklenir. Tartım işleminden sonra Marshall briketlerinin hazırlanmasına geçilir. Bunun için dört çeşit karışım dan altışar adet numune hazırlanır.

Karışım ın oluşturulması daha önce Marshall deneyinde anlatılan standartlarda yapılmıştır. Farklı kireç katkı yüzdelerinin kullanılması, karışım ın özellikleri, stabilitesi ve akma üzerindeki değişimlerin de bir göstergesi niteliği taşıyacaktır.

#### 7.1.3 Sıcak Karışım ların Optimum Bitüm Muhtevası

Sıcak karışım ların oluşturulmasında optimum bitüm muhtevasının değeri karışım performansına doğrudan etki eden en önemli faktörlerden biridir. Nitekim karışım içindeki optimum bitüm muhtevası, daha önce İsfalt A.Ş tarafından yapılmış deneylerde elde edilen veriler ışığında, agreg a karışım ının % 4,73`ü (54,4 gr) olarak belirlenmiştir.

#### 7.1.4 Deney Numunelerin Hazırlanması

Marshall numunelerinin hazırlanması için dizayn edilmiş olan agreg a karışım ından, belli elekler için belli miktarlar alınarak yaklaşık 1150 gr etüve konur ve karışım sıcaklığına (28 °C ve üzeri) kadar ısıtılır. Bu sırada bitümlü bağlayıcı da aynı şekilde ısıtılarak karışım sıcaklığına getirilir. Karışım sıcaklığına erişen agreg a alınarak homojen hale gelinceye kadar karıştırılır. Sonra ortasına bir çukur açılarak karışım sıcaklığına gelmiş bağlayıcıdan belirlenen miktar bu çukura konur ve agreg a bitümlü madde ile tamamen kaplanıncaya kadar karıştırılır (Şekil 7.2).



Şekil 7.2 Değişik kireç yüzdelere göre karışımların hazırlanması

Karışımdan sonra, sıkıştırma sıcaklığından yaklaşık 10 °C daha yüksek sıcaklığa ayarlanmış bir etüvde kür tamamlanıncaya kadar havalandırılır (Yeterli kür, sıvı petrol asfaltı çözücüsünün %50'sinin uçtuğu andır).

Kür tamamlandıktan sonra sıkıştırma işlemine geçilir. Bu işlemden önce kalıplar (Şekil 7.3) iyice temizlenir ve tokmağın sıkıştırma kafasında artık malzeme olmamasına dikkat edilmelidir. Sıkıştırma tokmağı (Şekil 7.4) 90 ila 150 °C kadar ısıtılır. Malzeme konmadan önce numune kalıbının dibine bir filtre kağıdı konur. Hazırlanan karışım kalıba aktararak 15 defa kenardan ve 10 defa ortadan spatula ile şişlenir. Kalıp tutucusu yerine yerleştirilerek üzerine filtre kağıdı konur ve tokmak 457 mm'den serbest olarak düşürülerek, otoyol için 75, normal yollar için 50 darbelik sıkıştırma yapılır. Daha sonra numune ters çevrilerek öbür yüzüne de aynı sıkıştırma uygulanır ve briket haline getirilir.

Yeterli stabiliteye erişmesi için, numuneler sıkıştırma işleminden hemen sonra kalıptan çıkarılmaz. Gerekli bir zaman soğuduktan sonra, kalıptan numune çıkarıcısı yardımıyla çıkarılır ve bir gece laboratuvar sıcaklığında bekletilir.



Şekil 7.3 Marshall numune kalıpları



Şekil 7.4 Marshall tokmağı

#### 7.1.5 Hazırlanan Numunelerin Yükseklik ve Hacimlerinin Belirlenmesi

Standart briket yüksekliği 63,5 mm olup mukavemet değeri bu standart yüksekliğe göre değerlendirilir. Standart briket yüksekliğine karşılık gelen katsayı 1'dir. Yüksekliğin 63,5 mm'den büyük olduğu durumda bu katsayı azalır, 63,5 mm'den küçük olduğu durumda yükselir. Briketin ölçülen stabilitesi ile numunenin yüksekliğine bağlı katsayının çarpımı, 63,5 mm yüksekliğindeki (standart) briketeye göre düzeltilmiş stabilite değerini verir. Bunun için bir setteki her briketin değişik yerlerinden üç okuma alınır ve bu okumaların ortalaması briket yüksekliği olarak Marshall deney formuna kaydedilir (Şekil 7.5).

Yükseklikleri belirlenen numunelerin, önce havada sonra sudaki ağırlıkları hassas bir şekilde tartılarak belirlenir (Şekil 7.5). Briketin hacmi, briketin havadaki ağırlığından sudaki ağırlığının çıkarılması ile elde edilir.

$$V = B - C \quad (7.1)$$

V: Briketin hacmi (cm<sup>3</sup>)

B : Briketin havadaki ağırlığı (gr)

C : Briketin sudaki ağırlığı (gr)



Şekil 7.5 Briketlerin yükseklik ölçümü, havada ve suda tartımları

#### 7.1.6 Numunelerin Stabilite ve Akma Değerlerinin Tespiti

Asfalt çimentosuyla hazırlanmış numunelerin yarısı (kalan yarısı koşullandırılmak üzere ayrılır) sıcaklığı 60±1 °C olan su banyosunda 30-40 dakika tutulur. Kırma kafasının, kırılacak numunenin sıcaklığına bağlı olarak 20 ila 40 °C sıcaklık arasında olması sağlanır. Sonra briket, kırma kafasının alt başlığı üzerine yerleştirilir. Akma ölçme aleti kırma kafası üzerinde bulunan yerine düzgünce yerleştirilir ve sıfırlanır. Numunelere Marshall Yükleme Cihazı ile yükleme yapılır (Şekil 7.6). Yükleme 51 mm/dk'lık sabit bir deformasyon hızıyla, en büyük yük değerine erişinceye kadar devam eder. En büyük yük değeri aynı zamanda numunenin stabilitesini ifade eder. En büyük yük değerine eriştiği anda akma aleti (flowmetre) yerinden çıkarılır ve akma değeri kaydedilir. Bu okuma, 0,25 mm (1/100 inch) biriminde ifade edilen numunenin akma değerini vermektedir. Örneğin numune 3,8 mm deforme olmuş ise, o numunenin akma değeri 15' dir.

Numunenin su banyosundan çıkarılması ile başlayan ve hem stabilite hem de akma deneylerine ilişkin tüm işlemler tümü 30 saniye içerisinde bitirilmelidir.



Şekil 7.6 Marshall yükleme cihazı

#### 7.1.7 Koşullandırılmış Numunelerin Stabilite ve Akma Değerlerinin Tespiti

Marshall stabilitesi ve akma tespitinde hazırlanan numunelerin yarısı ortam sıcaklığından alınıp 60 °C su banyosunda yaklaşık 30 dakika bekletilip, aynı sıcaklıkta ve standartta numuneler elde edildikten sonra deney uygulamasına geçiliyordu. Burada ise aynı standartlar ve yöntemlerle elde edilen numunelerin kalan yarısının, bir süre şartlandırma sürecinden geçirildikten sonra, Marshall yükleme cihazında deneye tabii tutulması söz konusudur.

Daha önce koşullandırılmak üzere ayrılan briketler, iklim koşullarına bağlı olarak kaplamalar üzerinde oluşabilecek su tesirinin laboratuvar ortamında sağlanarak etki ettirilmesi için, 1 gün boyunca 60 °C su banyosunda tutulur (Şekil 7.7). Su banyosundan sonra, 24 saat süre ile ortam sıcaklığında bekletilip kuruması sağlanır. Sonra da sabit numune sıcaklığında Marshall yükleme cihazı ile daha önce açıklandığı gibi yük tesirine maruz bırakılarak stabilite ve akma değerleri belirlenir.



Şekil 7.7 Marshall numunelerinin su banyosunda koşullandırılması

#### 7.1.8 Numunelerin Özgül Ağırlık ve Boşluk Oranı Değerlerinin Belirlenmesi

Yukarıda da ayrıntılı olarak açıklandığı gibi, Marshall deneyine tabii tutulan numunelerin yükseklikleri, havadaki ağırlıkları, sudaki ağırlıkları hesaplanarak stabilite ve akma değerleri okunur. Daha sonra, karışım içerisindeki agrega ve kireç miktarlarına bağlı olarak numunelerin teorik ve pratik özgül ağırlıkları, boşluk yüzdeleri, agregalar arası boşluk yüzdeleri ve asfaltla dolu boşluk yüzdeleri belirlenir.

Pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ): Briketin havadaki ağırlığının hacmine oranıdır.

$$D_p = \frac{A}{V} \quad (7.2)$$

$D_p$ : Briketin pratik özgül ağırlığı ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ),

$A$ : Briketin havadaki ağırlığı ( $\text{gr}$ ),

$V$ : Briketin hacmi ( $\text{cm}^3$ )

Bitüm yüzdeleri aynı olan (aynı setteki) briketlerin hacim özgül ağırlıkları arasındaki fark 0,02 den fazla olmamalıdır.

Maksimum teorik özgül ağırlık ( $D_t$ ): Agreg ağırlığına göre bitüm yüzdesi cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D_t = \frac{100 + W}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (7.3)$$

$D_t$  : Briketin teorik özgül ağırlığı ( $\text{gr/cm}^3$ ),

$W_a$  : Agreg ağırlığına göre bitüm yüzdesi (%),

$G_{ef}$  : Agreganın efektif özgül ağırlığı ( $\text{gr/cm}^3$ ),

$G_b$  : Bitümün özgül ağırlığı ( $\text{gr/cm}^3$ )

Toplam boşluk hacmi ( $V_h$ ): Briketlerde ki toplam boşluk hacmi olarak tanımlanır. Toplam hacmin yüzdesi olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V_h = \frac{D_t - D_p}{D_t} \quad (7.4)$$

$V_h$  : Numunedeki boşluk hacmi (%),

$D_t$  : Teorik özgül ağırlık ( $\text{gr/cm}^3$ ),

$D_p$  : Pratik (ölçülen) özgül ağırlık ( $\text{gr/cm}^3$ )

Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA): Asfaltla dolu boşluk yüzdesi, efektif bitüm miktarı dışında kalan bitümün doldurduğu boşluk olarak tanımlanır ve toplam hacmin yüzdesi olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$VFA = \frac{V_b}{V_b + V_h} \quad (7.5)$$

VFA : Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (%),

$V_b$  : Numunedeki bitüm hacmi ( $\text{cm}^3$ ),

$V_h$ : Numunedeki boşluk hacmi (%)

Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA): Efektif bitüm miktarını ve hava boşluğunu içeren sıkıştırılmış kaplama karışımının agreg ağırlıkları arasındaki boşluk olarak tanımlanır ve toplam hacmin yüzdesi olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$VMA = 100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + W_a} \times 100 \quad (7.4)$$

VMA : Agregalar arası boşluk yüzdesi (%)

$D_p$  : Briketin pratik özgül ağırlığı ( $\text{gr/cm}^3$ )

$G_{sb}$  : Agreganın özgül ağırlığı ( $\text{gr/cm}^3$ )

$W_a$  : Agreg ağırlığına göre bitüm yüzdesi (%)

### 7.1.9 Deney Verilerinin Yorumlanması

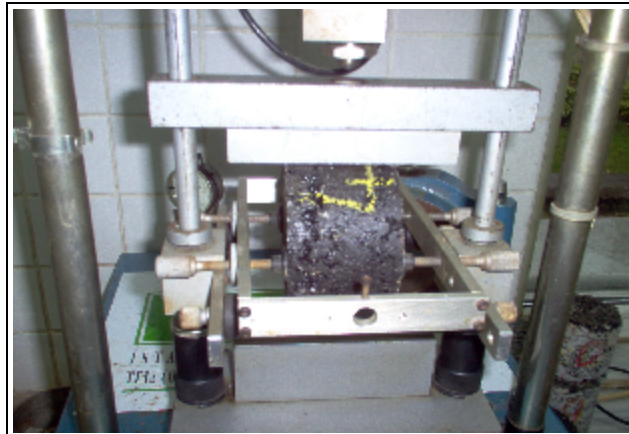
Marshall stabilitesi deneyi tamamlandıktan ve gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra, elde edilen verilerin yorumlanmasına geçilir. Öncelikle, numunelerdeki kireç miktarlarına göre yukarıda hesaplanan değerlerin değişim grafikleri çizilir. Grafikler yardımıyla farklı kireç yüzdelere karşılık gelen stabilite, akma, pratik (ölçülen) özgül ağırlık, boşluk oranı, agregalar arası boşluk oranı ve asfaltla dolu boşluk oranı değerleri okunur. Okunan bu değerler ışığında kirecin karışıma etkisi ve hazırlanan dört farklı karışım arasında en ideal kireç katkı oranı belirlenir.

### 7.2 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

Bu metot bitümlü karışımların dolaylı çekme mukavemeti özelliklerinin tespitini içerir. Dolaylı çekme mukavemeti, bitümlü karışımların sıcaklık ve yorulmadan dolayı oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder. Deney sonucunda bulunan dolaylı çekme mukavemeti değeri, bitümlü karışımların bozulma deformasyonu, termal ve yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm muhtevasının belirlenmesinde kullanılır (Ilıcalı, 2001).

Marshall stabilitesi için hazırlanan numunelerin imal şekline uygun olarak üretilen ve yarısı koşullandırılan numuneler, bu deney için de kullanılmaktadır. Burada Marshall Stabilite deneyinde kullanılan numunelerden farklı olarak her bir karışım için 10`ar adet numune üretilmiştir.

Karışım numunesine dik doğrultuda; sabit bir deformasyon altında bozuluncaya kadar bir basınç yükü uygulanır (Şekil 7.8). Deney aşamasında bozulma, uygulanan yükte bir artışın olmadığı veya en büyük yükün olduğu zamandaki durum olarak tanımlanır. Numunenin dayanım göstermiş olduğu en büyük yük dolaylı çekme mukavemeti olarak alınır.



Şekil 7.8 Dolaylı çekme mukavemeti deneyinin uygulandığı Marshall numunesi

Dolaylı çekme mukavemeti ve bozulma deformasyonu değerleri, özellikle üstyapı tasarımında ve bitümlü karışımın kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılır. Bu deneyden elde edilen bu değerler, karışımın sıcaklık, nem ve farklı dingil yükleri karşısında göstermiş olduğu davranış hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılabilir (Ilıcalı, 2001).

Deney sonucunda ulaşılan bulgular, numune alanlarının tespit edilebilmesinden hareket edilerek, gerilme cinsinden yazılır ve değerlendirmeler yapılır.

#### 7.2.1 Düşük Sıcaklıktaki (5 °C) Numuneler İçin Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

Bu yöntem, yarısı (60 °C sıcaklıktaki suda bir gün boyunca tutularak) koşullandırılan briketlerin, bir gün boyunca düşük sıcaklıkta (5 °C) bekletildikten sonra dolaylı çekme mukavemeti özelliklerinin tespitini içerir. Bulunan dolaylı çekme mukavemeti değerleri bitümlü karışımların, yorulma, nem ve özellikle düşük sıcaklıktan dolayı oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder. Deney sonucunda bulunan dolaylı çekme mukavemeti değerleri, bitümlü karışımların düşük sıcaklık çatlaklarının oluşma potansiyelinin belirlenmesinde kullanılır.

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi için elde edilen (her karışım için 10`ar adet) ve kalıplarından çıkarılan asfalt briket numunelere çevresel tesirlerin laboratuvar ortamında uygulaması sağlanır. Bunun içinde numuneler, öncelikle 24 saatlik süre boyunca 60-65 °C etüvde bekletilir. Daha sonra aynı numunelerin bir kısmı oda sıcaklığında bekletilirken, bir kısmı da 1 gün boyunca 60 °C sıcaklıktaki su banyosunda tutulur. Oda sıcaklığında ve su banyosunda bekletilen bütün numuneler 24 saat süre ile düşük sıcaklıkta (5 °C) bekletilir. Son olarak düşük sıcaklıktaki numuneler, daha önce açıklandığı gibi yük tesirine maruz bırakılarak gerilme değerleri belirlenir.

## 8 ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEYLERİN SONUÇLARI

### 8.1 Agrega Karışımı Tartım ve Kireç Katkı Değerleri

Daha önce de belirtildiği gibi kireç katkısız ve karışımın %2, %4, %6 oranlarında kireç katkılı olmak üzere, dört çeşit ve toplam 104 adet karışım hazırlanmıştır. Aşağıda karışımlarda kullanılan agrega miktar ve oranları (Çizelge 8.1) ile dört tip karışım için, filler malzemesi yerine eklenen sönmüş kireç miktarları verilmektedir. (Çizelge 8.2).

Çizelge 8.1 Her bir karışım için gerekli malzeme miktarları

| Elek no | Elekte kalan malzeme miktarı (gr) | Kümülatif toplam (gr) | Yüzde oranı |
|---------|-----------------------------------|-----------------------|-------------|
| 1/2"    | 129,4                             | 129,4                 | 11,3        |
| 3/8"    | 170,8                             | 300,2                 | 26,1        |
| NO.4    | 299,2                             | 599,4                 | 52,1        |
| NO.10   | 232,3                             | 831,7                 | 72,3        |
| N0.40   | 184,5                             | 1016,2                | 88,4        |
| N0.80   | 40,9                              | 1057,1                | 91,9        |
| N0.200  | 22,2                              | 1079,3                | 93,9        |
| Filler  | 70,7                              | 1150                  | 100,0       |

Çizelge 8.2 Dört tip karışıma eklenen sönmüş kireç miktarları

| Agrega karışımı     | Karışım adedi | Karışımdaki kireç katkı miktarı (gr) |
|---------------------|---------------|--------------------------------------|
| Kireç katkısız (%0) | 26            | 0                                    |
| %2 kireç katkılı    | 26            | 23                                   |
| %4 kireç katkılı    | 26            | 46                                   |
| %6 kireç katkılı    | 26            | 69                                   |

## 8.2 Asfalt Karışımlara Kireç Katkısının Özgül Ağırlık ve Boşluk Oranlarına Etkisinin Tespiti (Marshall Metoduyla)

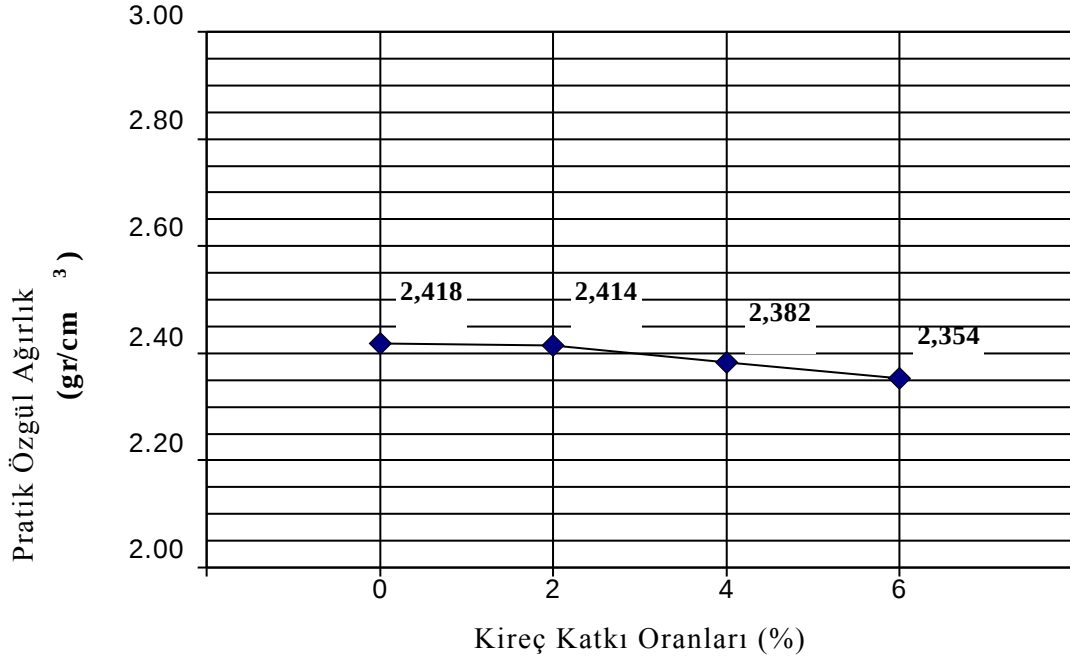
Bir önceki bölümde verilen formüller yardımıyla, Marshall Karışım Dizayn Metoduna göre hazırlanan numunelerin, tartım değerleri, hacimleri ve pratik özgül ağırlıkları ( $D_p$ ) hesaplanmıştır. Daha sonra, bu tartım ve özgül ağırlık değerleri kullanılarak numunelerin hava boşluğu yüzdesi ( $V_h$ ), agrega boşluk yüzdesi (VMA) ve asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA) değerleri hesaplanmış ve tablo haline getirilmiştir. Bu tabloda, dört farklı karışımda hazırlanan numunelerin hesaplanan ortalama özgül ağırlık ve boşluk oranı değerleri gösterilmiştir (Çizelge 8.3).

Çizelge 8.3 Hazırlanan numunelerin ortalama özgül ağırlık ve boşluk oranı deney verilerini gösteren rapor

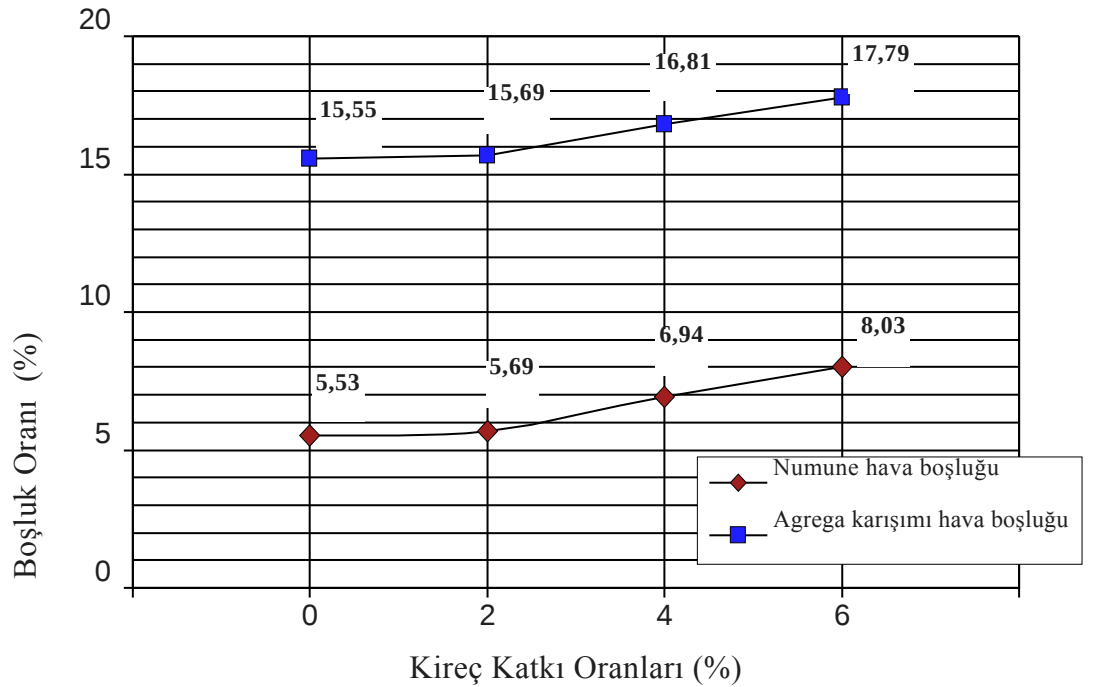
| MARSHALL DİZAYN RAPORU |              |                                         |                     |                          |                                            |                                                  | Rapor No :     | 128        |                          |
|------------------------|--------------|-----------------------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------|------------|--------------------------|
| Deneyin Adı :          |              | Özgül Ağırlık ve Boşluk Oranları Tayini |                     |                          |                                            |                                                  | Rapor Tarihi : | 19.06.2006 |                          |
| Kireç Katkı Oranları   | Ağırlık (gr) | Doy. Yüzey Ağırlık (gr)                 | Sudaki Ağırlık (gr) | Hacmi (cm <sup>3</sup> ) | Pratik Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> ) | Maks. Teorik Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> ) | Boşluk (%)     | VMA (%)    | Asfaltla Dolu Boşluk (%) |
|                        | ( A )        | ( B )                                   | ( C )               | $V=( B - C )$            | $D_p= A / V$                               | $D_t$                                            | $V_h$          | VMA        | VFA                      |
| %0                     | 1197         | 1200                                    | 704                 | 496                      | 2,418                                      | 2,560                                            | 5,53           | 15,55      | 64,45                    |
| %2                     | 1200         | 1202                                    | 705                 | 497                      | 2,414                                      | 2,560                                            | 5,69           | 15,69      | 63,77                    |
| %4                     | 1198         | 1201                                    | 698                 | 503                      | 2,382                                      | 2,560                                            | 6,94           | 16,81      | 58,74                    |
| %6                     | 1198         | 1202                                    | 693                 | 509                      | 2,354                                      | 2,560                                            | 8,03           | 17,79      | 54,86                    |

Kirecin yoğunluğunun, yerine kullanıldığı filler malzemedenden daha düşük olmasından dolayı asfalt numunelerinin pratik özgül ağırlıklarının ( $D_p$ ), kireç katkı oranı arttıkça düşüş gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 8.1). Buna paralel olarak, kireç katkı oranı arttıkça hava boşluğu ( $V_h$ ) ve agrega karışımı hava boşluğu (VMA) oranlarının arttığı ve asfaltın doldurduğu boşluk oranlarının (VFA) ise düşüş gösterdiği (kirecin boşluklu yapısından

dolayı) tespit edilmiştir. Agrega karışımları içindeki kireç katkı oranlarının, yüksek değerlerde olmamasına rağmen, asfalt numunelerinin özgül ağırlık ve özellikle boşluk oranlarındaki değişimin oldukça yüksek seviyelerde gerçekleştiği gözlenmiştir.( Şekil 8.2).



Şekil 8.1 Kireç katkı oranları- pratik özgül ağırlık ilişkisi



Şekil 8.2 Kireç katkı oranları- briket ve agreg a karışımı boşluk oranları ilişkisi

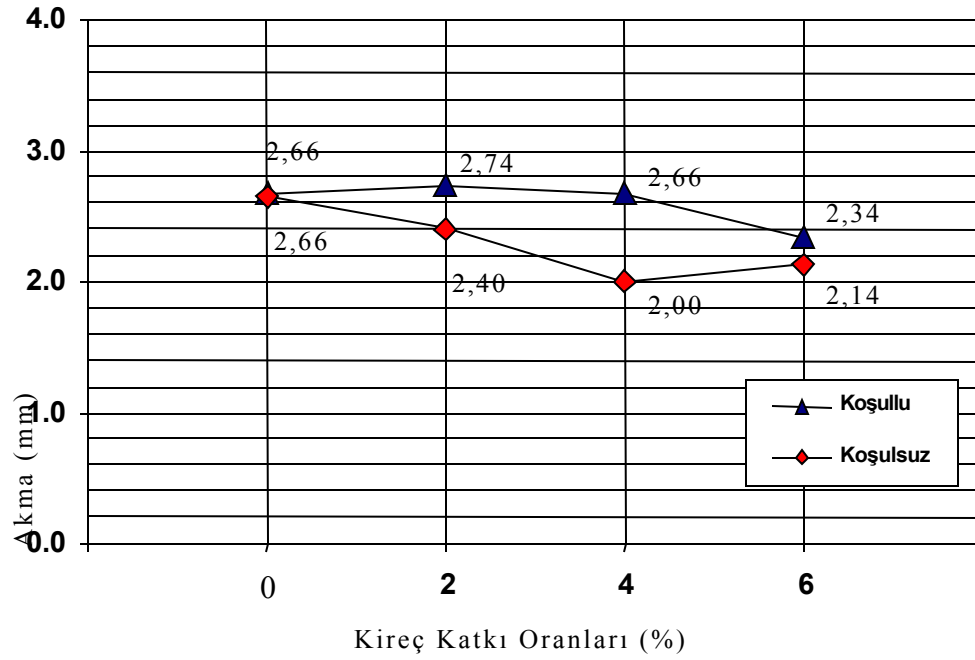
### 8.3 Asfalt Karışımlarına Kireç Katkısının Akma ve Stabiliteye Etkisinin Tespiti (Marshall Metoduyla)

Deneyde kullanılan Marshall briketleri üçerli gruplar halinde optimum bitüm muhtevasında (%4,73), kireç katkısız ve değişik kireç miktarları katılarak hazırlanmıştır. Üçerli gruplar halinde koşulsuz ve 60 °C suda koşullandırılmış olarak hazırlanan briketlere uygulanan Marshall stabilitesi deney sonuçlarından elde edilen akma ve stabilite değerlerinin (her grup için) ortalamaları alınmıştır. Aşağıda koşullu ve koşulsuz numuneler için deney sonuçları verilmektedir (Çizelge 8.4).

Çizelge 8.4 Dört ayrı tip karışım için hesaplanan ortalama akma ve stabilite değerleri

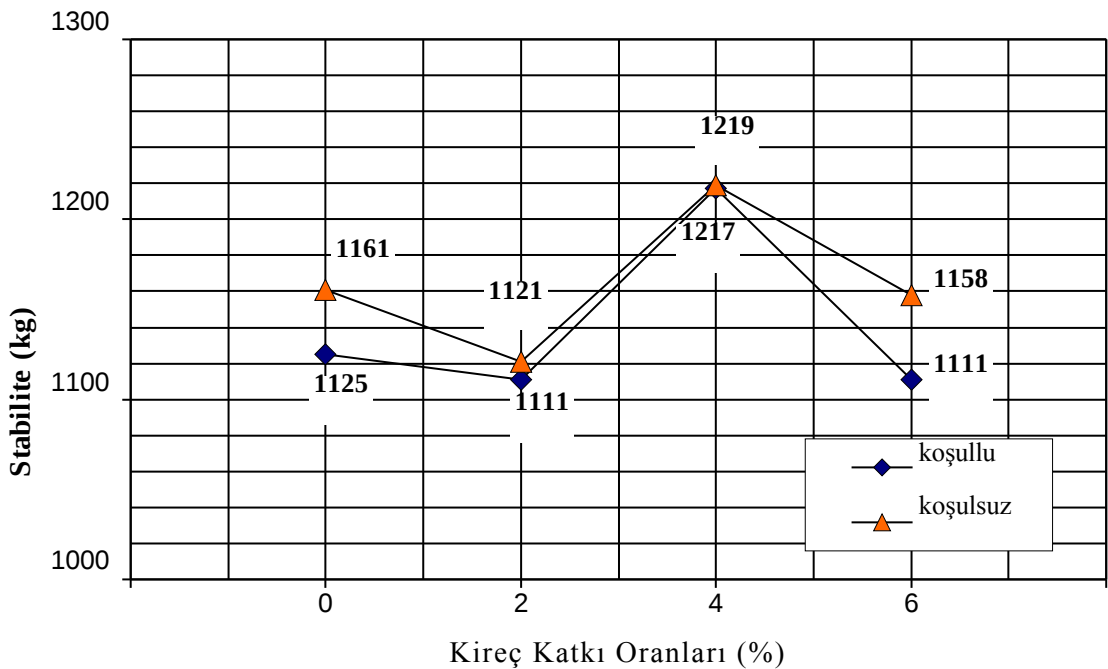
| Kireç Katkı Oranları | Koşulsuz       |           | Koşullu        |           |
|----------------------|----------------|-----------|----------------|-----------|
|                      | Stabilite (kg) | Akma (mm) | Stabilite (kg) | Akma (mm) |
|                      | MS1            | A1        | MS2            | A2        |
| %0                   | 1161           | 2,66      | 1125           | 2,66      |
| %2                   | 1121           | 2,40      | 1111           | 2,74      |
| %4                   | 1219           | 2,00      | 1217           | 2,66      |
| %6                   | 1158           | 2,14      | 1111           | 2,34      |

Marshall stabilitesi deney sonuçlarına göre; koşullandırılmamış briketlerin akma değerleri koşullandırılmış briketlere göre daha düşük çıkmıştır. Bununla beraber, koşullandırılmamış briketlerde; %4 ve %6 kireç katkılı numunelerin akma oranlarının diğerlerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiş iken, koşullandırılarak Marshall deneyine maruz bırakılan briketlerin ise; sadece %6 oranında kireç katkılı olanlarının akma değerlerinin diğer numune değerlerine göre daha düşük çıktığı görülmüştür (Şekil 8.3).



Şekil 8.3 Kireç katkı oranları- akma ilişkisi

Marshall stabilite deneyi sonucunda koşulsuz ve koşullu numuneler için elde edilen stabilite değerlerinin, birbirine paralel olarak gerçekleştiği görülmekle birlikte, tahmin edildiği üzere, koşullandırılmış numunelerin stabilite değerleri, koşulsuz numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Bununla birlikte, %4 kireç katkılı numunelerin stabilite değerlerinin (koşullu ve koşulsuz numuneler için), kireç katkısız ile %2 ve %6 kireç katkılı numune değerlerine göre belirgin bir şekilde yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 8.4).



Şekil 8.4 Kireç katkı oranları- stabilite ilişkisi

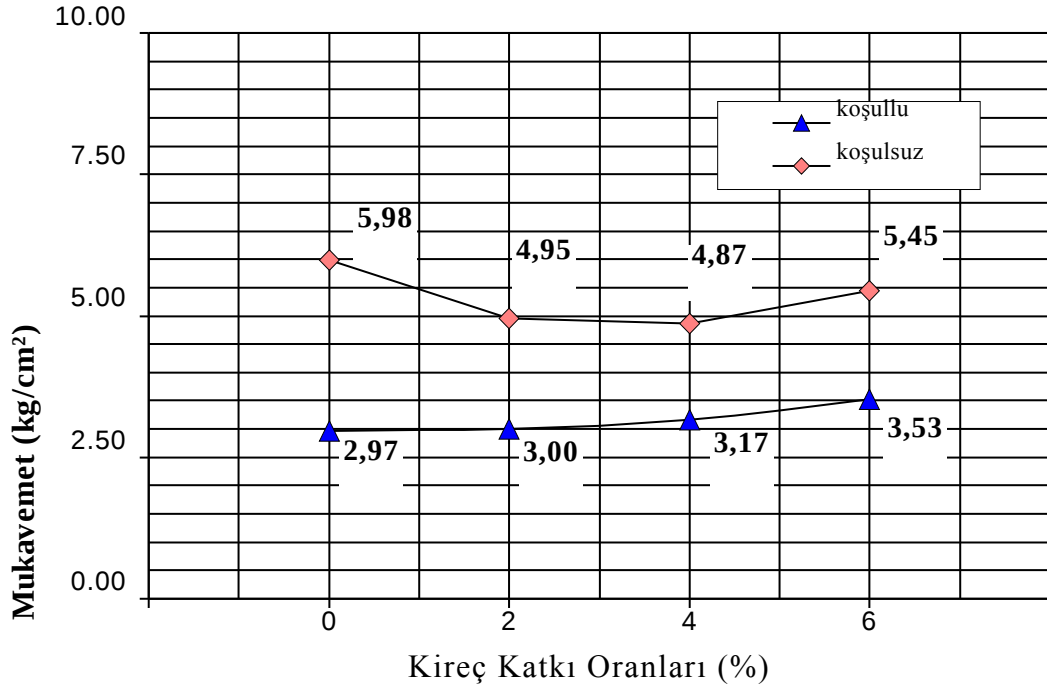
#### 8.4 Oda Sıcaklığında Hazırlanan Numuneler İçin Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları

Oda sıcaklığında tutulmuş 40 adet numuneye (yarısı koşullandırılmış), dolaylı çekme mukavemeti (DÇM) deneyi uygulanarak, çekme mukavemeti değerleri tespit edilmiştir. İlk olarak numunelerin kırıldığı andaki germe kuvveti değerleri tespit edilmiş, daha sonra numunelerin yükseklik ile çap değerinden elde edilen alan değerleri yardımıyla mevcut çekme gerilmelerinin hesabı yapılmış ve her bir tip karışım için bu mukavemet değerlerinin ortalamaları hesaplanmıştır. Öte yandan, asfalt kaplamalara su etkisinin anlaşılabilmesi açısından, koşullandırılmış numunelerin ortalama mukavemet değerlerinin, koşulsuz numunelerin mukavemet değerlerine oranları da hesaplanmış ve bütün bu değerler tablo halinde verilmiştir (Çizelge 8.5)

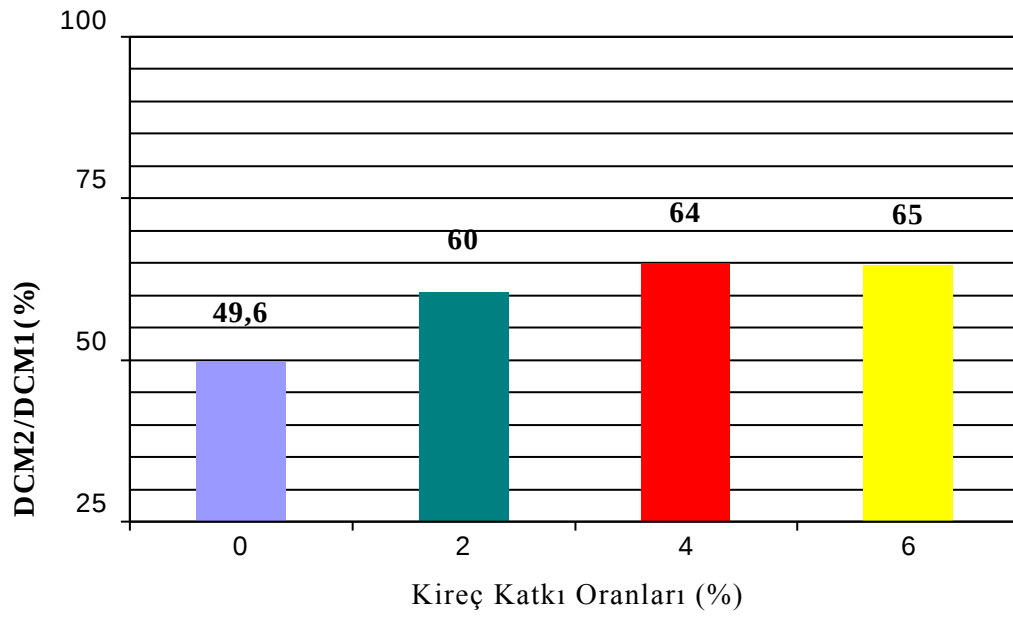
Çizelge 8.5 Oda sıcaklığında tutulan numuneler için tespit edilen ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri

| Dolaylı Çekme Mukavemeti Değerleri<br>(Oda sıcaklığındaki numuneler için) | Kireç Katkı Oranları |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|------|------|------|
|                                                                           | % 0                  | % 2  | % 4  | % 6  |
| Koşulsuz Numuneler<br>(DÇM1)<br>(kg/cm <sup>2</sup> )                     | 6,03                 | 5,02 | 4,95 | 5,43 |
| Koşullu Numuneler<br>(DÇM2)<br>(kg/cm <sup>2</sup> )                      | 2,99                 | 3,01 | 3,17 | 3,53 |
| DÇM2/DÇM1<br>(%)                                                          | 49,6                 | 60,0 | 64,0 | 65,0 |

Dolaylı çekme mukavemeti deney verilerine göre, koşullandırılmamış numunelerin en yüksek mukavemet değerlerinin kireç katkısız numunelerde gerçekleştiği, koşullandırılmış numunelerde ise kireç katkı oranı yükseldikçe mukavemet değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir (Şekil 8.5). Ayrıca, koşullu numunelerin mukavemet değerlerinin koşulsuz numunelerin mukavemet değerlerine oranları, genel olarak kireç katkılı numuneler için daha yüksek çıkmıştır (Şekil 8.6).



Şekil 8.5 Kireç katkı oranları- dolaylı çekme mukavemeti ilişkisi



Şekil 8.6 Kireç katkı oranları-koşullu ve koşulsuz numunelerin dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin oranları ilişkisi

### 8.5 Düşük Sıcaklıkta (5 °C) Hazırlanan Numuneler İçin Dolaylı Çekme Mukavemeti (DDÇM) Deney Sonuçları

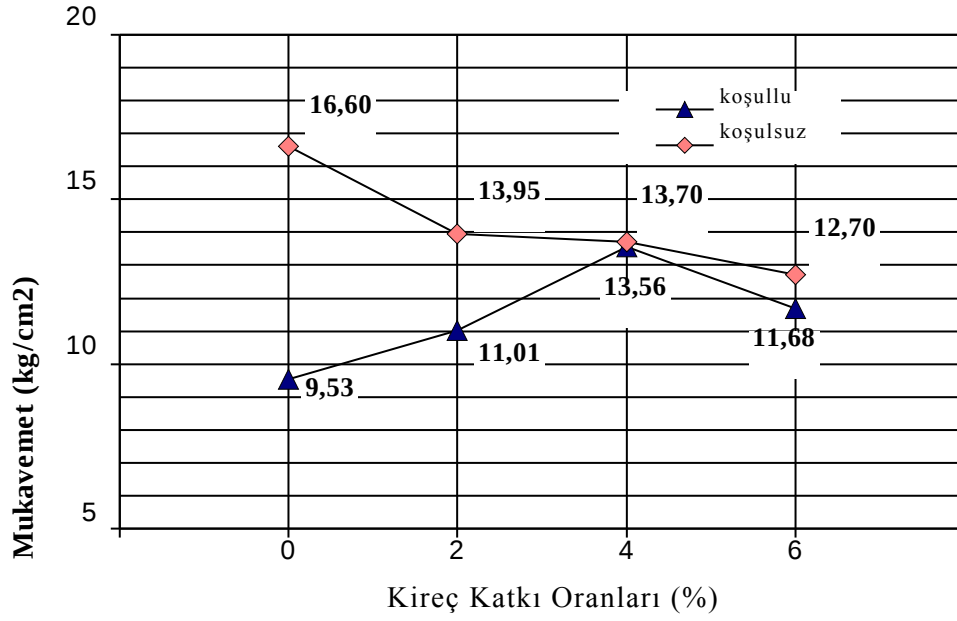
Kireç katkısının düşük sıcaklık çatlaklarına etkisinin analizinde daha çok bu deney sonuçları belirleyici nitelik taşımaktadır. Bir gün boyunca düşük sıcaklıkta bekletilmiş 40 adet numuneye (yarısı suda koşullandırılarak), dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulanarak, çekme mukavemeti değerleri tespit edilmiştir. İlk olarak numunelerin kırıldığı andaki germe kuvveti değerleri tespit edilmiş, daha sonra numunelerin yükseklik ile çap değerinden elde edilen alan değerleri yardımıyla mevcut çekme gerilmelerinin hesabı yapılmış ve her bir tip karışım için bu mukavemet değerlerinin ortalamaları hesaplanmıştır. Yine, suyun asfalt kaplamalara etkisinin anlaşılabilmesi açısından, koşullandırılmış numunelerin ortalama mukavemet değerlerinin koşulsuz numunelerin mukavemet değerlerine oranları hesaplanmış ve bütün bu değerler tablo halinde verilmiştir (Çizelge 8.6).

Çizelge 8.6 Düşük sıcaklıkta hazırlanan numuneler için tespit edilen ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri

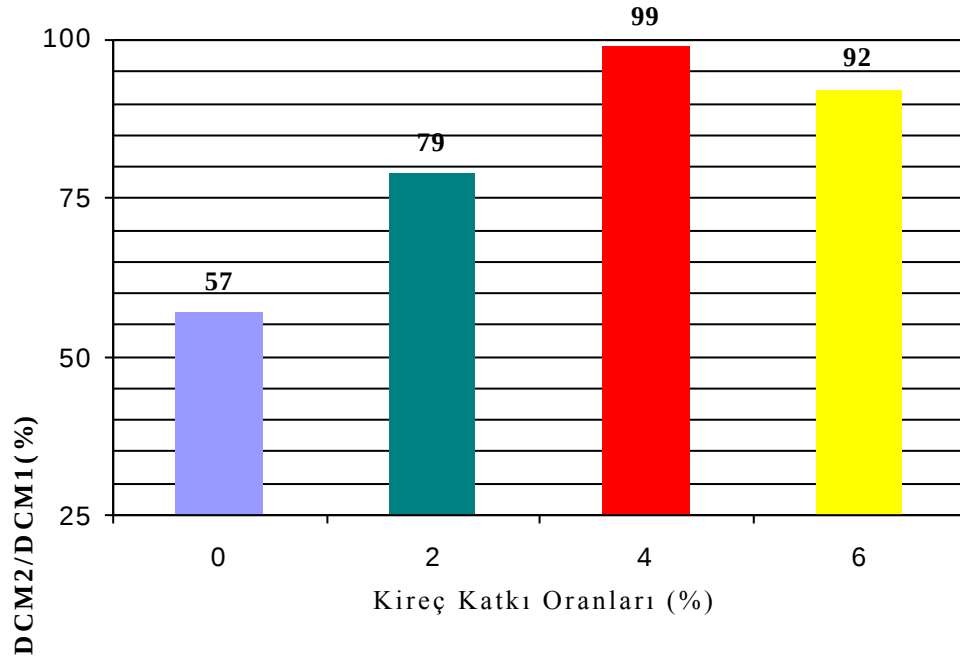
| Dolaylı Çekme Mukavemeti Değerleri (Düşük sıcaklıktaki numuneler için) | Kireç Katkı Oranları |       |       |       |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|                                                                        | % 0                  | % 2   | % 4   | % 6   |
| Koşulsuz Numuneler (DDCM1) (kg/cm <sup>2</sup> )                       | 16,60                | 13,95 | 13,70 | 12,70 |
| Koşullu Numuneler (DDCM2) (kg/cm <sup>2</sup> )                        | 9,53                 | 11,01 | 13,56 | 11,68 |
| DDCM2/ DDCM1 (%)                                                       | 57                   | 79    | 99    | 92    |

Burada da oda sıcaklığında kırılan numune değerlerine paralel olarak, suda koşullandırılmamış düşük sıcaklıkta ki (5 °C) briketlere uygulanan dolaylı çekme mukavemeti deneyi sonucunda; en yüksek mukavemet değerinin kireç katkısız numunelerde gerçekleştiği ve kireç katkı oranları arttıkça numune mukavemet değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Bunun tam tersi olarak, koşullandırılmış numunelere uygulanan çekme mukavemeti deneyi sonucunda; en düşük mukavemet değerlerinin kireç katkısız numunelerde görüldüğü, maksimum mukavemet değerlerinin ise %4 kireç katkılı numunelerde gerçekleştiği tespit

edilmiştir (Şekil 8.7). Yine, koşullu numunelerin mukavemet değerlerinin koşulsuz numunelerin mukavemet değerlerine oranı %4 kireç katkılı numuneler için daha yüksek çıkmıştır (Şekil 8.8).



Şekil 8.7 Düşük sıcaklıktaki numuneler için kireç katkı oranları- dolaylı çekme mukavemeti ilişkisi



Şekil 8.8 Kireç katkı oranları- düşük sıcaklıktaki koşullu ve koşulsuz numunelerin dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin oranları ilişkisi

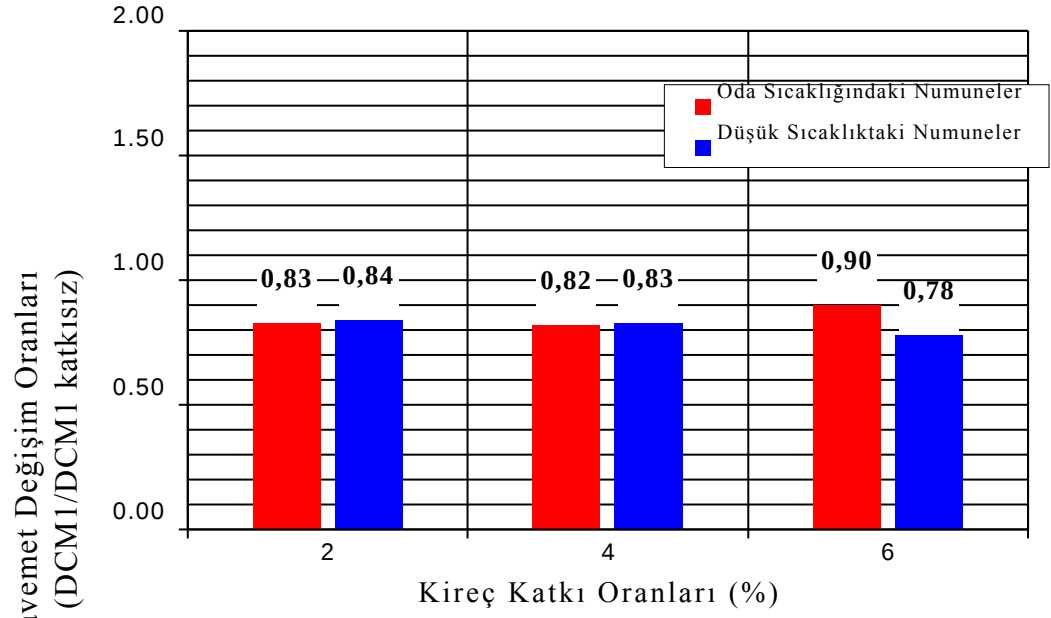
### 8.6 Her İki Sıcaklıkta ( 5°C ve 25°C) Hazırlanan Numunelerin Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu karşılaştırma, düşük sıcaklıktaki numunelerin deney sonuçlarıyla oda sıcaklığındaki numunelerin deney sonuçları arasındaki benzerlik ve farklılıkların tespit edilerek, kireç katkısının soğuk iklim şartlarına ve yüksek oranda neme maruz kalan asfalt kaplamalar üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacağı için büyük önem arz etmektedir.

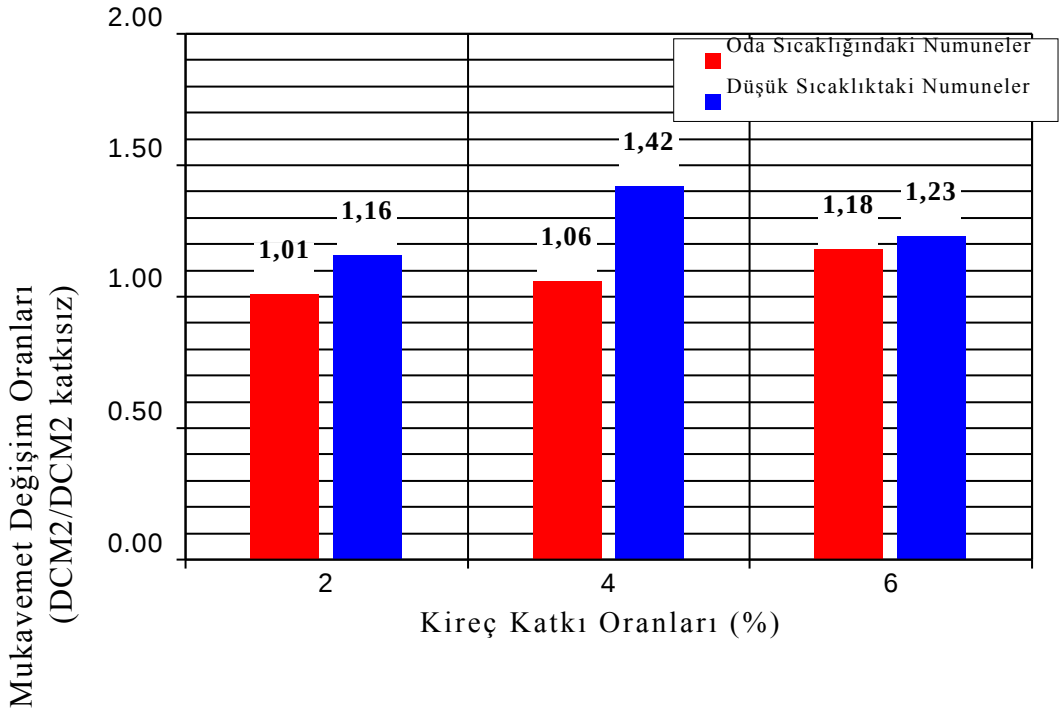
Her iki sıcaklıkta uygulanan deneyler için, kireç katkısının koşullandırılmamış numunelerde çekme mukavemetini düşürdüğü, koşullandırılmış numuneler de ise mukavemeti artırdığı saptanmıştır. Burada, kirecin soğuk hava koşulları ile yüksek oranda neme maruz kalan asfalta etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi açısından, koşulsuz ve suda koşullandırılmış kireç katkısız numuneler ile kireç katkılı numunelerin mukavemet değerleri karşılaştırılmıştır. Bunun için dört farklı karışımın mukavemet değerleri, kireç katkısız numune mukavemet değerlerine bölünmüştür (Çizelge 8.7). Bu karşılaştırma sonucunda, her iki sıcaklıktaki ve koşullandırılmamış numunelerde kireç katkısının, mukavemet değerlerini belirgin oranlarda düşürdüğü (Şekil 8.9), buna karşılık koşullandırılmış numunelerde ise mukavemet değerlerinin tam tersi bir eğilim gösterdiği ve özellikle düşük sıcaklıktaki (5 °C) numunelerin, oda sıcaklığında tutulan numunelere göre dolaylı çekme mukavemeti artış oranlarının belirgin bir şekilde daha yüksek gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 8.10).

Çizelge 8.7 Her iki sıcaklıktaki numuneler için dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin kireç katkısız numune değerlerine oranları

|          | Dolaylı Çekme Mukavemeti Oranları                       | Kireç Katkı Oranları |      |      |      |
|----------|---------------------------------------------------------|----------------------|------|------|------|
|          |                                                         | % 0                  | % 2  | % 4  | % 6  |
| Koşulsuz | DCM1 / DCM1 katkısız<br>(Oda Sıcaklığındaki Numuneler)  | 1,00                 | 0,83 | 0,82 | 0,90 |
|          | DDCM1 /DDCM1 katkısız<br>(Düşük Sıcaklıktaki Numuneler) | 1,00                 | 0,84 | 0,83 | 0,78 |
| Koşullu  | DCM2 / DCM2 katkısız<br>(Oda Sıcaklığındaki Numuneler)  | 1,00                 | 1,01 | 1,06 | 1,18 |
|          | DDCM2 /DDCM2 katkısız<br>(Düşük Sıcaklıktaki Numuneler) | 1,00                 | 1,16 | 1,42 | 1,23 |



Şekil 8.9 Kireç katkı oranları – koşulsuz kireç katkılı numunelerin kireç katkısız numunelere göre mukavemet değişme oranları



Şekil 8.10 Kireç katkı oranları - koşullandırılmış kireç katkılı numunelerin kireç katkısız numunelere göre mukavemet değişme oranları

## SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, filler malzemesi yerine belirli oranlarda sönmüş kireç katılmış asfalt karışımlarının düşük sıcaklıktaki hava koşulları karşısındaki performansı incelenmiştir. Bu amaçla kireç katkısız ve %2, %4, %6 kireç katkılı olmak üzere 4 farklı karışım ile toplam 104 adet briket üzerinde Marshall stabilitesi ve dolaylı çekme mukavemeti deneyleri yapılmıştır.

Özellikle kireç katkısının, soğuğa ve dolayısıyla yüksek oranda neme maruz kalan asfalt kaplamalara etkisinin anlaşılabilmesi için, numunelerin yarısı 60 °C sıcaklıktaki suda bir gün boyunca bekletilmiş, ayrıca dolaylı çekme mukavemeti deneyinde kullanılan briketlerin bir kısmı düşük sıcaklıkta (5 °C), bir kısmı ise oda sıcaklığında (25 °C) tutulmuş ve deney sonuçları analiz edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

Asfalt kaplamalardaki boşluk oranlarının düşük sıcaklık çatlakları üzerindeki etkisi konusunda araştırmacılar arasında fikir birliği yoktur. Genel olarak hava boşluğu oranının, karışımın kırılma sıcaklığı üzerinde dolaylı da olsa etkili olduğu görüşü ağırlık kazanmakla beraber, araştırmalar sonrasında ortak bir sonuca ulaşamadığı için hava boşluğu oranının karışımın çatlak oluşumuna etkisi hakkında kesin bir şey söylemek mümkün olmamaktadır.

Yapılan deneyler sonucunda, hava boşluğu oranlarının kireç katkı oranları arttıkça arttığı ve buna paralel olarak numune özgül ağırlığının azaldığı (kirecin boşluklu yapısından dolayı) belirlenmiştir. Ancak, karışımlar arasındaki boşluk oranı değişimlerinin (Vh %5.53'den %8.03'e; VMA %15.55'den 17.79'a) kayda değer oranlarda gerçekleşmediği görülmüştür. Buna ek olarak, numunelerin boşluk oranı değerlerinin belirlenen akma ve stabilite değerleriyle de uyumluluk göstermediği anlaşıldığından, bu konuda elde edilen verilerin numunelerin boşluk oranlarının düşük sıcaklık çatlaklarına tesiri hakkında herhangi bir yorum yapmak için yeterli olmadığı kanısına varılmıştır. Ancak hava boşluk oranları farkları yüksek (%4'den fazla) olan numunelerin birbiriyle karşılaştırılmasının, bu konunun anlaşılması açısından faydalı olabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada, asfalt kaplamalarda kireç katkısının malzemenin düşük sıcaklık çatlaklarına dayanımına etkisinin anlaşılmasında, hazırlanan numunelerin stabilite değerlerinin analizi önemli bir yer tutmaktadır. Marshall stabilitesi deneyine maruz bırakılan briketlerin ortalama stabilite değerleri, kireç katkısız ile %2 ve %6 kireç katkılı numunelerde birbirine yakın değerlerde çıkarken, %4 kireç katkılı numunelerde belirgin ölçüde yüksek çıkmıştır (%4 kireç katkılı numuneler için ortalama 1218 kg). Bu nedenle stabilite değerleri göz önüne alındığında, hazırlanan karışımlar içerisinde en ideal kireç katkı oranının %4 olduğu

söylenebilir. Ancak, aşırı yüksek stabilite değerlerine sahip karışımlarda, özellikle ağır trafik yükleri altında çatlaklar meydana geldiği de bilinen bir gerçektir. Bu nedenle, tek başına stabilite değerlerine bakılarak bir değerlendirme yapılması yanılığa yol açabilir.

Düşük sıcaklıklarda asfalt büzülmeye çalışacağından, büzülen asfaltın (çatlamaya karşı direncinin artması için) akma oranlarının yüksek olması arzu edilmektedir. Marshall stabilitesi deney verileri göz önüne alındığında; %4 ve %6 kireç katkılı ve koşullandırılmamış numunelerde genel olarak akma oranlarının düşük çıktığı görülmüştür. Koşullandırılmış numunelerde akma değerlerinin, sadece %6 kireç katkılı karışımlarda düşük çıktığı, diğer karışımlarda ise hemen hemen yakın değerlerde gerçekleştiği görülmüştür. Özellikle %4 kireç katkılı koşullandırılmış numune akma değerlerinin, koşullandırılmamış numune değerlerine göre yüksek derecede artış gösterdiği (2,0 mm'den 2,33 mm'ye) tespit edilmiştir. Bu veriler ışığında; özellikle %6 kireç katkısının numunelerin akma değerlerini düşürmesi sebebiyle çatlama dayanımına olumsuz yönde tesir edebileceği söylenebilir. Ancak, tek başına akma değerlerinin analiz edilmesinden daha çok, akma ile stabilite değerlerinin bir arada değerlendirilmesi daha anlamlı olacaktır.

Stabilite açısından en uygun değerlerin %4 kireç katkılı numunelerde görüldüğü, akma değerlerinin ise kireç katkısız ile %2 ve %4 kireç katkılı numunelerde birbirine yakın gerçekleştiği belirtilmişti. Stabilite ve akma değerlerinin bir arada değerlendirilmesi neticesinde; hazırlanan karışımlar içerisinde %4 kireç katkılı numunelerin (özellikle koşullandırılmış numunelerde yüksek stabilite ve akma değerlerini bir arada sağladığından) en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.

Yukarıda verilen Marshall stabilitesi deney sonuçlarına göre; bitümlü karışımlara kireç katkısının, su etkilerine karşı malzeme dayanımını olumlu yönde etkilediği söylenebilir. Özellikle %4 sönmüş kireç katkısının, kaplamanın su etkilerine karşı direncini önemli derecede arttırdığı tespit edilmiştir.

Oda sıcaklığındaki numunelerin dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları, sönmüş kireç katkısının uzun süre neme maruz kalan asfaltın mukavemetine etkisinin anlaşılması ve düşük sıcaklıktaki numunelerin deney verileriyle karşılaştırılması açısından önemlidir. Oda sıcaklığında hazırlanan numunelerin dolaylı çekme mukavemeti deney verilerine göre; kireç katkısının koşullandırılmamış numunelerin çekme mukavemetini düşürürken (6,03 kg/cm<sup>2</sup>'den 4,95 kg/cm<sup>2</sup>'ye), suda bekletilerek koşullandırılmış numunelerin mukavemetini arttırdığı (2,99 kg/cm<sup>2</sup>'den 3,53 kg/cm<sup>2</sup>'ye) gözlenmiştir. Bu veriler ışığında; sönmüş kireç katkısının, özellikle su tesiri karşısında malzemenin direncini artırdığı söylenebilir. Burada,

oda sıcaklığında hazırlanan karışımlar içerisinde (malzeme mukavemeti açısından) en iyi sonucu %6 kireç katkılı numuneler vermiştir.

Düşük sıcaklıkta hazırlanan numunelere uygulanan dolaylı çekme mukavemeti deneyi, kireç katkısının düşük sıcaklık çatlak oluşumuna etkisinin anlaşılması açısından çalışmanın en önemli verilerini içermektedir. Bu deney sonuçlarına göre; kireç katkısının koşullandırılmamış numunelerin mukavemetini olumsuz yönde etkilediği ve kireç katkı oranı arttıkça numunelerin çekme mukavemeti değerlerinin düştüğü ( $16,60 \text{ kg/cm}^2$  den  $12,70 \text{ kg/cm}^2$  ye) görülmüştür. Suda koşullandırılmış numunelerde ise kireç katkısının malzeme mukavemetini artırdığı ( $9,53 \text{ kg/cm}^2$  den  $13,56 \text{ kg/cm}^2$  ye), özellikle %4 kireç katkılı numunelerin mukavemet değerlerinin belirgin oranlarda yüksek çıktığı (katkisiz numune değerlerine göre %42 oranında daha yüksek) tespit edilmiştir. Bu veriler oda sıcaklığındaki numune verileriyle paralellik gösterse de, %4 kireç katkısının, özellikle düşük sıcaklıkta ve suda koşullandırılmış numunelerin malzeme mukavemetini çok daha olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir.

Bu çalışmada, sönmüş kireç katkısının soğuk hava koşulları altındaki asfalt kaplamalara etkisinin anlaşılabilmesi için numunelerin bir kısmı  $5^\circ\text{C}$  sıcaklıkta bir gün boyunca bekletilmiş ve ardından deney aşamasına geçilmiştir. Bu sıcaklıktaki numune deney verilerinin, konu hakkında önemli sonuçlara ulaşılmasında çok faydalı olduğu görülmüştür. Bununla birlikte hazırlanan numuneler daha düşük ve farklı sıcaklıklarda (mesela;  $0^\circ\text{C}$ ,  $-5^\circ\text{C}$ ,  $-10^\circ\text{C}$ ) tutularak, deneylerin gerçekleştirilmesinin konu ile ilgili daha net sonuçlara ulaşılmasına yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Asfalt kaplamaların düşük sıcaklık çatlaklarına direncini ölçmek için kullanılan bir diğer metot da sınırlandırılmış numunede termal gerilme testidir (Thermal Stress Restrained Specimen Test – TSRST). Bu testte, TSRST cihazına konulan numune belli bir zaman dilimi içerisinde soğutulur. Bu test sisteminin en önemli unsuru, soğuma sırasında test edilecek numunenin sabit boyda kalmasının sağlanmasıdır. Böylece soğuma ile birlikte numunede oluşan gerilmeler sönmelenmemiş olur ve numunenin kırılma sıcaklığı kolaylıkla tespit edilir. TSRST, özellikle düşük sıcaklık çatlaklarının analiz edilebilmesi için Oregon State Üniversitesinde geliştirilen ve bu konuda yaygın olarak kullanılan bir testtir. Bu nedenle, hazırlanan numunelere TSRST testinin uygulanması asfalt kaplamalarda kireç katkısının düşük sıcaklık çatlak direncine etkisinin daha iyi anlaşılmasında faydalı olacaktır.

Sonuç olarak; sönmüş kirecin uzun süre soğuk hava koşullarına ve yüksek miktarda neme maruz kalan asfalt kaplamalarda oluşan çatlakların engellenmesinde ve malzeme

mukavemetinin artırılmasında önemli katkılarda bulunduğu, malzemenin soğuğa ve özellikle neme karşı direncini artırdığı tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; hazırlanan karışımların performansının, kireç katkı oranı artmasıyla iyileştiği ancak belirli bir noktadan (%4) sonra düşüşe geçtiği gözlenmiştir. Burada, stabilite, akma ve çekme mukavemeti değeri açısından hazırlanan karışımlar arasında en uygun deney sonuçları %4 kireç katkılı numunelerde görülmüştür. Bu nedenle, soğuk iklim şartlarının görüldüğu bölgelerde, asfalt kaplamalara agrega karışımı ağırlığının %4`ü oranında sönmüş kireç katılması, düşük sıcaklık çatlak oluşumunun engellenmesinde ve sudan kaynaklanan hasarların en aza indirilmesinde etkili olacaktır.

## KAYNAKLAR

Aksoy, A., (2001) Asfalt Kaplamalarda Kireç Taşı Petrografisi-Soyulma İlişkisi Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Arand, W., (1987), Influence of bitumen hardness on the fatigue behavior of asphalt pavements of different thickness due to bearing capacity of subbase, traffic loading, and temperature, Proceedings, Sixth International Conference on Structural Behavior of Asphalt Pavements, University of Michigan, 65-71.

Asphalt Institute, (1996), Asphalt Institute Manual Series for Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types.

Çolak, K., (2006), Asfalt Kaplamalarda Sinerjik Performansın İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Gardiner, S.M., ve Brown, E.R., (2000), Segregation in Hot-Mix Asphalt Pavements, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 441.

Harold, R., ve Paul, P.E., ve Chris, P.E., (1995), Pavement Distress, Technical Assistance Report, LTRC.

Ilıcalı, M., (2001), Asfalt Kaplamalar, İstanbul Asfalt Sanayi ve Ticaret A.Ş Yayınları, Yayın No:1, İstanbul.

Iowa Department of Transportation Office of Materials, (IDTM), (2002), Methods of Design of Hot Mix Asphalt.

Janoo, V.C., ve Korhonen, C., (1999), Performance Testing of Hot-Mix Asphalt, U.S.

Johnson, G.D., (2000), Evaluation of Aggregate Sections at Mn/Road, Final Report, Minnesota Transportation Institute, Minnesota.

Kılıç, O., ve Anıl, M., (2006), “Kireç Söndürme Şartlarının Söndürülmüş Kireç Kalitesine Etkisi”, Madencilik TMMOB Maden Müh.Odası Dergisi, 45, (1), 15-22.

Kigguende, B.M., ve Robert, F.L., (1998), Stripping in HMA Mixtures: State of The Art and Critical Review of Test Methods, National Center for Asphalt Technology, NCAT Report No. 88-2.

Kurtis, K., (2003), Asphalt and Asphalt Concrete, School of Civil Engineering Georgia

Marasteanu, M., Li, X., Clyne, T., Voller, V., Timm, D. ve Newcomb, D., (2004), “Low Temperature Cracking Of Asphalt Concrete Pavements” Minnesota Department of Transportation Office of Research Services, MN/RC – 2004-23

Mohammed, L., Abadie, G.P., (2000), Mechanistic Evaluation Of Hydrated Lime In HMA Mixtures, TRB.

Önal, A.M., ve Kahramangil, M., (1993), Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı.

Özen, H., (2004), “Karayolu Üstyapıları Ders Notları”, İstanbul.

Özen, H.,(2005), Ulaştırma Laboratuvar Deneyleri, Y.T.Ü. Basım-Yayın Merkezi Yayın No: İN.İNİM-05.002, İstanbul.

Prowell, B.D., (2003), Performance Testing of HMA, APA, Asphalt Pavement.

Taşdemir, Y., (2003), Bitümlü Kaplamaların Termal Davranışlarının Performans Testleri İle İncelenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., İstanbul.

Terzi, S., (2000), Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü., Isparta.

TS 32 En 459-2, 2005, Yapı Kireci-Bölüm 2: Deney Metodları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Uluçaylı, M., (2002), Asfalt El Kitabı, İsfalt Yayınları, No:2, İstanbul.

Umar, F., ve Ağar, E., (1985), Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

Ün, H., (2007), “Yapı Malzemeleri Ders Notları”, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Yayla, N., (2002), Karayolu Mühendisliği, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Zeng, H., (1995), On The low temperature cracking of asphalt pavements, TRITA-IP FR 95-07, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

#### İnternet Kaynakları:

[1], (2007), <http://www.hawaiiasphalt.com>, Pavement Distress

[2], (2007), <http://www.tfhr.gov>, Pavement Distress

EKLER

## Ek-1 Dört ayrı tip karışım için marshall numuneleri deney verilerini gösteren rapor

| BRİKET KONTROL RAPORU        |                              |      |      |      |                              |                                                   |                            |                             |                                                   | Rapor No : 128 |                     |                      |                     |
|------------------------------|------------------------------|------|------|------|------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|----------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Deneyin Adı                  |                              |      |      | :    | Marshall Stabilite Deneyi    |                                                   |                            |                             |                                                   | Rapor Tarihi : |                     | 6.19.2006            |                     |
|                              |                              |      |      |      | Havadaki<br>Ağırlık<br>( A ) | Havadaki<br>Ağırlık<br>(gr)<br>Doy.Yüzey<br>( B ) | Sudaki<br>Ağırlık<br>( C ) | Hacmi<br>( V )<br>( B - C ) | Pratik<br>Özgül<br>Ağırlık<br>( Dp )<br>( A / V ) | Akma<br>(mm)   | Stabilite<br>( kg.) | DENEY                |                     |
| K <sub>0.104.2</sub> Karışım | 1                            | 4.73 | 54.4 | 62.9 | 1188.4                       | 1190.7                                            | 698.8                      | 491.9                       | 2.416                                             | 2.4            | 1198                | Marshall<br>Koşullu  |                     |
|                              | 2                            | 4.73 | 54.4 | 63.2 | 1190.5                       | 1192.9                                            | 699.8                      | 493.1                       | 2.414                                             | 3.0            | 1037                |                      |                     |
|                              | 3                            | 4.73 | 54.4 | 63.1 | 1196.1                       | 1198.5                                            | 703.8                      | 494.7                       | 2.418                                             | 2.6            | 1140                |                      |                     |
|                              | ORTALAMA                     |      |      |      |                              |                                                   |                            |                             | 2.416                                             | 2.66           | 1125                |                      |                     |
|                              | 4                            | 4.73 | 54.4 | 63.2 | 1192.3                       | 1194.2                                            | 700.0                      | 494.2                       | 2.413                                             | 2.4            | 1160                | Marshall<br>Koşulsuz |                     |
|                              | 5                            | 4.73 | 54.4 | 62.9 | 1198.8                       | 1200.9                                            | 703.8                      | 497.1                       | 2.412                                             | 2.8            | 1096                |                      |                     |
|                              | 6                            | 4.73 | 54.4 | 62.6 | 1199.1                       | 1202.3                                            | 705.7                      | 496.6                       | 2.415                                             | 2.8            | 1226                |                      |                     |
|                              | ORTALAMA                     |      |      |      |                              |                                                   |                            |                             | 2.413                                             | 2.66           | 1160.7              |                      |                     |
|                              | K <sub>0.104.3</sub> Karışım | 1    | 4.73 | 54.4 | 63.1                         | 1197.9                                            | 1201.7                     | 702.2                       | 499.5                                             | 2.398          | 3.0                 | 1189                 | Marshall<br>Koşullu |
|                              |                              | 2    | 4.73 | 54.4 | 63.6                         | 1200.1                                            | 1203.6                     | 704.1                       | 499.5                                             | 2.403          | 2.8                 | 1100                 |                     |
| 3                            |                              | 4.73 | 54.4 | 63.5 | 1201.3                       | 1203.2                                            | 702.5                      | 500.7                       | 2.399                                             | 2.4            | 1045                |                      |                     |
| ORTALAMA                     |                              |      |      |      |                              |                                                   |                            | 2.400                       | 2.74                                              | 1111.3         |                     |                      |                     |
| 4                            |                              | 4.73 | 54.4 | 63.4 | 1199.5                       | 1203.3                                            | 705.5                      | 497.8                       | 2.410                                             | 2.6            | 1220                | Marshall<br>Koşulsuz |                     |
| 5                            |                              | 4.73 | 54.4 | 63.7 | 1199.3                       | 1202.8                                            | 704.8                      | 498.0                       | 2.408                                             | 2.6            | 1071                |                      |                     |
| 6                            |                              | 4.73 | 54.4 | 63.6 | 1201.3                       | 1203.5                                            | 704.9                      | 498.6                       | 2.409                                             | 2.0            | 1071                |                      |                     |
| ORTALAMA                     |                              |      |      |      |                              |                                                   |                            | 2.409                       | 2.40                                              | 1120.7         |                     |                      |                     |
| K <sub>0.104.4</sub> Karışım |                              | 1    | 4.73 | 54.4 | 62.1                         | 1197.4                                            | 1199.0                     | 705.1                       | 493.9                                             | 2.424          | 2.6                 | 1244.9               | Marshall<br>Koşullu |
|                              |                              | 2    | 4.73 | 54.4 | 63.3                         | 1199.4                                            | 1200.9                     | 703.9                       | 497.0                                             | 2.413          | 2.0                 | 1165                 |                     |
|                              | 3                            | 4.73 | 54.4 | 63.1 | 1199.1                       | 1200.5                                            | 705.6                      | 494.9                       | 2.423                                             | 3.4            | 1242                |                      |                     |
|                              | ORTALAMA                     |      |      |      |                              |                                                   |                            |                             | 2.420                                             | 2.66           | 1217.3              |                      |                     |
|                              | 4                            | 4.73 | 54.4 | 62.8 | 1199.2                       | 1200.3                                            | 704.0                      | 496.3                       | 2.416                                             | 2.0            | 1373.9              | Marshall<br>Koşulsuz |                     |
|                              | 5                            | 4.73 | 54.4 | 63.4 | 1197.5                       | 1199.5                                            | 703.7                      | 495.8                       | 2.415                                             | 2.0            | 1169                |                      |                     |
|                              | 6                            | 4.73 | 54.4 | 64.2 | 1198.2                       | 1202.0                                            | 704.0                      | 498.0                       | 2.406                                             | 2.4            | 1112.6              |                      |                     |
|                              | ORTALAMA                     |      |      |      |                              |                                                   |                            |                             | 2.413                                             | 2.13           | 1218.5              |                      |                     |
|                              | K <sub>0.104.5</sub> Karışım | 1    | 4.73 | 54.4 | 64.8                         | 1199.6                                            | 1205.1                     | 686.4                       | 518.7                                             | 2.313          | 2.6                 | 1090.9               | Marshall<br>Koşullu |
|                              |                              | 2    | 4.73 | 54.4 | 64.9                         | 1198.0                                            | 1204.1                     | 686.9                       | 517.2                                             | 2.316          | 2.6                 | 1065.8               |                     |
| 3                            |                              | 4.73 | 54.4 | 64.9 | 1197.8                       | 1202.7                                            | 686.0                      | 516.7                       | 2.318                                             | 1.8            | 1175.5              |                      |                     |
| ORTALAMA                     |                              |      |      |      |                              |                                                   |                            | 2.316                       | 2.34                                              | 1111           |                     |                      |                     |
| 4                            |                              | 4.73 | 54.4 | 64.4 | 1197.4                       | 1202.5                                            | 683.6                      | 518.9                       | 2.308                                             | 2.0            | 1166.6              | Marshall<br>Koşulsuz |                     |
| 5                            |                              | 4.73 | 54.4 | 64.7 | 1199.9                       | 1203.6                                            | 686.2                      | 517.4                       | 2.319                                             | 2.0            | 1135.5              |                      |                     |
| 6                            |                              | 4.73 | 54.4 | 64.7 | 1199.8                       | 1204.4                                            | 687.9                      | 516.5                       | 2.323                                             | 2.4            | 1172.2              |                      |                     |
| ORTALAMA                     |                              |      |      |      |                              |                                                   |                            | 2.317                       | 2.14                                              | 1158.1         |                     |                      |                     |

Ek-2 Dört ayrı tip karışım için dolaylı çekme mukavemeti deney verilerini gösteren rapor (oda sıcaklığındaki numuneler için)

| BRİKET KONTROL RAPORU                                                                                                                             |          |                                        |      |                   |                                                             |                     | Rapor No :                                               | 128             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------|------|-------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|-----------------|
| Deneyin Adı:                                                                                                                                      |          | Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi (25°C) |      |                   |                                                             |                     | Rapor Tarihi:                                            | 19.06.2006      |
|                                                                                                                                                   |          |                                        |      | Yükseklik<br>(mm) | Pratik Özgül<br>Ağırlık<br>( Dp )<br>( gr/cm <sup>3</sup> ) | Stabilite<br>( kg ) | Dolaylı<br>Çekme<br>Mukavemeti<br>( kg/cm <sup>2</sup> ) | DENEY           |
| Katı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20 | 1        | 4.73                                   | 54.4 | 63.5              | 2.394                                                       | 1180                | 5.92                                                     | DCM<br>Koşulsuz |
|                                                                                                                                                   | 2        | 4.73                                   | 54.4 | 62.9              | 2.421                                                       | 1247                | 6.32                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 3        | 4.73                                   | 54.4 | 62.4              | 2.421                                                       | 1136                | 5.80                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 4        | 4.73                                   | 54.4 | 62.8              | 2.415                                                       | 1295                | 6.57                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 5        | 4.73                                   | 54.4 | 63.1              | 2.419                                                       | 1098                | 5.54                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | ORTALAMA |                                        |      | 62.9              | 2.414                                                       | 1191                | 6.03                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 6        | 4.73                                   | 54.4 | 62.7              | 2.427                                                       | 618                 | 3.14                                                     | DCM<br>Koşullu  |
|                                                                                                                                                   | 7        | 4.73                                   | 54.4 | 65.2              | 2.420                                                       | 567                 | 2.77                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 8        | 4.73                                   | 54.4 | 63.2              | 2.417                                                       | 614                 | 3.09                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 9        | 4.73                                   | 54.4 | 62.6              | 2.422                                                       | 534                 | 2.72                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 10       | 4.73                                   | 54.4 | 62.0              | 2.424                                                       | 625                 | 3.21                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | ORTALAMA |                                        |      | 63.1              | 2.422                                                       | 592                 | 2.99                                                     |                 |
| Katı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20 | 11       | 0.00                                   | 54.4 | 62.7              | 2.417                                                       | 995                 | 5.05                                                     | DCM<br>Koşulsuz |
|                                                                                                                                                   | 12       | 4.73                                   | 54.4 | 62.8              | 2.422                                                       | 908                 | 4.60                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 13       | 4.73                                   | 54.4 | 62.7              | 2.417                                                       | 1213                | 6.16                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 14       | 4.73                                   | 54.4 | 63.25             | 2.417                                                       | 833                 | 4.19                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 15       | 4.73                                   | 54.4 | 62.9              | 2.419                                                       | 1005                | 5.09                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | ORTALAMA |                                        |      | 62.9              | 2.418                                                       | 991                 | 5.02                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 16       | 4.73                                   | 54.4 | 62.9              | 2.420                                                       | 671                 | 3.40                                                     | DCM<br>Koşullu  |
|                                                                                                                                                   | 17       | 4.73                                   | 54.4 | 62.9              | 2.425                                                       | 492                 | 2.49                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 18       | 4.73                                   | 54.4 | 61.8              | 2.445                                                       | 539                 | 2.78                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 19       | 4.73                                   | 54.4 | 62.2              | 2.437                                                       | 581                 | 2.98                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 20       | 4.73                                   | 54.4 | 62.2              | 2.444                                                       | 664                 | 3.40                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | ORTALAMA |                                        |      | 62.4              | 2.434                                                       | 589                 | 3.01                                                     |                 |
| Katı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20 | 21       | 0.00                                   | 54.4 | 62.7              | 2.417                                                       | 918                 | 4.66                                                     | DCM<br>Koşulsuz |
|                                                                                                                                                   | 22       | 4.73                                   | 54.4 | 62.8              | 2.422                                                       | 908                 | 4.60                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 23       | 4.73                                   | 54.4 | 63.25             | 2.417                                                       | 833                 | 4.19                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 24       | 4.73                                   | 54.4 | 62.9              | 2.419                                                       | 1015                | 5.14                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 25       | 4.73                                   | 54.4 | 62.7              | 2.417                                                       | 1213                | 6.16                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | ORTALAMA |                                        |      | 62.9              | 2.418                                                       | 977                 | 4.95                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 26       | 4.73                                   | 54.4 | 62.5              | 2.358                                                       | 716                 | 3.65                                                     | DCM<br>Koşullu  |
|                                                                                                                                                   | 27       | 4.73                                   | 54.4 | 63.5              | 2.362                                                       | 545                 | 2.73                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 28       | 4.73                                   | 54.4 | 63.4              | 2.358                                                       | 588                 | 2.95                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 29       | 4.73                                   | 54.4 | 63.0              | 2.363                                                       | 702                 | 3.55                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 30       | 4.73                                   | 54.4 | 63.1              | 2.358                                                       | 586                 | 2.96                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | ORTALAMA |                                        |      | 63.1              | 2.360                                                       | 627                 | 3.17                                                     |                 |
| Katı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20<br>Katkı01, 20 | 31       | 4.73                                   | 54.4 | 63.8              | 2.392                                                       | 1075                | 5.37                                                     | DCM<br>Koşulsuz |
|                                                                                                                                                   | 32       | 4.73                                   | 54.4 | 64.0              | 2.391                                                       | 1186                | 5.90                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 33       | 4.73                                   | 54.4 | 63.4              | 2.398                                                       | 1201                | 6.03                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 34       | 4.73                                   | 54.4 | 64.1              | 2.399                                                       | 1038                | 5.16                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 35       | 4.73                                   | 54.4 | 63.9              | 2.396                                                       | 946                 | 4.71                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | ORTALAMA |                                        |      | 63.8              | 2.395                                                       | 1057                | 5.43                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 36       | 4.73                                   | 54.4 | 63.9              | 2.335                                                       | 660                 | 3.29                                                     | DCM<br>Koşullu  |
|                                                                                                                                                   | 37       | 4.73                                   | 54.4 | 63.3              | 2.354                                                       | 802                 | 4.03                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 38       | 4.73                                   | 54.4 | 63.5              | 2.392                                                       | 708                 | 3.55                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 39       | 4.73                                   | 54.4 | 64.3              | 2.393                                                       | 672                 | 3.33                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | 40       | 4.73                                   | 54.4 | 64.2              | 2.392                                                       | 699                 | 3.47                                                     |                 |
|                                                                                                                                                   | ORTALAMA |                                        |      | 63.8              | 2.373                                                       | 708                 | 3.53                                                     |                 |

Ek-3 Dört ayrı tip karışım için dolaylı çekme mukavemeti deney verilerini gösteren rapor (düşük sıcaklıktaki numuneler için)

| BRİKET KONTROL RAPORU   |          |      |                                                           |           |                             |           | Rapor No :               | 128          |
|-------------------------|----------|------|-----------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|--------------------------|--------------|
| Deneyin Adı:            |          |      | Düşük Sıcaklıkta Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi ( 5 °C ) |           |                             |           | Rapor Tarihi:            | 19.06.2006   |
|                         |          |      |                                                           | Yükseklik | Pratik Özgül Ağırlık ( Dp ) | Stabilite | Dolaylı Çekme Mukavemeti | DENEY        |
|                         |          |      |                                                           | (mm)      | ( gr/cm <sup>3</sup> )      | ( kg. )   | ( kg/cm <sup>2</sup> )   |              |
| elastik Numuneler       | 1        | 4.73 | 54.4                                                      | 60.2      | 2.446                       | 3379      | 17.88                    | DCM Koşulsuz |
|                         | 2        | 4.73 | 54.4                                                      | 62.6      | 2.427                       | 3142      | 15.98                    |              |
|                         | 3        | 4.73 | 54.4                                                      | 62.0      | 2.429                       | 3266      | 16.77                    |              |
|                         | 4        | 4.73 | 54.4                                                      | 62.8      | 2.428                       | 3060      | 15.52                    |              |
|                         | 5        | 4.73 | 54.4                                                      | 62.4      | 2.434                       | 3305      | 16.87                    |              |
|                         | ORTALAMA |      |                                                           | 62.0      | 2.433                       | 3230      | 16.60                    |              |
|                         | 6        | 4.73 | 54.4                                                      | 66.2      | 2.415                       | 1674      | 8.05                     | DCM Koşullu  |
|                         | 7        | 4.73 | 54.4                                                      | 63.0      | 2.408                       | 1500      | 7.58                     |              |
|                         | 8        | 4.73 | 54.4                                                      | 63.2      | 2.410                       | 1620      | 8.16                     |              |
|                         | 9        | 4.73 | 54.4                                                      | 62.2      | 2.409                       | 2163      | 11.08                    |              |
|                         | 10       | 4.73 | 54.4                                                      | 62.7      | 2.405                       | 2517      | 12.79                    |              |
|                         | ORTALAMA |      |                                                           | 63.5      | 2.409                       | 1895      | 9.53                     |              |
| Katkı Karışım Numuneler | 11       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.0      | 2.426                       | 2720      | 13.75                    | DCM Koşulsuz |
|                         | 12       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.0      | 2.419                       | 2725      | 13.78                    |              |
|                         | 13       | 4.73 | 54.4                                                      | 62.7      | 2.433                       | 2734      | 13.88                    |              |
|                         | 14       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.3      | 2.417                       | 2840      | 14.29                    |              |
|                         | 15       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.0      | 2.425                       | 2780      | 14.05                    |              |
|                         | ORTALAMA |      |                                                           | 63.0      | 2.424                       | 2760      | 13.95                    |              |
|                         | 16       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.4      | 2.408                       | 1960      | 9.85                     | DCM Koşullu  |
|                         | 17       | 4.73 | 54.4                                                      | 64.2      | 2.402                       | 2170      | 10.76                    |              |
|                         | 18       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.9      | 2.408                       | 2520      | 12.56                    |              |
|                         | 19       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.1      | 2.411                       | 2160      | 10.90                    |              |
|                         | 20       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.4      | 2.408                       | 2190      | 10.98                    |              |
|                         | ORTALAMA |      |                                                           | 63.6      | 2.407                       | 2200      | 11.01                    |              |
| Katkı Karışım Numuneler | 21       | 0.00 | 54.4                                                      | 64.1      | 2.340                       | 2746      | 13.64                    | DCM Koşulsuz |
|                         | 22       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.9      | 2.348                       | 2630      | 13.11                    |              |
|                         | 23       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.6      | 2.353                       | 2820      | 14.12                    |              |
|                         | 24       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.5      | 2.349                       | 3320      | 16.65                    |              |
|                         | 25       | 4.73 | 54.4                                                      | 64.0      | 2.351                       | 2208      | 10.99                    |              |
|                         | ORTALAMA |      |                                                           | 63.8      | 2.348                       | 2745      | 13.70                    |              |
|                         | 26       | 4.73 | 54.4                                                      | 64.0      | 2.357                       | 2650      | 13.18                    | DCM Koşullu  |
|                         | 27       | 4.73 | 54.4                                                      | 64.0      | 2.354                       | 2650      | 13.18                    |              |
|                         | 28       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.5      | 2.356                       | 2850      | 14.29                    |              |
|                         | 29       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.7      | 2.355                       | 3080      | 15.40                    |              |
|                         | 30       | 4.73 | 54.4                                                      | 64.0      | 2.357                       | 2362      | 11.75                    |              |
|                         | ORTALAMA |      |                                                           | 63.8      | 2.356                       | 2718      | 13.56                    |              |
| Katkı Karışım Numuneler | 31       | 4.73 | 54.4                                                      | 64.3      | 2.390                       | 2669      | 13.22                    | DCM Koşulsuz |
|                         | 32       | 4.73 | 54.4                                                      | 64.5      | 2.392                       | 2573      | 12.70                    |              |
|                         | 33       | 4.73 | 54.4                                                      | 64.0      | 2.401                       | 2688      | 13.38                    |              |
|                         | 34       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.9      | 2.391                       | 1997      | 9.95                     |              |
|                         | 35       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.0      | 2.407                       | 2820      | 14.26                    |              |
|                         | ORTALAMA |      |                                                           | 63.9      | 2.396                       | 2549      | 12.70                    |              |
|                         | 36       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.4      | 2.337                       | 2480      | 12.46                    | DCM Koşullu  |
|                         | 37       | 4.73 | 54.4                                                      | 64.3      | 2.326                       | 2285      | 11.32                    |              |
|                         | 38       | 4.73 | 54.4                                                      | 63.9      | 2.337                       | 2093      | 10.43                    |              |
|                         | 39       | 4.73 | 54.4                                                      | 64.5      | 2.335                       | 24.00     | 11.85                    |              |
|                         | 40       | 4.73 | 54.4                                                      | 64.0      | 2.339                       | 2477      | 12.32                    |              |
|                         | ORTALAMA |      |                                                           | 64.0      | 2.335                       | 2347      | 11.68                    |              |

## ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 09.11.1981

Doğum Yeri Kars

Lise 1996-1999

Kars Anadolu Lisesi

Lisans 1999-2004

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2004-Devam ediyor

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri  
Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim  
Dalı, Ulaştırma Programı

### Çalıştığı kurumlar

2004-2005

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Boğaziçi  
İmar Md.

2005-Devam ediyor

İstanbul Büyükşehir Belediyesi İ.S.K.İ  
Emlak Kamulaştırma Daire Başkanlığı  
Kamulaştırma Md.