

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARA SÖNMÜŞ KİREÇ İLAVESİ ETKİLERİNİN  
BULANIK MANTIK YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

**BETÜL DEĞER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ULAŞTIRMA PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
YRD. DOÇ. DR. MUSTAFA SİNAN YARDIM**

**İSTANBUL, 2014**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARA SÖNMÜŞ KİREÇ İLAVESİ ETKİLERİNİN  
BULANIK MANTIK YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Betül DEĞER tarafından hazırlanan tez çalışması 22.04.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Yrd. Doç. Dr. Mustafa Sinan YARDIM  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Yrd. Doç. Dr. Mustafa Sinan YARDIM  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa GÜRSOY  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat ERGÜN  
İstanbul Teknik Üniversitesi

Günümüzde, karayolları yatırımlarında güvenlik, konfor ve ekonomik yönden üstyapı sistemlerine katkı sağlayabilecek çözümler üretilmesi önemli bir husustur. Bu çalışma kapsamında, karayolu esnek üstyapısı tasarımında kullanılan bitümlü sıcak karışımlara ilave edilen katkı malzemelerinden biri olan sönmüş kirecin etkileri araştırılmış. Tez süresince edinilen bilgi birikimi ve tecrübe çerçevesinde, sönmüş kirecin karayolu üstyapısında kullanımının artarak devam edeceği rahatlıkla ifade edilebilir. Nitekim, sönmüş kireç, çok fonksiyonlu bir malzeme olarak kabul edilmektedir.

Bu tezdeki deneyler, aslında “Esnek Karayolu Üstyapılarında Sönmüş Kireç Katkısı Miktarının Farklı Sıcaklık Değerleri İçin Düşük Sıcaklık Çatlama Direncine Etkisi (YTÜ BAP Koordinatörlüğü Proje No. 29-05-01- KAP01)” adlı proje çerçevesinde karşılaşılan bazı problemleri çözmek için gündeme gelmiştir. Elde edilen sonuçlarla araştırma projesinin diğer aşamalarına geçilebilmiştir. YTÜ BAP Koordinatörlüğü’ne 29-05-01-KAP01 numaralı araştırma projesine verdikleri destekten dolayı teşekkür ederim.

Öncelikle, çalışmalarımın hazırlanmasında en büyük desteği gördüğüm ve yardımlarını asla esirgemeyen çok değerli hocam, tez danışmanım; Yrd. Doç. Dr. Mustafa Sinan YARDIM’a teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Deney süreçlerindeki desteklerinden dolayı, İSFALT Genel Müdürlüğü çalışanlarına; sönmüş kireç temin eden Öztüre Holding ve özellikle Bartın Kireç Fabrikası yöneticilerine; cihaz arızalarını çözen Nihat Bal’a teşekkür etmek istiyorum.

Deneylerin çeşitli aşamalarında bizzat çalışarak emek harcayan YTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü’nün Bitirme Ödevi yapan öğrencilerine de teşekkür ederim.

Son olarak, desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen ve varlıklarıyla bana her zaman cesaret vermiş olan çok sevdiğim aileme, bu süreç içerisinde evlilik yolunda ilk adımı birlikte attığım nişanlım Mehmet Ali Şitilbay’a ve en başta özellikle bulanık mantık konusunda büyük desteklerini de aldığım mesai arkadaşım Gökçe Aydın olmak üzere, beni yalnız bırakmayan tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Nisan, 2014

Betül DEĞER

## İÇİNDEKİLER

|                                                             | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------|-------|
| SİMGE LİSTESİ.....                                          | vii   |
| KISALTMA LİSTESİ.....                                       | viii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                          | ix    |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                       | xi    |
| ÖZET .....                                                  | xii   |
| ABSTRACT.....                                               | xv    |
| BÖLÜM 1                                                     |       |
| GİRİŞ.....                                                  | 1     |
| 1.1    Literatür Özeti .....                                | 1     |
| 1.2    Tezin Amacı .....                                    | 29    |
| 1.3    Hipotez .....                                        | 30    |
| BÖLÜM 2                                                     |       |
| MALZEME VE YÖNTEM .....                                     | 32    |
| 2.1    Malzeme .....                                        | 32    |
| 2.2    Malzemelerin Özelliklerinin Belirlenmesi .....       | 33    |
| 2.2.1    Elek analizi Deneyi .....                          | 33    |
| 2.2.2    Özgül Ağırlık Deneyi.....                          | 35    |
| 2.2.2.1    İri Agregası için Özgül Ağırlık Tayini .....     | 36    |
| 2.2.2.2    İnce Agregası için Özgül Ağırlık Tayini .....    | 37    |
| 2.2.2.3    Filler + Sönmüş Kireç Özgül Ağırlık Tayini ..... | 38    |
| 2.2.3    Bitümlü Bağlayıcının Fiziksel Özellikleri .....    | 40    |
| 2.2.4    Sönmüş Kirecin Fiziksel Özellikleri .....          | 41    |
| 2.2.4.1    Sönmüş Kireç ve Mineral Filler.....              | 42    |
| 2.3    Bitümlü Sıcak Karışım Marshall Deneyi .....          | 45    |
| 2.3.1    Agregaların Kullanıma Hazırlanması.....            | 46    |
| 2.3.2    Marshall Numunelerinin Hazırlanması .....          | 46    |

|                                                     |                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.3.3                                               | Hazırlanan Numunelere Marshall Deneyinin Uygulanması .....                                                            | 52         |
| 2.4                                                 | Optimum Bitüm İçeriğinin Hesaplanması .....                                                                           | 56         |
| 2.4.1                                               | Karışım Hesapları için Gerekli Bağlıntılar.....                                                                       | 58         |
| 2.4.1.1                                             | Agrega Efektif Özgöl Ağırlığı.....                                                                                    | 58         |
| 2.4.1.2                                             | Agreganın Bitüm Absorbsiyonu ve Hacim Özgöl Ağırlığı .....                                                            | 59         |
| 2.4.1.3                                             | Teorik ve Pratik Birim Hacim Ağırlık Tayini .....                                                                     | 60         |
| 2.4.1.4                                             | Sıkıştırılmış Kaplama Karışımındaki Boşluk Hacmi .....                                                                | 61         |
| 2.4.1.5                                             | Numunedeki Bitüm Hacmi .....                                                                                          | 61         |
| 2.4.1.6                                             | Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi ve Agregalar Arası Boşluk Hacmi ...                                                      | 62         |
| 2.5                                                 | Bulanık Mantık .....                                                                                                  | 64         |
| 2.5.1                                               | Bulanık Küme ve Üyelik Dereceleri.....                                                                                | 65         |
| 2.5.2                                               | Üyelik Fonksiyonları.....                                                                                             | 66         |
| 2.5.3                                               | Bulanık Sistem .....                                                                                                  | 67         |
| 2.5.4                                               | Çalışma kapsamında yapılan modelleme aşamaları.....                                                                   | 68         |
| <b>BÖLÜM 3</b>                                      |                                                                                                                       |            |
| <b>BULGULAR.....</b>                                |                                                                                                                       | <b>73</b>  |
| 3.1                                                 | Marshall Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi .....                                                                   | 73         |
| 3.2                                                 | Elde Edilen Marshall Dizayn Sonuçları ile Marshall Hesap Sonuçlarının Karşılaştırılması .....                         | 79         |
| 3.3                                                 | Bulanık Mantık Model Sonuçları.....                                                                                   | 83         |
| 3.3.1                                               | Bulanık Dizayn Sonuçları ile Marshall Dizayn Sonuçları Karşılaştırması ve Bulanık Mantık Modelinin Doğrulanması ..... | 87         |
| 3.3.2                                               | Bulanık Dizayn Sonuçları ile Marshall Hesap Sonuçları .....                                                           | 90         |
| <b>BÖLÜM 4</b>                                      |                                                                                                                       |            |
| <b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                      |                                                                                                                       | <b>93</b>  |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                               |                                                                                                                       | <b>96</b>  |
| <b>EK-A</b>                                         |                                                                                                                       |            |
| <b>DİZAYN NUMUNELERİNE AİT DENEY FORMLARI .....</b> |                                                                                                                       | <b>108</b> |
| A-1                                                 | Marshall Deney Formu (Dizayn No 1) .....                                                                              | 109        |
| A-2                                                 | Marshall Deney Formu (Dizayn No 2) .....                                                                              | 110        |
| A-3                                                 | Marshall Deney Formu (Dizayn No 3) .....                                                                              | 111        |
| A-4                                                 | Marshall Deney Formu (Dizayn No 4) .....                                                                              | 112        |
| A-5                                                 | Marshall Deney Formu (Dizayn No 5) .....                                                                              | 113        |
| A-6                                                 | Marshall Deney Formu (Dizayn No 6) .....                                                                              | 114        |
| A-7                                                 | Marshall Deney Formu (Dizayn No 7) .....                                                                              | 115        |
| A-8                                                 | Marshall Deney Formu (Dizayn No 8) .....                                                                              | 116        |
| A-9                                                 | Marshall Deney Formu (Dizayn No 9) .....                                                                              | 117        |
| A-10                                                | Marshall Deney Formu (Dizayn No 10) .....                                                                             | 118        |
| A-11                                                | Marshall Deney Formu (Dizayn No 11) .....                                                                             | 119        |
| A-12                                                | Marshall Deney Formu (Dizayn No 12) .....                                                                             | 120        |
| A-13                                                | Marshall Deney Formu (Dizayn No 13) .....                                                                             | 121        |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| A-14 Marshall Deney Formu (Dizayn No 14) .....                       | 122 |
| A-15 Marshall Deney Formu (Dizayn No 15) .....                       | 123 |
| EK-B                                                                 |     |
| OPTİMUM BİTÜM İÇERİĞİNDEKİ DENEY SONUÇ FORMLARI .....                | 124 |
| B-1 Optimum Bitüm İçeriğine Göre Hesap Sonuçları (Dizayn 1-8) .....  | 125 |
| B-2 Optimum Bitüm İçeriğine Göre Hesap Sonuçları (Dizayn 9-15) ..... | 126 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                       | 127 |



## SİMGE LİSTESİ

|              |                                                                                        |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $D_p$        | Pratik özgül ağırlık ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )                                       |
| $F$          | Akma (mm)                                                                              |
| $VMA$        | Agregalar arası boşluk oranı (%)                                                       |
| $VFA$        | Asfaltla dolu boşluk oranı (%)                                                         |
| $MS$         | Marshall stabilitesi (kN)                                                              |
| $V_h$        | Boşluk oranı (%)                                                                       |
| $G_{sb}$     | Hacim özgül ağırlık ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )                                        |
| $G_{sa}$     | Zahiri (görünür) özgül ağırlık ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )                             |
| $G_{ef}$     | Etkin (efektif) özgül ağırlık ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )                              |
| $G_{fa}$     | Absorbsiyon (%)                                                                        |
| $P_{ba}$     | Agreganın bitüm absorpsiyonu (%)                                                       |
| $G_B$        | Bitüm özgül ağırlığı ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )                                       |
| $P_B$        | Agreganın kütlece yüzdesi olarak bitüm yüzdesi (%)                                     |
| $G_m$        | Gevşek kaplama karışımın boşluksuz maksimum özgül ağırlığı ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) |
| $G_{iri}$    | Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )                        |
| $G_{ince}$   | İnce agreganın hacim özgül ağırlığı ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )                        |
| $G_{filler}$ | Fillerin özgül ağırlığı ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )                                    |
| $P_{iri}$    | Kaba agreganın kütlece yüzdesi (%)                                                     |
| $P_{ince}$   | İnce agreganın kütlece yüzdesi (%)                                                     |
| $P_{filler}$ | Filler malzemenin kütlece yüzdesi (%)                                                  |
| $D_T$        | Teorik birim hacim ağırlık ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )                                 |
| $P_{agrega}$ | Numunedeki agrega miktarı (gr)                                                         |
| $P_{bitüm}$  | Numunedeki bitüm miktarı (gr)                                                          |
| $W_{hava}$   | Numunenin havadaki ağırlığı (gr)                                                       |
| $W_{su}$     | Numunenin sudaki ağırlığı (gr)                                                         |
| $V_b$        | Numunedeki bitüm hacmi ( $\text{cm}^3$ )                                               |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|      |                                            |
|------|--------------------------------------------|
| AC   | Asphalt Content                            |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| EVA  | Etilen Vinil Asetat                        |
| KGM  | Karayolları Genel Müdürlüğü                |
| SK   | Sönmüş kireç                               |
| TSE  | Türk Standartları Enstitüsü                |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                       | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1. 1 Nem hasarı sonucu oluşan soyulma problemi örneği .....                     | 3     |
| Şekil 1. 2 Kil ve sönmüş kireç arasındaki puzolanik reaksiyon görünümü .....          | 4     |
| Şekil 1. 3 Killi zeminlerde uygulanan sönmüş kireç stabilizasyonu .....               | 4     |
| Şekil 1. 4 Kaplamalarda tekerlek izi oluşumu örneği.....                              | 7     |
| Şekil 1. 5 Sönmüş kireç katkısız-katkılı karışımlarda tekerlek izi oluşumu .....      | 8     |
| Şekil 1. 6 Yorulma çatlağı problemi örneği (timsah sırtı çatlağı).....                | 9     |
| Şekil 1. 7 Sönmüş kireçli-kireçsiz karışımların deformasyon görünümleri.....          | 11    |
| Şekil 1. 8 Oksidasyon ve yaşlanma .....                                               | 12    |
| Şekil 1. 9 Çift Tamburlu mikser.....                                                  | 15    |
| Şekil 1. 10 Sönmüş kirecin agregaya eklenmesi ve karıştırma ünitesinde karışımı ..... | 16    |
| Şekil 1. 11 Depoda bekletilen sönmüş kireç harcı-agrega karışımı .....                | 16    |
| Şekil 1. 12 Literatürde yer alan sönmüş kireç kullanım yöntemleri.....                | 18    |
| Şekil 1. 13 Literatürde SK'nın diğer katkı malzemeleri ile kullanım oranları.....     | 25    |
| Şekil 1. 14 Literatürde karşılaşılan ağırlıkça %SK içeriği cinsi .....                | 26    |
| Şekil 1. 15 Literatürde karşılaşılan SK kullanım miktarları .....                     | 27    |
| Şekil 1. 16 Literatürde karşılaşılan SK kullanım miktarları (mükerrerler dâhil) ..... | 27    |
| Şekil 2. 1 Agregada gradasyon eğrisi .....                                            | 35    |
| Şekil 2. 2 Bazı filler tipi ve karışımları için rigden hava boşlukları .....          | 43    |
| Şekil 2. 3 Sönmüş kireç ile mineral fillerin boşluk oranı karşılaştırması.....        | 44    |
| Şekil 2. 4 Tartımı yapılan numune örnekleri .....                                     | 47    |
| Şekil 2. 5 Agregada-bitüm karışımının hazırlanması .....                              | 48    |
| Şekil 2. 6 Agregalara bitüm ilave edilmesi.....                                       | 49    |
| Şekil 2. 7 Agregada bitümün karıştırılması .....                                      | 49    |
| Şekil 2. 8 Numune kalıpları.....                                                      | 50    |
| Şekil 2. 9 Marshall tokmağı .....                                                     | 51    |
| Şekil 2. 10 Hazırlanan Marshall briketleri.....                                       | 51    |
| Şekil 2. 11 Numunelerin kalıptan çıkarılması .....                                    | 52    |
| Şekil 2. 12 Briket kontrol raporu örneği .....                                        | 53    |
| Şekil 2. 13 Sudaki ağırlık ölçümü .....                                               | 54    |
| Şekil 2. 14 Su banyosu içerisinde bekletilen numuneler .....                          | 55    |
| Şekil 2. 15 Marshall yükleme cihazı.....                                              | 55    |
| Şekil 2. 16 Marshall cihazına bağlı olan ekran görüntüsü örneği.....                  | 56    |
| Şekil 2. 17 Marshall tasarım grafikleri ve optimum bitüm muhtevası tayini .....       | 63    |
| Şekil 2. 18 Bulanık küme ve klasik küme karşılaştırması .....                         | 66    |

|             |                                                                             |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2. 19 | Üyelik fonksiyonlarının alabildiği değişik şekiller.....                    | 67 |
| Şekil 2. 20 | Klasik sistem.....                                                          | 68 |
| Şekil 2. 21 | Genel bulanık sistem .....                                                  | 68 |
| Şekil 2. 22 | %SK ve %AC için üyelik fonksiyonu ( $P_i$ ) değerlerinin anlamı.....        | 70 |
| Şekil 3. 1  | Sönmüş kireç içeriği ve zahiri özgül ağırlık arasındaki ilişki .....        | 75 |
| Şekil 3. 2  | Sönmüş kireç içeriği ve boşluk yüzdesi arasındaki ilişki.....               | 75 |
| Şekil 3. 3  | Sönmüş kireç içeriği ve VFA arasındaki ilişki .....                         | 76 |
| Şekil 3. 4  | Sönmüş Kireç içeriği ve VMA arasındaki ilişki .....                         | 76 |
| Şekil 3. 5  | Sönmüş kireç içeriği ve stabilite arasındaki ilişki .....                   | 77 |
| Şekil 3. 6  | Sönmüş kireç içeriği ve akma arasındaki ilişki .....                        | 78 |
| Şekil 3. 7  | Sönmüş kireç içeriği ve Marshall oranı arasındaki ilişki.....               | 78 |
| Şekil 3. 8  | Pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ) - SK içeriği ilişkisi.....                   | 80 |
| Şekil 3. 9  | Boşluk oranı ( $V_h$ ) - SK içeriği ilişkisi.....                           | 80 |
| Şekil 3. 10 | VMA - SK içeriği ilişkisi .....                                             | 81 |
| Şekil 3. 11 | VFA - SK içeriği ilişkisi .....                                             | 81 |
| Şekil 3. 12 | Akma (F)- SK içeriği ilişkisi.....                                          | 82 |
| Şekil 3. 13 | Stabilite - SK içeriği ilişkisi .....                                       | 82 |
| Şekil 3. 14 | Marshall oranı - SK içeriği ilişkisi.....                                   | 83 |
| Şekil 3. 15 | Girdi parametresi olarak bitüm oranı üyelik fonksiyonu .....                | 84 |
| Şekil 3. 16 | Girdi parametresi olarak sönmüş kireç oranı üyelik fonksiyonu .....         | 84 |
| Şekil 3. 17 | Çıktı parametrelerine ait üyelik fonksiyonları örneği .....                 | 85 |
| Şekil 3. 18 | Matlab programı kullanılarak elde edilen modelin ekran görüntüsü.....       | 86 |
| Şekil 3. 19 | %SK- Akma (F) ilişkisi .....                                                | 87 |
| Şekil 3. 20 | %SK- Boşluk Oranı ( $V_h$ ) ilişkisi .....                                  | 88 |
| Şekil 3. 21 | %SK- Pratik Özgül Ağırlık ( $D_p$ ) ilişkisi .....                          | 88 |
| Şekil 3. 22 | %SK- Asfaltla Dolu Boşluk (VFA) ilişkisi .....                              | 88 |
| Şekil 3. 23 | %SK- Marshall Stabilitesi (MS) ilişkisi .....                               | 89 |
| Şekil 3. 24 | %SK- Agregalar Arası Boşluk (VMA) ilişkisi .....                            | 89 |
| Şekil 3. 25 | Bulanık dizayn sonuçları ile Marshall hesap sonuçları karşılaştırması ..... | 91 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|               | Sayfa                                                                     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Çizelge 1. 1  | Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (1) ..... 19  |
| Çizelge 1. 2  | Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (2) ..... 20  |
| Çizelge 1. 3  | Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (3) ..... 21  |
| Çizelge 1. 4  | Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (4) ..... 22  |
| Çizelge 1. 5  | Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (5) ..... 23  |
| Çizelge 1. 6  | Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (6) ..... 24  |
| Çizelge 2. 1  | Aşınma tabakası granülometrisi şartname sınırları ve deney sonuçları . 34 |
| Çizelge 2. 2  | İri agreganın özgül ağırlığı ve absorpsiyonu ..... 37                     |
| Çizelge 2. 3  | İnce agreganın özgül ağırlığı ve absorpsiyonu ..... 38                    |
| Çizelge 2. 4  | Sönmüş kireç+ filler özgül ağırlık değerleri ..... 39                     |
| Çizelge 2. 5  | Kullanılan bitüm özellikleri ..... 40                                     |
| Çizelge 2. 6  | Kullanılan sönmüş kireç özellikleri ..... 42                              |
| Çizelge 2. 7  | Agrega karışımı için tartım değerleri (geleneksel karışım)..... 46        |
| Çizelge 2. 8  | Marshall dizaynlarına ait filler ve sönmüş kireç miktarları ..... 47      |
| Çizelge 2. 9  | Sönmüş kireç miktarına bağlı optimum bitüm içerikleri ..... 57            |
| Çizelge 2. 10 | Düzeltilme faktörleri ..... 58                                            |
| Çizelge 2. 11 | Optimum bitüm içerikleri hesap sonuçları..... 64                          |
| Çizelge 2. 12 | Sönmüş kireç (%SK) kategorileri..... 69                                   |
| Çizelge 2. 13 | Bitüm yüzdesi (%AC) kategorileri ..... 69                                 |
| Çizelge 2. 14 | Modelde kullanılan kurallar listesi ..... 72                              |
| Çizelge 3. 1  | Marshall dizayn sonuçları..... 74                                         |
| Çizelge 3. 2  | Marshall hesap sonuçları ..... 79                                         |
| Çizelge 3. 3  | Bulanık dizayn sonuçları ..... 87                                         |
| Çizelge 3. 4  | Çıktı değişkenleri için maksimum hata oranları ..... 90                   |
| Çizelge 3. 5  | Tüm sonuçlara ait karşılaştırmaların korelasyon katsayıları ..... 92      |

## **BITÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARA SÖNMÜŞ KİREÇ İLAVESİ ETKİLERİNİN BULANIK MANTIK YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Betül DEĞER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mustafa Sinan YARDIM

Karayolu kaplamalarında bozulmaların meydana gelmesi, yol yapım ve işletiminde karşılaşılan en önemli problemlerden biridir. Bu probleme neden olan etmenlerin en başında, artan trafik hacimleri ve dingil yüklerinin geldiği bilinmektedir. Yol tasarımında hesaba katılmayan bu problem nedeniyle, yolların hizmet ömürlerinde azalmalar görülmektedir. Bu durum, hem yol kullanıcıları hem de karayollarından sorumlu otoriteler için istenmeyen bir durumdur. Yol kaplamalarında karşılaşılan bu problemin çözümü için günümüzde birçok yöntem denenmektedir. Önerilen yöntemlerden biri de yol kaplamalarında kullanılan bitümlü karışımların modifiye edilmesidir. Modifikasyon işlemi için farklı katkı malzemeleri kullanılabilmektedir.

Bitümlü sıcak karışımlarda katkı malzemesi olarak sönmüş kireç kullanımı, günümüzde uygulanan sıcak karışım modifikasyon yöntemlerinin önemli olanları arasında yer almaktadır. Sönmüş kirecin, karışımlarda meydana getirdiği olumlu veya olumsuz etkileri belirlemek için bugüne kadar çok sayıda çalışma yapılmış olup, halen de çalışmalar devam etmektedir. Kullanılan katkı malzemelerinin, karışım üzerindeki etkileri, malzemenin yalnızca türü ile değil, kullanım miktarı ile de doğrudan ilişkilidir.

Bu çalışmada, karayolu kaplamalarında kullanılan bitümlü sıcak karışımlara katkı malzemesi olarak sönmüş kireç ilavesi incelenmiştir. Karışıma ilave edilen sönmüş kireç katkısı miktarının etkileri, geniş ve yüksek hassasiyetli bir aralıkta araştırılmıştır.

Birinci bölümde, sönmüş kirecin karayolu üstyapısındaki çeşitli problemleri çözmek üzere kullanım alanları, yararları, kullanım şekilleri ve katkı olarak kullanım miktarları hakkında yapılan geniş bir literatür araştırması sunulmuştur.

İkinci bölümde, önce çalışmada kullanılan malzemeler tanıtılmış ve malzeme özelliklerini belirlemeye yönelik deneylerin sonuçları sunulmuştur. Çalışmada kullanılan üç temel malzeme, agrega, bağlayıcı ve modifiye edici katkı olarak sönmüş kireçtir. Kullanılan agreganın kaynağı İstanbul'daki Ömerli bölgesi kalker ocaklarıdır. İSFALT A.Ş. Ümraniye Fabrikası'ndan temin edilen bu kalker tipi, genel olarak gri-koyu gri renklidir. Karayolları Teknik Şartnamesi Aşınma-Tip-1 karışım yüzdeleri dikkate alınarak yapılan hesaplama göre, karışımdaki kaba agrega, ince agrega ve filler malzemesi oranları sırayla, %51,3, %41,9 ve %6,8 olarak bulunmuştur. Çalışma kapsamında asfalt çimentosu olarak, Tüpraş Rafinerisi'nden temin edilen AC 50-70 bitüm kullanılmıştır. Katkı malzemesi, Öztüre Holding A.Ş. Bartın Kireç Fabrikası'nda, S-KK 80-T koduyla üretilen ticari söndürülmüş toz kalsiyum kireçtir.

Sonraki aşamada, sönmüş kirecin etkisini incelemek üzere, karışımda kullanılan filler malzemesi miktarı çok düşük miktarlarda (ağırlıkça %0,5 hassasiyetle) azaltılarak, yerine aynı miktarlarda sönmüş kireç ilave edilmiştir. Böylelikle, Marshall yöntemine göre, farklı sönmüş kireç içeriğine sahip 15 adet dizayn seti elde edilmiştir. Her bir Marshall dizaynında 18 numune bulunduğu için toplamda ise  $15 \times 18 = 270$  adet numune hazırlanmıştır. Bu numunelere ait karışım parametrelerinden pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ), Marshall stabilitesi (MS), akma (F), boşluk Oranı ( $V_h$ ), asfaltla dolu boşluk oranı (VFA) ve agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) değerleri belirlenmek suretiyle, her bir Marshall dizaynının optimum bitüm miktarı tayin edilmiştir. Sönmüş kirecin, bitümlü sıcak karışımlarda kullanımının etkileri üzerine gerçekleştirilen bu çalışmanın, yüksek hassasiyetli olması, kullanılan sönmüş kirecin etki aralıklarının ve bunlar arasındaki geçişlerin net bir şekilde görülebilmesine imkân sağlamaktadır.

Çalışmanın takip eden kısmında ise, yapılan numune üretimleri sonucunda elde edilen optimum bitüm muhtevalarına ait; pratik özgül ağırlık, agregalar arası boşluk, boşluk oranı, akma, stabilite ve asfaltla dolu boşluk değerlerinin doğruluğunu kontrol etmek için, bulunan optimum asfalt içerikleri kullanılarak, her dizayn için 3'er adet olmak üzere,  $15 \times 3 = 45$  adet numune üretimi yeniden yapılmıştır.

Üçüncü bölümde elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Bunun için Marshall dizaynına göre üretilmiş 270 adet numuneden elde edilen dizayn sonuçları ve bu numunelere ait optimum bitüm içeriklerine göre üretilen 45 adet numuneden elde edilen hesap sonuçları karşılaştırılarak, uyumlulukları araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen dizayn ve hesap sonuçları arasındaki ilişkiyi modellemek amacıyla bulanık mantık yönteminden yararlanılmış ve 270 adet numunenin üretildiği dizayn sonuçlarından yararlanılarak bir bulanık mantık modeli geliştirilmiştir.

Bulanık mantık modeli sonuçları, optimum bitüm muhtevası ve ilgili %SK oranı kullanılarak elde edilen, hem deney hem de hesap sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Model sonuçları ile dizayn sonuçlarının kabul edilebilir bir uyumluluğa sahip olduğu, model sonuçları ile hesap sonuçları arasında ise hatanın büyüdüğü görülmüştür.

Bu çalışmanın, belirlenen optimum bitüm muhtevelarındaki karışımlara, diğer performans deneylerinin de uygulanmasıyla ortaya çıkacak yeni çalışmalara ışık tutması açısından yarar sağlayacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Bitümlü sıcak karışım, Marshall deney yöntemi, modifiye edici katkı, sönmüş kireç, bulanık mantık



## ABSTRACT

---

### EVALUATION OF THE EFFECTS OF HYDRATED LIME ADDITION TO BITUMINOUS HOT MIXTURES BY FUZZY LOGIC METHOD

Betül DEĞER

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Mustafa Sinan YARDIM

Deterioration of highway pavements is one of the primary problems faced in highway construction and operation. Principal leading factor to this problem is increasing traffic volumes and axle loads. Because of this problem, which is generally not taken into account in the highway design phase, shortening in the service lives of the roads is experienced. This is undesirable for both users of and authorities responsible from the highways. Nowadays, many different methods are being attempted to overcome this problem. One of the methods proposed is modification of the bituminous mixtures. A variety of additives can be used for the modification process.

Usage of hydrated lime as an additive in hot bituminous mixtures is one of the foregoing hot mixture modification methods. Up to now, numerous studies have been conducted to determine the positive and negative effects of hydrated lime on the mixture and the subject is still widely being studied. Effects of any additive on the mixture depend on not only the type but also the amount of the additive.

In this study, usage of hydrated lime as an additive to bituminous hot mixtures used in highway pavements is investigated. The effects of the amount of hydrated lime additive are examined in a wide range with high sensitivity intervals.

In the first part, a comprehensive literature review about the usage of hydrated lime to solve different problems with highway pavements, as well as its benefits, methods of addition and amount of usage of it is presented.

In the second part, experimental materials are introduced and results of the material property determination tests are presented. Three primary materials used in this study are aggregates, binder and hydrated lime (as additive). Aggregate comes from the limestone quarries in Ömerli, İstanbul. The aggregate, which is obtained from İsfalt Inc. Ümraniye asphalt production plant, is mostly grey – dark grey colored. Particle size distribution analysis of the aggregate is done according to the Highway Technical Specifications Wear – Type – 1 mixture percentages and it is found to be 51,3% coarse aggregate, 41,9% fine aggregate and 6,8% filler. Bitumen from Tüpraş refinery with production code AC 50-70 is used as asphalt cement. The additive (hydrated lime) is a commercial product of Öztüre holding Inc. Bartın lime factory, with production code S-KK 80-T.

In the next stage, to assess the effect of the amount of hydrate lime addition on the mixture, the amount of filler is reduced 0,5% by 0,5% by weight, coupled with the addition of exactly the same amount of hydrated lime. Hence, 15 different Marshall Design sets, each having a different hydrated lime content, are obtained. There are 18 specimens per Marshall Design set, adding up to  $15 \times 18 = 270$  specimens. Among the various mixture parameters of those specimens, bulk specific gravity ( $D_p$ ), Marshall Stability (MS), flow (F), air voids ( $V_h$ ), voids filled with asphalt (VFA) and voids in mineral aggregates (VMA) are determined to calculate the optimal bitumen amount for every different Marshall Design. Since hydrated lime is varied with high sensitivity intervals, this study enables the effect intervals of hydrated lime amount and transitions between them to be accurately observed.

In the following phase of the study, to confirm the bulk specific gravity, Marshall Stability, flow, air voids, voids filled with asphalt and voids in mineral aggregates values corresponding to optimal bitumen amounts, 45 specimens, 3 for every different Marshall Designs, are produced, using the calculated optimal bitumen amount.

In the third part, the results are evaluated. For this, design results from the 270 specimens of Marshall Design and computational results from the 45 specimens, produced with the calculated respective optimal bitumen amounts the original designs, are compared.

To model the relation between the design results and the computational results, a fuzzy logic model is developed, using the design results of 270 specimens for calibration. Model outcomes are then compared with both design results and computational results, each of them being obtained by using optimal bitumen content with its respective hydrated lime amount. It is seen that, model outcomes are within a tolerable range of design results. However, the error with respect to computational results is gets larger.

It is thought that, this study will be beneficial, on the basis that it would shed light on future studies, which are likely to include further performance tests on the mixtures with optimal bitumen contents.

**Keywords:** Bituminous hot mixture, Marshall test method, modifying additives, hydrated lime, Fuzzy logic



### GİRİŞ

Yol tasarımları, yolun yapılacağı bölgenin sosyal ve ekonomik durumu göz önüne alınarak, gereksinimleri karşılayacak şekilde yapılmaktadır. Yapılan tasarımlar, hem yol kullanıcılarının hem de yol yapımından sorumlu otoritelerin beklentilerini karşılamalıdır. Kullanıcılar, yüksek konfor, düşük ulaşım maliyeti ve hızlı-kolay erişim talep ederken, otoriteler, yapım maliyeti düşük, hizmet ömrü uzun ve güvenlik düzeyi yüksek yol tasarımları gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır.

Ülkemizde, yol üstyapısı inşaatında, genellikle esnek üstyapı tercih edilmektedir. Karayolu esnek üstyapısı, trafik yükleri ve çevresel faktörlerin sebep olduğu gerilmeleri karşılaması için tasarlanan ve taban zemininin üzerine yerleştirilen tabakalardan oluşan üstyapı sistemidir. Esnek üstyapıların stabilitesi, agregaların birbirleriyle kenetlenmesine, taneler arasındaki sürtünmeye ve kohezyona bağlıdır [1]. Bitümlü karışımların, hizmet ömürleri süresince beklenen performansı göstermeleri gerekmektedir. Bitümlü karışımlardan hizmet süresince beklenen fiziksel ve mekanik özelliklerden başlıcaları; stabilite, dayanıklılık, esneklik, yorulmaya ve kaymaya karşı direnç, geçirimsizlik ve işlenebilirliktir [2]. Bu özellikleri iyileştirmek için, günümüzde birçok çalışma sürdürülmektedir. Karışımlarda daha yüksek performans sağlayabilmek için kullanılan yöntemlerden biri de farklı katkı malzemeleri kullanımıdır. Sönmüş kireç de bu katkı malzemeleri arasında yer almaktadır.

#### 1.1 Literatür Özeti

Sıcak asfalt karışımlarında nem hassasiyetini ve soyulmayı azaltıcı etki yaratan kireç, 1910 yılından bu yana Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılmıştır. Sönmüş kireç,

uzunca bir süre soyulma önleyici katkı malzemesi olarak bilinse de, son çalışmalarda kireç kullanımının diğer önemli faydaları şu şekilde sıralanmaktadır [3]:

- Tekerlek izi oluşumuna karşı direnç sağlama
- Düşük sıcaklık çatlaklarının büyümesine karşı direnç sağlama ve sertliği arttırma
- Bağlayıcının oksidasyon kimyasını değiştirme ve yaşlanma sertleşmesini azaltma
- Kil tanelerini değişime uğratarak, nem dengesini ayarlama ve dayanıklılığı arttırma

Kireç, karışıma dağıldığında, bitümle reaksiyona girer, yüksek sıcaklıklarda asfalt karışımını daha rijit ve sağlam (dayanıklı) yaparken istenmeyen bileşimleri kaldırır. Sönmüş kirecin ilavesi, düşük sıcaklıklarda karışımı daha kırılğan olmaktan kurtarır.

Sıcak asfalt karışımı kaplamalarda görülen, asfaltın reolojik özelliklerinden etkilenen temel sorunlar soyulma, bozunma ve çatlamadır [4]. Bitümlü sıcak karışımların performanslarını iyileştirme adına katkı malzemesi kullanımı ile ilgili literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bitümlü sıcak karışımlara ilave edilen katkı malzemelerinin özelliklerine göre, karışıma sağladıkları faydalar da çeşitlilik göstermektedir. Katkı malzemesi olarak sönmüş kireç kullanımı oldukça yaygın bir uygulamadır. Sönmüş kireç katkısının, bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki bilinen etkilerini konu alan araştırmalar oldukça fazladır. Yapılan araştırmaların büyük bir kısmı bu çalışma kapsamında incelenmiş ve literatür özeti olarak aşağıda sunulmuştur.

*a) Bitümlü sıcak karışımlarda, sönmüş kireç kullanımının, soyulmaya karşı etkisi*

Soyulma, nem etkisi ile karışımlardaki bitümlü bağlayıcı ve agrega arasındaki bağın kopması sonucunda meydana gelmekte ve agrega ile bağlayıcıyı birbirinden ayırarak, bitümlü karışımlarda önemli problemlere neden olmaktadır (Şekil 1.1). Belli agrega tipleri, özellikle soyulma eğilimindedirler. Sıcaklık, şiddetli yağışlar, donma-çözülme döngüsü ve trafik yükleri, soyulmanın meydana gelmesinde önemli ölçüde etkilidir. Sönmüş kireç ise, bilinen en etkin soyulma önleyici katkı malzemesi olup, yaygın bir şekilde belirtilen soyulma problemlerine çözüm olmaktadır [3, 5, 6, 7].

Sönmüş kireç sıcak asfalt karışımlarına eklendiğinde, agregayla reaksiyona girer ve agrega ile bağlayıcı arasındaki bağın güçlenmesini sağlar [8]. Sönmüş kireç, agregada olduğu gibi, aynı zamanda asfaltın kendisi ile de reaksiyona girer ve soyulmaya neden olan suda çözünen sabun oluşumunu önler. Bu sayede, yüksek polar molekülleriyle

tepkime meydana getirir ve oluşan yeni moleküller artık suya ilgi duymaz. Uzun dönemli performans anlamında çoklu donma-çözülme döngüleri ile kirecin yüksek başarısı ortaya konulabilmektedir [3, 5, 6, 8].

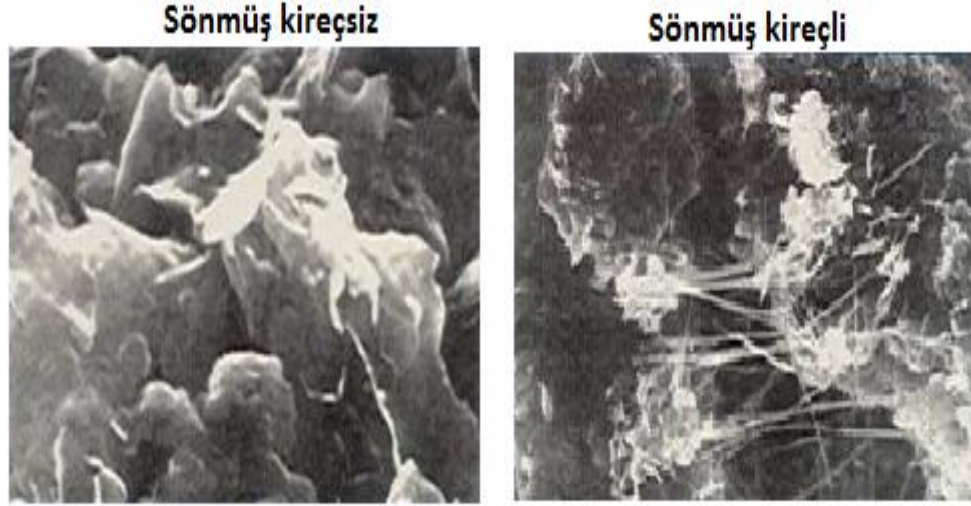


Şekil 1. 1 Nem hasarı sonucu oluşan soyulma problemi örneği [5]

Sönmüş kireç, ayrıca, kil tanelerinin inceliğini değiştirir. Böylece, karışımın neme karşı dayanıklılığı artar. Ayrıca, sıcak karışımlarda veya stabilizasyon tabakalarında kil parçacıkları varsa, bunların plastisite özelliklerini değiştirerek, suya ilgisini kaybetmesini sağlar. Böylece killi malzemelerin su karşısındaki davranışlarını kontrol etmede yarar sağlar [3, 5, 9, 10].

Kil, içerisindeki doğal su (doğal nem) sebebiyle kolloidal bir yapıya sahiptir. Yani homojen görünümlü bir heterojen durumdadır. Sönmüş kireç parçacıkları su içinde,  $\text{Ca}^{+2}$  ve  $\text{OH}^-$  iyonlarını böler.  $\text{OH}^-$  iyonları, pH değerinde artışa sebep olmaktadır.  $\text{Ca}^{+2}$  iyonları ise, kil taneciklerinin etrafını sararak, makro tanecikler oluşturur ve salkımlaşma (flokülasyon) meydana gelir [11].

Killi zeminlerde bulunan silisyum ve alüminyum atomları, kireç ile ortamın pH değerinin yükselmesine ve yüzeylerinin çözülerek yeni reaksiyonların oluşmasına sebep olmaktadır. Bunlar sonucunda; topaklanma, katyon değişimi, karbonatlaşma ve puzolanik reaksiyonlar (Şekil 1.2) sonucunda, çimento mineralleri oluşmaktadır [12].



Şekil 1. 2 Kil ve sönmüş kireç arasındaki puzolanik reaksiyon görünümü [11]

Killi zeminlerde yapılan kireç stabilizasyonu sonucunda, kilin geoteknik özelliklerinde çok kısa sürede aşağıdaki değişiklikler meydana gelmektedir [12].

- Optimum su muhtevasında artma
- Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde düşme
- Plastik limitte artma
- Plastisite indisinde düşme
- CBR ( Kaliforniya taşıma oranı) değerinde artma
- Taşıma gücünde artma
- Geçirgenlikte artma.

Killi zeminlerde stabilizasyon amaçlı kullanılan sönmüş kirecin etkisi Şekil 1.3’de görüldüğü gibi, zeminin daha dayanıklı ve esnek olmasını sağlamaktadır.



Şekil 1. 3 Killi zeminlerde uygulanan sönmüş kireç stabilizasyonu [13]

Sönmüş kirecin soyulma önleyici özelliklere sahip olduğunu göstermek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Hamburg tekerlek izi deneyi, sıcak asfalt karışımlarının nem hassasiyetini ve yük altında kalıcı deformasyona karşı direncini belirlemede kullanılan bir yöntemdir. Izzo ve Tahmoressi [14], 40°C sıcaklıkta gerçekleştirilen test ile sönmüş kireç katkılı karışımların, diğer sıvı soyulma önleyici katkılarla karşılaştırıldığında en iyi performansa sahip olduğu ve yine 40°C sıcaklıkta en kötü performansın da hiç soyulma önleyici katkı içermeyen karışımlarda görüldüğünü saptamıştır. Sönmüş kirecin nem hassasiyetine karşı performansı geliştirdiğini göstermişlerdir.

Maldonado ve Fee [15], yaptıkları çalışmada ağırlıkça %2 sönmüş kireç içeren karışım ve %0,5 soyulma önleyici sıvı içeren karışımlara Lottman deneyi uygulamıştır. Deney sonucunda elde edilen verilere göre, sönmüş kireç katkılı karışımların soyulmaya karşı dirençlerinin, soyulma önleyici sıvı içeren karışımlara göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Sebaaly vd. [16], ağırlıkça %1 sönmüş kireç katkılı karışım ve %0,5 soyulma önleyici sıvı kullanılan karışımların, donma-çözülme yöntemi ile soyulmaya karşı dirençlerini karşılaştırmış ve sönmüş kireç katkılı karışımların çok daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Huang vd. [17], Kennedy [18], Kennedy vd. [19, 20] ile Jaskula ve Judycki [21] de donma-çözülme yöntemini kullanarak, sönmüş kirecin soyulma önleyici olarak olumlu etki yarattığını göstermişlerdir.

Sebaaly vd. [22] tarafından yapılan bir çalışma, Güney Dakota Ulaştırma Bakanlığı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, çeşitli soyulma önleyici katkıların performansları karşılaştırılmıştır. Sönmüş kirecin, diğer sıvı soyulma önleyici katkılardan çok daha iyi bir performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Berger ve Huege [23], sönmüş kirecin, karışımların nem hassasiyetini azaltmada ve karışımın adhezyon-kohezyon özelliklerini geliştirmede en etkili katkı malzemesi olduğunu belirtmiştir.

Little ve Epps [9], asfaltın sönmüş kireçle modifikasyonunun soyulmayı azaltıcı etkisi olduğunu belirtmiştir. Hamburg tekerlek izi deneyi modeliyle, ağırlıkça %1 sönmüş kireç kullanımıyla elde edilen karışımın, 45°C deki 20.000 geçiş etkisiyle oluşan bozulma derinliğinin, sönmüş kireç içermeyen karışımlarda oluşanlara göre çok daha düşük

olduğunu göstermiştir. Yapılan bu çalışmanın bir benzeri de Aschenbrener ve Far tarafından [24] gerçekleştirilmiş ve sönmüş kireç kullanımının soyulmaya karşı olumlu etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.

Görkem ve Şengöz [25], sönmüş kireç ilavesi ile örneklerdeki soyulma potansiyelinin önemli derecede azaldığını gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında Nicholson soyulma testi (ASTM D 1664) ve Lottman testi (AASHTO T 283) kullanarak, sönmüş kireç katkısının suyun zararlı etkisine karşı direnç artışı sağladığını göstermişlerdir. Aynı çalışmada, Etilen Vinil Asetat (EVA) katkısı kullanılarak hazırlanan başka numuneler ile sönmüş kireç katkılı olanlar karşılaştırılarak, sönmüş kirecin daha yüksek soyulma direnci sağladığı belirlenmiştir.

Abo-Qudais ve Al-Shweily [26] ile Maupin [27] yapılan çalışmalarda, sıcak asfalt karışımlarında soyulma sorununa karşı, sönmüş kirecin, soyulma önleyici katkı malzemelerinden daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

ABD'nin Orta-Batı bölgesinde yer alan Colorado devletinde yapılan bir ankette, 25 eyalette soyulma önleyici sıvı, 13 eyalette sönmüş kireç kullanıldığını ve 7 eyalette de ya soyulma önleyici sıvı ya da sönmüş kireç kullanıldığını belirtmiştir [28].

Brûlé ve Bourlot [29], bitümlü karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan Duriez Test yöntemiyle, ağırlıkça %1 sönmüş kireç içeren karışımlar ve %3 EVA katkılı karışımların performanslarını araştırmış, sönmüş kireçli karışımların, sönmüş kirecsiz karışımlara göre basınç dayanımlarının daha yüksek ve kütle kayıplarının daha az olduğunu göstermişlerdir.

Johannson [30], bitümlü kaplamalarda soyulma önleyici katkı olarak sönmüş kireci kullanarak; kirecin bitümün erken yaşlanmasını geciktirdiğini ve böylece adezyon kuvvet mekanizmasını iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Birçok çalışmada da belirtildiği gibi, bitümlü kaplamalarda soyulma önleyici katkı olarak sönmüş kireç kullanımı, bitümlü bağlayıcının yaşlanmasını geciktirir ve adhezyon mekanizmasını iyileştirir, nem tehlikesine ve soyulmaya karşı da oldukça etkilidir [31]. Sönmüş kirecin, sıcak asfalt karışımlarında, soyulmayı ve diğer nem hasarı sorunlarını azaltan bir katkı malzemesi olduğunu göstermek amacıyla yapılan literatürdeki diğer çalışmaların başlıcaları; Arnold vd. [32], Kim vd. [33], Prowell ve Youtcheff [34], Cramer

vd. [35], McCann ve Sebaaly [36], Hicks [37], Cowsey ve Wong [38], Hanson vd. [39], Khattak ve Kyatham [40], Tunnicliff ve Root [41], Youtcheff ve Aurilio [42], Cooley vd. [43], Shuler ve Douglas [44], Airey vd. [45], Radenberg [46] ile Lu ve Harvey [47] olarak zikredilebilir.

Sönmüş kireç, mekanik olarak asfalt-agrega bağının kırılma riskini azaltmakta ve ortamda su bulunmasa bile bu anlamda olumlu bir etkiye neden olmaktadır [3, 6, 8, 48].

Kök ve Yılmaz [49] yaptıkları çalışma ile sönmüş kirecin, bitüm ve agregası arasındaki bağı güçlendirdiğini ve su hasarına karşı direnç sağladığını tespit etmiştir.

*b) Bitümlü sıcak karışımlarda, sönmüş kireç kullanımının rijitliğe ve gerilmelere karşı etkisi*

Tekerlek izi, gerilmelerle kaplamanın malzeme elastikliğinin aşılmasından veya deformasyon geri dönüş yeteneğinin kaybolmasından dolayı meydana gelen kalıcı deformasyon olarak tanımlanabilir (Şekil 1.4). Sönmüş kirecin asfalt karışımlarını, daha sert, dayanıklı ve tekerlek izi direnci yüksek yapabilme yeteneği, onun aktif mineral filler gibi iyi bir performans sergilemesinin yansımasıdır. Çoğu mineral fillerin aksine, sönmüş kireç, kimyasal olarak aktiftir. Sönmüş kireç, karışıma dağıldığında, bitümle reaksiyona girerek, karışımda istenmeyen dağınık ufak parçacıklı bileşenleri kaldırır. Böylelikle, karışımın tekerlek izi ve yorulma çatlağı oluşumuna karşı daha dirençli olmasını sağlar [3, 5].



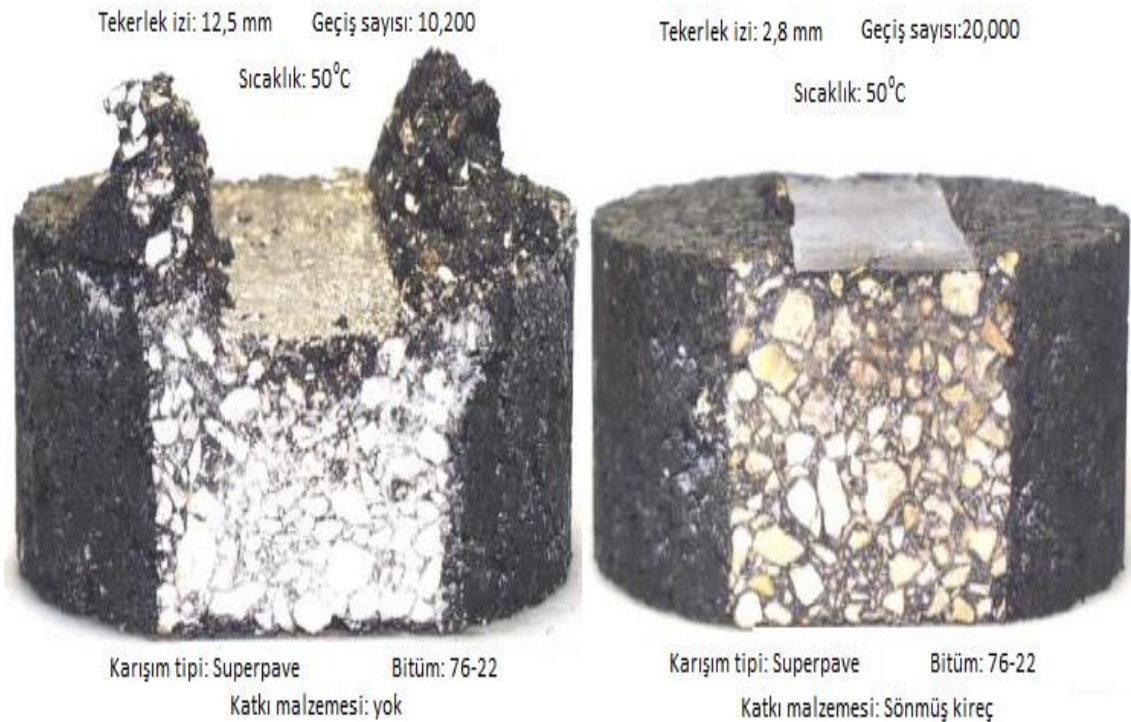
Şekil 1. 4 Kaplamalarda tekerlek izi oluşumu örneği [5]

Sönmüş kireç ilaveli karışımlarda, “asfalt çimentosu molekülleri-sönmüş kireç reaksiyonu”yla, artık suya ilgi duymayan ve çözünmeyen tuzlar oluşmaktadır. Ayrıca, SK parçacıklarının karışım içerisinde dağılması ile karışımın rijitliği artmaktadır [50].

Dallas ve Epps yaptıkları çalışmada [51], bitümlü sıcak karışımlarda sönmüş kireç kullanımının, karışımın rijitliğini arttırdığını gözlemlemiştir. Bununla birlikte, sönmüş kireç, karışımdaki mastiğin yumuşama noktası değerini arttırmaktadır [50, 52]. Karışımın stabilite artışı, daha az kuruma süresiyle açıklanabilir ve sönmüş kireç ile portland çimentosu, bitümlü karışımların kırılma zamanını azaltabilmektedir [53, 54].

Sönmüş kireç, karışımın esneklik modülünün yükselmesine sebep olarak [55, 56], kaplamaların gerilmelere karşı mukavemetinin artmasını sağlamaktadır [7, 57, 58, 59, 60]. Özellikle de trafik yüklerinin neden olduğu gerilmelerin yayılmasına yardımcı olarak, mukavemeti arttırmaktadır [7, 57, 59].

Sönmüş kirecin tekerlek izi oluşumuna etkisi ile ilgili yapılan bir çalışmada, sönmüş kireç ilavesiz karışıma 50<sup>0</sup>C’de Hamburg modeli tekerlek izi test cihazı ile gerçekleştirilen 10.000 geçiş ile elde edilen bozulma derinliği, 12,5 mm olarak bulunmuştur. Ancak, sönmüş kireç ilave edilen karışımda ise bu test sonucunda, 20.000 geçiş ile 2,8 mm değerinde bozulma derinliği oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 1.5).



Şekil 1. 5 Sönmüş kireç katkısız-katkılı karışımlarda tekerlek izi oluşumu [61]

*c) Bitümlü sıcak karışımlarda sönmüş kireç kullanımının kalıcı deformasyonlara ve çatlak oluşumuna etkisi*

Çatlama, kaplamanın zayıflaması ve zamanla daha az elastik olmasıyla, trafikten kaynaklanan yorulmadan dolayı meydana gelmektedir. Bununla birlikte, çatlama, çevresel koşullardan da oluşur. Şöyle ki, düşük sıcaklıklar, büyük sıcaklık farkının olduğu bölgeler bu koşullara örnektir. Sönmüş kireç, bu nedenlerden dolayı oluşan çatlamları azaltmaktadır. Genel olarak, karışımın sertliği arttıkça, çatlama oluşum riski de beraberinde artmaktadır. Ancak, sönmüş kireç katkısıyla, yorulma karakteristikleri değişir ve çatlamlar azalır. Kaplama yaşlandıkça çatlamlar, mikro çatlaklar olarak sık sık şekillenmeye başlar, zamanla kaplamaya hasar verecek makro çatlaklara dönüşür. Mikro çatlaklar, sönmüş kirecin küçük parçacıklarının hareketlerine engel olurlar. Kireç, çatlamayı, aktif olmayan fillerden daha fazla azaltır. Bunun sebebi, asfalttaki polar molekülleri ve kireç arasındaki reaksiyondur. Bu reaksiyon, mikro çatlak kusurlarını daha kolay önleyecek olan daha geniş parçacıklar oluşturur. Sonuç olarak, sönmüş kireç, mikro çatlakların önünü keser ve bir araya gelerek daha büyük çatlaklar oluşturmalarını engeller. Ayrıca kaplamanın kırılma direncine de katkıda bulunur [3].



Şekil 1. 6 Yorulma çatlak problemi örneği (timsah sırtı çatlak) [5]

Sönmüş kireç, zeminlerin mekanik özelliklerinin gelişmesini sağlamaktadır [9]. Sönmüş kirecin mekanik özellikleri arttırıcı etkileri birçok çalışmada araştırılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda da karışımın kalıcı deformasyon ve yorulma mukavemeti özellikleri üzerinde olumlu etkiler yapmaktadır [9, 57, 62, 63, 64]. Düşük sıcaklıklarda ise yüksek sıcaklıklardaki kadar olmasa da karışımdaki bitümün katılığını arttırır [52].

Al-Suhaibani vd. [50], Niazi ve Jalili [55], Lesueur ve Little [62], Mohammad vd. [63], Kennedy ve Ping [65], Si vd. [66], Huang vd. [67], Shahrour ve Saloukeh [68] yaptıkları çalışmalar sonucunda, sönmüş kirecin, karışımların kalıcı deformasyonlarının azaltılmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sönmüş kirecin bu etkisi, sıcak asfalt karışımlarda tekerlek izi oluşumuna karşı direnç sağlayan sertleşme özelliklerinin gelişmesini sağlamaktadır [7, 46, 57, 59, 62, 69].

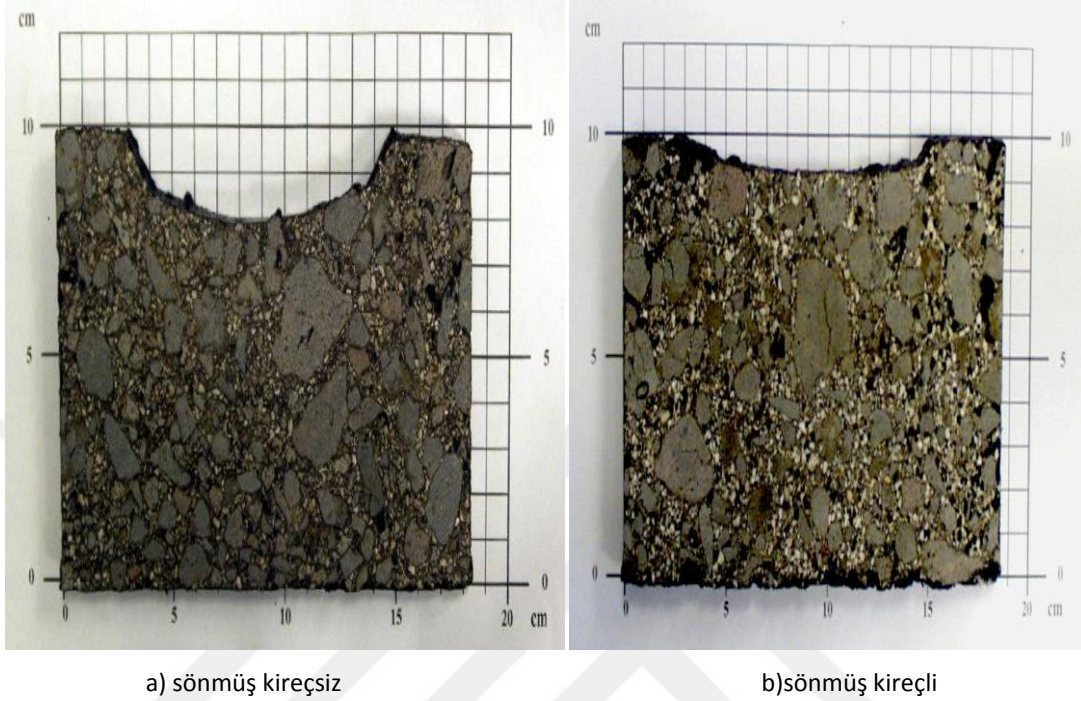
Tahmoressi [70], Texas Ulaştırma Bakanlığı'ndan yaptığı çalışmada, sönmüş kirecin, kireç taşı karışımlarının performansına olan etkilerini araştırmıştır. Araştırma sonucunda, %1 sönmüş kireç katkısının, tekerlek izinde %50 oranında azalma meydana getirdiğini belirtmiştir.

Sönmüş kirecin yüksek sıcaklık altında da sıcak asfalt karışımlarının kalıcı deformasyonlarını azaltıcı etki yarattığı, Aschenbrener ve Far [24] ve Collins vd. [71] tarafından yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Düşük sıcaklıklarda ise yüksek sıcaklıklardaki kadar olmasa da karışımdaki bitümün katılığını artırıcı etkisi olduğu belirtilmektedir [9, 63].

SK, düşük sıcaklık çatlaklarına karşı mukavemeti olumlu yönde etkileyerek, çatlama potansiyelini düşürür [59, 62]. Donma-çözülme döngüsünü kontrol ederek, mikro-çatlakların büyümesini azaltır [72]. SK katkısının, uygun şartlarda, düşük sıcaklık sertleşmesini arttırmasına rağmen, çatlak oluşumuna karşı direnci de aynı oranda arttırdığı; gevrekliği azalttığı belirtilmektedir [59]. SK'nın çatlak önleyici olarak kullanımı ile ilgili araştırmalar günümüzde de devam etmektedir [64].

Viyana Teknik Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada, sönmüş kireç kullanılmadan hazırlanan karışımlarda donma-çözülme döngüleri sonucunda elde edilen %1,5

orandaki deformasyon 9.000 döngü sonucunda elde edilmiştir (Şekil 1.7a). Ancak, sönmüş kireç kullanımı ile 25.000 döngü sonucunda elde edilen deformasyonun çok daha az olduğu görülmektedir (Şekil 1.7b).



Şekil 1. 7 Sönmüş kireçli-kireçsiz karışımların deformasyon görünüşleri [61]

*d) Bitümlü sıcak karışımlarda, sönmüş kireç kullanımının yaşlanmaya karşı etkisi*

Oksidasyon ve yaşlanma, zaman içerisinde kaplamanın daha az elastik ve kırılğan hale gelmesi ile oluşmaktadır. Özellikle, bitümdeki polar moleküller çevreyle reaksiyona girmekte, karışımın daha rijit olmasına neden olmakta, yüklemenden sonra deformasyon geriye dönüşlerini daha aza indirmekte ve böylece kaplama bozulmalarının oluşmasına neden olmaktadır. Bitümlü karışımlara sönmüş kireç ilave edilmesi, bitümün oksitlenme ve yaşlanma oranını azaltır. Bu durum, bitümdeki yüksek polar molekülleri ve kalsiyum hidroksit arasında oluşan kimyasal reaksiyon sonucunda meydana gelmektedir. Asfalta sönmüş kireç ilave edildiği zaman, polar moleküllerini birleştirir ve böylece, polar molekülleri çevre ile reaksiyona giremez. Sonuç olarak, sönmüş kireç ilaveli karışımlarla elde edilen kaplamalar, sönmüş kireç katkısı olmayan karışımlarla yapılanlardan daha uzun yıllar boyunca, esnek ve çatlama oluşumundan korunmuş olarak kullanılabilir [3, 5].



Şekil 1. 8 Oksidasyon ve yaşlanma [5]

Sönmüş kireç, bağlayıcının oksidasyon kimyasını değiştirir [72], yaşlanma sertleşmesini azaltır [9, 37, 62, 63, 65] ve yaşlanma performansını artırır [6, 7, 8, 22, 57, 73, 74, 75].

Witczak ve Bari [4], Martin vd. [76], Oliver [77], Wisneski vd. [78], Bullin vd. [79], Johansson ve Isacsson [80], Elder vd. [81], Branthaver vd. [82], Traxler ve Scrivner [83], Rodriguez vd. [84], Lesueur vd. [85], Anderson vd. [86], Craus vd. [87] ve Bahia vd. [88] yaptıkları çalışmalar sonucunda, sönmüş kirecin, bitümlü sıcak karışımlardaki bağlayıcının yaşlanma performansını artırıcı etkisi olduğunu ve yaşlanma sertleşmesini azalttığını gözlemlemişlerdir.

Johansson [30] tarafından yapılan, bitümlü kaplamalarda soyulma önleyici katkı olarak sönmüş kirecin kullanıldığı çalışmada, kirecin bitümlü bağlayıcının yaşlanmasını geciktirdiği ve adhezyon mekanizmasını iyileştirdiği vurgulanmaktadır.

Sönmüş kireç, yaşlanma sorununun çözümünde, yüksek sıcaklıklarda, düşük sıcaklıklara göre daha etkilidir [59]. Sönmüş kirecin, oksidatif yaşlanma sertleşmesini azaltıcı etkisini gösteren diğer çalışmalar da, Little ve Epps [9], Plancher vd. [89], Johansson vd. [90] ve Huang ve vd. [67] tarafından gerçekleştirilen çalışmalardır.

*e) Bitümlü sıcak karışımlarda, sönmüş kireç kullanımının kaplama ömrüne etkisi*

Modelleme ve saha çalışmaları, sönmüş kirecin asfalt kaplamaların ömrünü uzatmada ve düşük yaşam döngüsü maliyetleri sağlamada etkili olduğunu [23, 74] ve fayda-maliyet hesaplarında SK katkısının önemli bir ekonomiklik sağladığını göstermiştir [91].

Nem hasarı, üst yapı bütünlüğünü bozması sonucunda kaplamanın etkin kullanım ömrünü azaltmaya sebep olacağından, sönmüş kireç kullanımının kaplama ömrünü uzattığı belirtilmekte [92] ve yaklaşık olarak kaplama ömrünü %38 oranında arttırdığı savunulmaktadır [93]. Sönmüş kireç, uzun yıllardan (birkaç 10 yıldır) bu yana Amerika'da kullanılmaktadır. Bazı bölgelerde ise, asfaltta kireç katkısı kullanmak zorunlu tutulmaktadır.

Sönmüş kireç ilavesi üstyapı performansını en üst düzeye çıkarmak ve yaşam döngüsü maliyetlerini azaltmak için ucuz bir sigorta politikası olarak görülebilir. Polimer katkılı durumlarla birlikte, beklentileri yıllarca en üst düzeyde karşılayacak biçimde uyumlu olmaktadır. Fayda-maliyet analizleri, kirecin maliyet açısından uygun olduğunu göstermektedir [93].

*f) Sönmüş kirecin sinerjik faydası*

Sönmüş kirecin sıcak karışım asfaltlara katılmasıyla sonuçlanan önemli faydalardan birisi, yüksek performanslı bir ürün elde edilebilmesidir. Faydalar, katkılarının bireysel olarak kullanılmalarına bağlı tanımlanabilmesine rağmen, sinerjik çalışma durumlarına bağlı olarak, nihai ürünün çoklu anlamda iyileşmesi söz konusu olabilmektedir. Sinerjik yararlar, kirecin, polimer katkılarla birlikte kullanılmasında, kanıtlanabilmektedir. Araştırmalar, kirecin ve polimerlerin, bazı durumlarda, bir arada kullanılmaları ile tek başlarına kullanılmalarına göre, daha yüksek performans artışı sağladığını, göstermektedir [3].

Sönmüş kireç, başka katkı malzemeleriyle (styrene–butadiene–styrene polimerleri) bir arada kullanıldığında, karışımın performansında (özellikle nem hasarına karşı direnç) önemli gelişme sağlamış ve diğer katkılarla yüksek uyum göstermiştir [49].

Mohammed ve Abadie; sönmüş kirecin, sıcak karışım asfaltlara katılması durumunda oluşturduğu yararlardan birisinin de “birlikte çalışma” özelliği olduğunu, kirecin

yararlarının, tek başına kullanıldığında belirgin olmasına karşılık, polimer katkılarla birlikte kullanıldığında daha da arttığını, bu durumun yalnız başına kullanılmasına oranla oldukça büyük iyileşme sağladığını vurgulamaktadır [63].

Sıcak asfalt karışımlarında SK katkısı kullanımının, belirli şartlar dâhilinde (kullanılan agrega türü, kökeni ve gradasyonu; seçilen bağlayıcı tipi, özellikleri ve miktarı; ilave edilen diğer katkı maddesi türü, miktarı, özelliği ve kullanılma biçimi; iklim ve sıcaklık değişimleri, proje hizmet ömrü ve üstyapı yükleme durumları vs gibi) çok ve çeşitli yararları olduğu bildirilmekte; bu bağlamda SK bir bakıma çok fonksiyonlu bir katkı malzemesi olarak nitelendirilmektedir [3, 9, 94].

#### *g) Sönmüş kirecin bitümlü sıcak karışımlara ilave edilme yöntemleri*

Sönmüş kireç bitümlü sıcak karışımlara çeşitli yöntemlerle katılabilir. Yaygın olarak kullanılan dört tane katma yöntemi vardır.

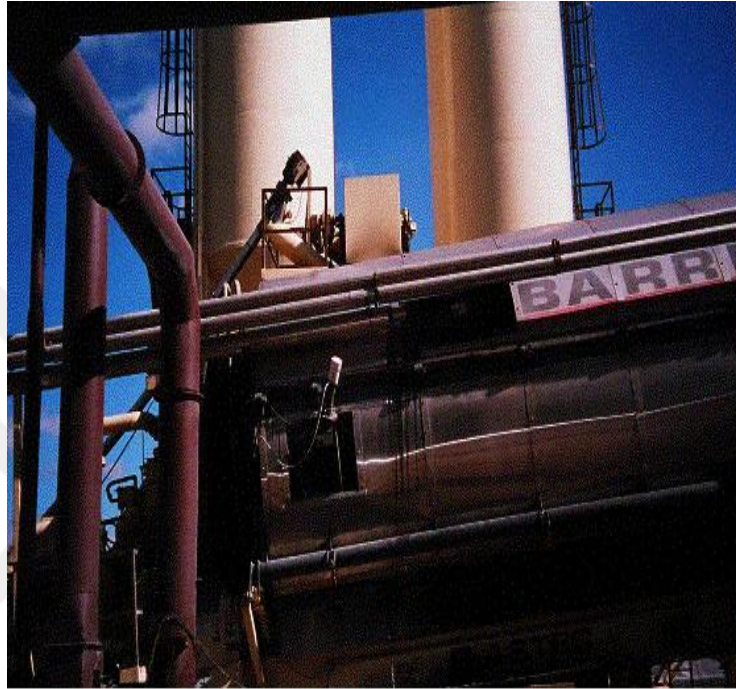
##### **1) Tamburda (Drum) ekleme yöntemi**

Bu yöntem, 1980'lerin ortasında Georgia Eyaleti'nin sıcak asfalt karışımlarda sönmüş kireç katkısı kullanımını uygulanmasıyla başlamıştır. Sönmüş kireç, bu yöntemde bitümlü bağlayıcının tambur mikser katılmasından hemen sonra ilave edilmektedir. Sönmüş kireci eklemek için, karışımın asfalt formuna gelmesine bu kadar yakın bir nokta seçilmesindeki amaç, sönmüş kireç taneciklerinin baca gazı ile birlikte kaçmasını engellemektir. Bu yöntemde gelen eleştiriler arasında, sönmüş kirecin agrega yüzeyini kaplamak yerine, bağlayıcının içinde hapsoldüğüdür. Aynı zamanda yeni asfalt kaplamalarının performansı da sorgulanmış ve tambur tipi karıştırıcılar da eleştirilerin hedefi olmuştur. Bu karıştırıcıların ısı kaynağına çok yakın bölgelerdeki sıcak gazlar nedeniyle asfalt çimentosunda kayıplara neden olduğu ileri sürülmektedir [95].

Asfalt Plant endüstrisi, bu eleştirileri dikkate almış ve ters akımlı mikser sistemleri geliştirmiştir. Bu sistemlerde, karışım ısı kaynağından daha uzak bir bölgede gerçekleşmektedir. Bir başka modifikasyon da, çift tamburlu mikser sistemidir. Bu sistem iç kısımda bir adet hareketli, dış kısımda bir adet sabit tamburdan oluşmaktadır. Agreganın ısıtılması-kurutulması iç kısımdaki tamburda gerçekleşirken, karıştırılması ise

dış tamburda gerçekleşmektedir. Böylece, karışım ısıtma işleminden kaynaklanan sıcak gazların olumsuz etkilerine maruz kalmamaktadır [95].

Şekil 1.9’da Georgia’da bulunan çift tamburlu bir plent gösterilmiştir. Bu tip plentte, bir tanesi sönmüş kireç için, diğeri de mineral filler veya uçucu kül için olmak üzere iki adet silo mevcuttur.



Şekil 1. 9 Çift Tamburlu mikser [95]

Bütün dünyada, sönmüş kireç başlıca saf kuru formunda katılır, fakat aktif bir filler üretmek için (karışık filler) ince kireç taşı ile de karıştırılabilir. Kullanılan sıcak karışım üretim tekniğine bağlı olarak, kireç ya da mineral fillerle birlikte tambura (druma) katılır, ya da harman (batch) sürecinde diğer incelerle birlikte karıştırılır [3].

## 2) Islak agregaya üzerine kuru kireç ekleme yöntemi

Islak agregaya kuru kireç uygulaması en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu yöntem ile yaklaşık %2-3 düzeyinde doygun kuru yüzey koşulunu sağlayan agreganın ihtiyaç duyduğu kireç belirlenerek karıştırılmaktadır. Plente karıştırılmadan önce yeterli karışımı sağlamak için kireçle iyileştirilmiş agregaya karıştırma ünitesinde (pug mill) işlem görülür. Şekil 1.10’da, Güney Carolina’da yer alan asfalt plent ve karıştırma ünitesi (pug mill) gösterilmiştir.



Şekil 1. 10 Sönmüş kirecin agregaya eklenmesi ve karıştırma ünitesinde karışımı [95]

Kirecin bu yöntemde ıslak agregaya üzerine uygulanmasındaki amaç, kuru yöntemdekine göre daha fazla agregaya yüzeyinin sönmüş kireçle kaplanmasını sağlamaktır [69]. Çünkü, kireç, yüzeyi ıslak olan agregaya daha iyi adere olur, yapışır [3]. Bu yöntem göreceli olarak daha basittir, ancak ilave su için yapılması gereken işlemler, plente üretimin önemli ölçüde yavaşlamasına neden olmaktadır.

### 3) Kireç harcı (Slurry) ekleme yöntemi

Bu yöntemde ıslak kireç harcı kullanılır. Kireç ve su karışım durumundadır. Bu yöntemde, kireç harcı, agreganın belirli bir oranı olarak uygulanır.

Bu yöntem kirecin taş yüzeyine iyi kaplanmasını sağlar, harç uygulandıktan sonra agregaya, ya plente beslenerek kurutulur ya da depoda belirli bir süre bekletilir (Şekil 1.11). Böylece agregaya yüzeyindeki kil malzemesi, sönmüş kireç ile reaksiyona girer [3].



Şekil 1. 11 Depoda bekletilen sönmüş kireç harcı-agrega karışımı [95]

#### 4) Sönmüş kirecin doğrudan doğruya bağlayıcıya katılması yöntemi

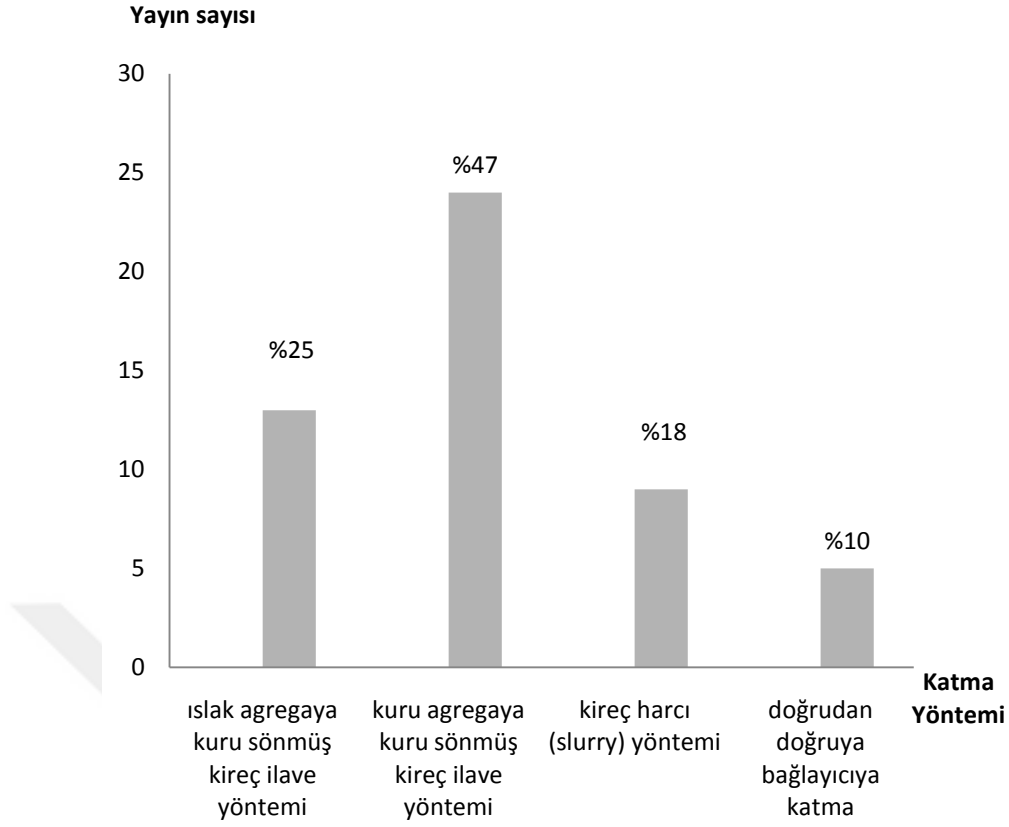
Amerika Birleşik Devletleri, 22 Şubat 2000 tarihli ve 6027558 numaralı patentiyle, sönmüş kirecin, asfalt karışımlar için çok fonksiyonlu bir modifiyer olarak doğrudan doğruya asfalt çimentosuna katılabileceğini tanımlamaktadır. Bu patent, sıcak asfalt karışımlarda, sönmüş kirecin mineral agregaya yerine asfalt bağlayıcıya katılması hakkındadır. Kireç-asfalt karışımı daha sonra mineral agregaya karıştırılmaktadır. Kireç bileşimi, asfaltik bağlayıcıya bileşimdeki asfalt bağlayıcı toplam ağırlığının %10 değerini aşan oranda katılmaktadır [96].

Sönmüş kireç, asfalt kaplamaları iyileştirmek amacı ile sıcak karışımlarda uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bitümlü karışımlarda sönmüş kireç kullanımının yararları tekrar tekrar gösterilmesine rağmen, optimum sönmüş kireç içeriğini elde etmek için, en uygun olan ilave yöntemi ile ilgili karışıklık söz konusu olmuştur. Bitümlü karışımlara sönmüş kireç ekleme yöntemleri daha önce değinildiği üzere; kuru veya ıslak agregaya kuru sönmüş kireç ya da kuru agregaya kireç harcı ilavesi şeklinde olabilmektedir [97].

Şekil 1.12’de, literatürde karşılaşılan çalışmalarda kullanılan, sönmüş kireç ilave yöntemleri görülmektedir. Genellikle kuru agregaya kuru sönmüş kireç ilave yöntemi (%47) tercih edilmektedir. Bu yöntemde de iki yol olduğu belirlenmiştir.

İlki, karışımdaki fillerden azaltılarak bunun yerine kireç eklenmesi (Bu yöntemin %57,5’ini oluşturmaktadır), ikincisi ise mevcut fillerden azaltma yapılmadan kuru agregaya üzerine kuru kireç eklenmesidir (%42,5). Tüm çalışmalar dikkate alındığında ise, %27 ağırlıkla karışımdaki fillerden azaltılarak SK ilavesi yöntemi ilk sırada dikkati çekmektedir. Sönmüş kirecin, doğrudan doğruya bitümlü bağlayıcıya ilave edilmesi ise üzerinde daha az çalışmanın olduğu (%10) uygulama yöntemidir. Sönmüş kirecin, bitüme doğrudan katılması ile kireç bitümlü bağlayıcı sarıp, agregaya-bitüm etkileşimini olumsuz yönde etkileyebileceğinden bu yöntemin daha az tercih edildiği düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında da, sıcak asfalt karışımında kuru agregaya kuru kireç ekleme yöntemi tercih edilmiştir. Karışıma eklenen sönmüş kireç miktarı, yüksek hassasiyetle (%0, %0,5, %1, %1,5, %2, %2,5, %3, %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 ve %6,8) arttırılmış, buna karşılık olarakta aynı miktarlarda filler malzeme miktarı azaltılmıştır. Genel olarak, kuru agregaya kuru kireç yöntemi uygulama açısından da daha basit olduğundan tercih edilmektedir.



Şekil 1. 12 Literatürde yer alan sönmüş kireç kullanım yöntemleri

Diab vd. [97], yaptıkları çalışmada farklı uygulama yöntemleri kullanarak, asfalt karışımlarının mekanik ve yorulma özelliklerinin iyileşmesini değerlendirmiştir. Bunun için, dolaylı çekme mukavemeti ve yorulma deneyleri yapılmış, ayrıca elastisite modülü belirlenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, yorulma ve mekanik özelliklerin geliştirilmesinde sönmüş kireç ilavesi yöntemi önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Yani sönmüş kireç ilavesi olmayan karışımlardan çok daha iyi sonuç elde edilmiştir. Ancak, mekanik test sonuçlarının, sönmüş kirecin karışıma ilave yöntemine karşı, yorulma test sonuçlarından daha fazla hassasiyet gösterdiği belirtilmiştir. Kireç harcı (slurry) ile modifiye edilen karışımların, kuru ve ıslak ilave metotları ile karşılaştırıldığında, daha iyi sonuçlar verdiği söylenmiştir. Ayrıca sönmüş kirecin ıslak agregaya ilave edilmesinin de, kuru agregaya ilave edilmesinden daha iyi sonuç verdiği ispatlanmıştır [97].

Sönmüş kireç, literatürde yer alan bitümlü sıcak karışım performans çalışmalarının birçoğunda yer almış ve çok sayıda faydasının olduğu gözlenmiştir. Çizelge 1-6'da bu çalışma kapsamında yapılan geniş literatür araştırmasının bir özeti sunulmuştur.

Çizelge 1. 1 Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (1)

| Yazar(lar) ve Referans No.      | Katkı adı                   | Katkı Miktarı                        | İlave Yöntemi                             | Olumlu Sonuç                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Görkem ve Şengöz, 2009 [25]     | SBS Kraton D-1101)          | %2, %3,%4, %5 ve %6 (BA)             | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma        | SK, suyun zararlı etkilerini ve nem hassasiyetini azaltmada kullanılan diğer katkılardan daha etkilidir.                                                                                                |
|                                 | EVA 2805                    | %3, %4, %5, %6 ve %7 (BA)            |                                           |                                                                                                                                                                                                         |
|                                 | sönmüş kireç                | %1, %1,5 ve %2 (TAA)                 | ıslak agregaya üzerine kuru kireç yöntemi |                                                                                                                                                                                                         |
| Mohammad vd., 2000 [63]         | sönmüş kireç                | %1,5 (TAA)                           | kireç harcı (slurry) yöntemi              | SK, agregaya iskeletini güçlendirir ve agregaya-bağlayıcı bağını artırır. Yüksek sıcaklık performansını artırır.                                                                                        |
| Huang vd., 2005 [17]            | sönmüş kireç                | %1 (TKA)                             | kireç harcı (slurry) yöntemi              | Kalıcı deformasyonların ve oksidatif yaşlanma sertleşmesinin azalmasını sağlar.                                                                                                                         |
| Kim ve Little, 2004 [98]        | sönmüş kireç                | %5, %10 ve %25 (filler hacmine göre) | filler olarak                             | Yorulma çatlakları oluşumunu azaltır. Karışım sertliğini artırır. Nem hassasiyetini iyileştirir.                                                                                                        |
| Bari ve Witczak, 2005 [99]      | sönmüş kireç                | %1, %1,5, %2, %2,5 ve %3 (KAA)       | filler olarak                             | Soyulmayı azaltır. Sertleşme karakteristiklerini geliştirir.                                                                                                                                            |
| Niazi ve Jalili, 2009 [55]      | sönmüş kireç                | %0,5, %1, %1,5 ve %2 (TAA)           | kuru agregaya üzerine kuru kireç yöntemi  | Her biri stabiliteyi artırır, nem hasarına ve kalıcı deformasyonlara karşı direnç sağlar. Tekerlek izi oluşumunu azaltır.                                                                               |
|                                 | portlant çimentosu          | %0,5, %1, %1,5 ve %2 (TAA)           | toz formunda                              |                                                                                                                                                                                                         |
|                                 | sönmüş kireç harcı          | %0,5, %1, %1,5 ve %2 (TAA)           | kireç harcı (slurry) yöntemi              |                                                                                                                                                                                                         |
| Kök ve Yılmaz, 2007 [49]        | sönmüş kireç                | %2 (TAA)                             | filler olarak                             | Stabiliteyi artırır. Sertleşme karakteristiklerini geliştirir. Gevrekliğin azalmasına ve bağlayıcının sıcaklık hassasiyetine olumlu etki sağlar. Stabilitenin korunmasında sönmüş kireç daha etkilidir. |
|                                 | SBS(Stiren-Buradien-Stiren) | %2, %4 ve %6 (BA)                    | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma        |                                                                                                                                                                                                         |
| Si vd., 2002 [66]               | sönmüş kireç                | %1,5 (TAA)                           | filler olarak                             | Kalıcı deformasyonların azalmasını sağlar.                                                                                                                                                              |
| Cross 1999 [58]                 | sönmüş kireç                | %1,5 (TAA)                           | kireç harcı (slurry) yöntemi              | Nem hassasiyetini ve kalıcı deformasyonları azaltır.                                                                                                                                                    |
|                                 | uçucu kül                   | %9, %10 (BA)                         | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma        |                                                                                                                                                                                                         |
| Prowell ve Youtcheff, 2000 [34] | sönmüş kireç                | %0,5, %1, %2 ve %3 (TAA)             | filler olarak                             | Soyulmaya karşı oldukça etkilidir.                                                                                                                                                                      |

\*TAA: Toplam agregaya ağırlığı cinsinden, \*TKA: Toplam karışım ağırlığı cinsinden, \*KAA: Kuru agregaya ağırlığı cinsinden, \*BA: Bağlayıcı ağırlığı cinsinden

Çizelge 1. 2 Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (2)

| Yazar(lar) ve Referans No.      | Katkı malzemesi Adı       | Katkı Maddesi Miktarı                   | İlave Yöntemi                           | Olumlu Sonuç                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mohammad vd., 2008 [100]        | sönmüş kireç              | %1,5 (TAA)                              | kireç harcı (slurry) yöntemi            | Nem hassasiyetini azaltır. Karışım sertliğini artırır. Kalıcı deformasyonlara direnç artar.                                                                                                           |
| Lesueur ve Little, 1999 [62]    | sönmüş kireç              | %20 (filler hacmine göre)               | filler olarak                           | Yaşlanma sertleşmesini azaltır. Kalıcı deformasyonlarının azaltılmasında önemli bir etkiye sahiptir.                                                                                                  |
| Arnold vd., 2006 [32]           | sönmüş kireç              | %1 (TAA)                                | filler olarak                           | Soyulmayı ve diğer nem hasarı sorunlarını azaltır.                                                                                                                                                    |
| Huang vd., 2002 [67]            | sönmüş kireç              | %20 (BA)(100gr)                         | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma      | Uzun dönem oksidatif yaşlanma sürecinde elastisiteyi korumaya yardımcı olur. Yorulma çatlaklarına karşı direnci artırır. Kaplamanın kullanılabilir servis ömrünü artırır.                             |
| Izzo ve Tahmoressi, 2007 [14]   | sönmüş kireç              | %1 (TAA)                                | kuru agrega üzerine kuru kireç yöntemi  | Sönmüş kireçli karışımlar, soyulma önleyici sıvılardan daha iyi nem hassasiyetine karşı direnç sağlamıştır. Soyulma önleyici katkı malzemesi de, sönmüş kireçsiz karışımdan daha iyi sonuç vermiştir. |
|                                 | soyulma önleyici sıvı     | %0,5 (BA)                               | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma      |                                                                                                                                                                                                       |
| Khattak ve Kyatham, 2008 [40]   | sönmüş kireç              | %20 (asfalt ağırlığına göre)            | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma      | Karışımların nem hassasiyetini azaltır. Nem tehlikesine karşı viskoelastik özellikleri iyileştirir. Mekanik özellikleri iyileştirir.                                                                  |
| Hafeez vd., 2011 [101]          | sönmüş kireç              | %1,5 (TAA)                              | filler olarak                           | Karışımın elastik özelliklerini iyileştirir.                                                                                                                                                          |
| Do vd., 2007 [102]              | geri dönüşümlü atık kireç | filler'in %25, %50, %75 ve %100'ü kadar | filler olarak                           | Yüksek sıcaklıklarda, kalıcı deformasyonlara karşı direnci geliştirir ve yorulmaya karşı direnç sağlar.                                                                                               |
| Tahmoressi ve Mikhail, 1999 [3] | sönmüş kireç              | %1 (KAA)                                | Islak agrega üzerine kuru kireç yöntemi | Yorulma ve termal çatlaklara karşı direnç sağlar. Uzun dönem performansını iyileştirir.                                                                                                               |
| Sebaaly vd., 2003 [3]           | sönmüş kireç              | %0,75 (KAA)                             | Islak agrega üzerine kuru kireç yöntemi | Soyulmayı azaltmada oldukça etkilidir.                                                                                                                                                                |
| Lu and Harvey, 2006 [3]         | sönmüş kireç              | %1,4 (KAA)                              | Islak agrega üzerine kuru kireç yöntemi | Yorulmaya karşı direnç sağlar ve nem hassasiyetini azaltır.                                                                                                                                           |
|                                 | soyulma önleyici sıvı     | %0,75 (BA)                              | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma      |                                                                                                                                                                                                       |
| Aschenbrener ve Far, 1994 [3]   | sönmüş kireç              | %1 (KAA)                                | filler olarak                           | Tekerlek izi oluşumunu azaltır. Soyulmaya karşı direnç sağlar.                                                                                                                                        |
|                                 | soyulma önleyici sıvı     | %0,5 (BA)                               | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma      |                                                                                                                                                                                                       |

\*TAA: Toplam agrega ağırlığı cinsinden, \*TKA: Toplam karışım ağırlığı cinsinden, \*KAA: Kuru agrega ağırlığı cinsinden, \*BA: Bağlayıcı ağırlığı cinsinden

Çizelge 1. 3 Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (3)

| Yazar(lar) ve Referans No. | Katkı malzemesi Adı                                                                 | Katkı Maddesi Miktarı                                                 | İlave Yöntemi                             | Olumlu Sonuç                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mohammad, (2006) [3]       | sönmüş kireç                                                                        | %1,5 (KAA)                                                            | Islak agregaya üzerine kuru kireç yöntemi | Sönmüş kireç ilave yöntemi performansta değişiklik meydana getirmemiştir. Her iki yöntemle de iyi bir uzun dönem performansı elde edilmiştir.                                                                                                                                               |
|                            | sönmüş kireç                                                                        | %1,5 (KAA)                                                            | kuru agregaya üzerine kuru kireç yöntemi  |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Kennedy ve Ping, 1991 [3]  | sönmüş kireç, BA 2000 ve perma-tac                                                  | SK, %1,5 (KAA)<br>diğerleri %1 ve %1 (BA)                             | kireç harcı (slurry) yöntemi              | Soyulma önleyici katkı malzemeleri ile birlikte çalışma özelliği olumlu olmakla beraber, sönmüş kireç, uzun dönem gerilme mukavemetini geliştirir. Yorulma çatlaklarına karşı direnci artırır. Termal çatlak oluşumunu azaltır ve böylece kaplamaların uzun dönem performanslarını artırır. |
|                            | sönmüş Kireç, aquashield, DOW, Pavebond LP                                          | SK, %1 (KAA)<br>diğerleri %0.5, %0.41 ve %0.5 (BA)                    |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                            | sönmüş kireç, BA 2000 ve perma-tac                                                  | SK, %2 (KAA)<br>diğerleri %1 ve %1 (BA)                               |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                            | Sönmüş kireç, pavebond LP, perma-tac, unichem                                       | SK, %1 (KAA)<br>diğerleri %1(BA)                                      |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                            | sönmüş kireç, aquashield II, fina-A perma-tac, unichem                              | SK, %1 (KAA)<br>diğerleri %1(BA)                                      |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                            | sönmüş kireç, ARR-MAZ, DOW, fina-A, indulin AS-1, pavebond, special, perma-tac plus | SK, %1,5 (KAA)<br>diğerleri %0.75, %0.45 ve %1, %1, %1, %1 ve %1 (BA) |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                            | sönmüş kireç, ARR-MAZ aquashield, BA 2000 perma-tac                                 | SK, %1 (KAA)<br>diğerleri %1, %0.8, %0.5 ve %1 (BA)                   |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                            | sönmüş kireç, APR-MAZ, aquashield II, DOW, fina-B, pavebond LP, perma-tac           | SK, %1 (KAA)<br>diğerleri %1, %0.41, %0.5, %0.41, %1 ve %1 (BA)       |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

\*TAA: Toplam agregaya ağırlığı cinsinden, \*TKA: Toplam karışım ağırlığı cinsinden, \*KAA: Kuru agregaya ağırlığı cinsinden, \*BA: Bağlayıcı ağırlığı cinsinden

Çizelge 1. 4 Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (4)

| Yazar(lar) ve Referans No.         | Katkı malzemesi Adı     | Katkı Maddesi Miktarı | İlave Yöntemi                      | Olumlu Sonuç                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pickering vd. 1992 [3]             | sönmüş kireç            | %1 ve %2 (KAA)        | ıslak agregaya üzerine kuru kireç  | Sönmüş kirecin nem hasarını azaltıcı etkisi diğer katkı malzemelerinden daha fazladır. Sönmüş kireç, termal ve yorulma çatlak oluşumuna karşı direnç göstermekte, kullanılan diğer sıvı soyulma önleyicilerden daha iyi performans sağlamaktadır. Ayrıca mekanik özellikleri iyileştirerek, bozulma direncini yükseltir. |
|                                    | soyulma önleyici sıvı 1 | %0,5, %1 ve %2 (BA)   | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                    | soyulma önleyici sıvı 2 | %0,5, %1 ve %2 (BA)   |                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Sebaaly vd., 2006 [3]              | sönmüş kireç            | %1 (KAA)              | ıslak agregaya üzerine kuru kireç  | Donma-çözülme döngülerine karşı direnç sağlar. Sönmüş kireç daha kararlı ve bozulmaya daha az duyarlı karışım elde edilmesini sağlar. Mikro çatlakların büyüme potansiyellerini azaltır.                                                                                                                                 |
|                                    | soyulma önleyici sıvı   | %0,5 (BA)             | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Churchill ve Amirkhanian, 1999 [5] | sönmüş kireç            | %1 (TAA)              | kuru agregaya üzerine kuru kireç   | İnce agregaya yerine kısmi olarak konulan kömür külünün, kısa vadeli çekme dayanımı üzerinde makul bir olumsuz etkisi olmuştur. Ancak, belli sayıda kömür külü/kireç karışımlarının, Güney Carolina Ulaştırma Bakanlığı tarafından belirlenen minimum çekme dayanımı gerekliliklerini sağlamıştır.                       |
|                                    | kömür külü              | %6 ve %8 (TAA)        | kısmi agregaya olarak              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Diab vd., 2012 [97]                | sönmüş kireç            | %3 (KAA)              | Islak agregaya üzerine kuru kireç  | SK, karışımın mekanik ve yorulma özelliklerini geliştirir. Bu özelliklerin gelişiminde en iyi sonucu kireç harcı ile ekleme yöntemi vermiştir.                                                                                                                                                                           |
|                                    |                         |                       | kuru agregaya üzerine kuru kireç   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                    |                         |                       | kireç harcı (slurry) yöntemi       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                    |                         |                       | kuru agregaya üzerine kuru kireç   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Huang vd., 2011 [103]              | sönmüş kireç            | %10 (BA)              | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma | SK ilavesi oksidatif yaşlanma sürecini yavaşlatır ve azaltır. Ayrıca uzun dönem performansını iyileştirir.                                                                                                                                                                                                               |
|                                    | polifosforik asit       | %1,5 (BA)             |                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

\*TAA: Toplam agregaya ağırlığı cinsinden, \*TKA: Toplam karışım ağırlığı cinsinden, \*KAA: Kuru agregaya ağırlığı cinsinden, \*BA: Bağlayıcı ağırlığı cinsinden

Çizelge 1. 5 Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (5)

| Yazar(lar) ve Referans No. | Katkı malzemesi Adı   | Katkı Maddesi Miktarı            | İlave Yöntemi                      | Olumlu Sonuç                                                                                                                                                   |
|----------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cheng vd. , 2011 [104]     | sönmüş kireç          | %1 (TKA)                         | ıslak agregaya üzerine kuru kireç  | SK'nın karışımdaki nem hassasiyetini azaltıcı etkisi, ıslak agregaya kireç yönteminde, diğer yöntemlere göre daha olumlu etki yaratmıştır.                     |
|                            |                       |                                  | kuru agregaya üzerine kuru kireç   |                                                                                                                                                                |
|                            |                       |                                  | kireç harcı (slurry) yöntemi       |                                                                                                                                                                |
| Kim vd., 2008 [33]         | sönmüş kireç          | %1 (KAA)                         | ıslak agregaya üzerine kuru kireç  | Agrega ve bitüm arasındaki bağı güçlendirerek, soyulmaya karşı direnç sağlar. Islak agregaya kuru kireç yöntemi, kireç harcı yönteminden daha etkili olmuştur. |
|                            |                       |                                  | kireç harcı (slurry) yöntemi       |                                                                                                                                                                |
| Nejad vd., 2013 [105]      | sönmüş kireç          | %0,5, %1, %1,5, %2 ve %2,5 (KAA) | kireç harcı (slurry) yöntemi       | Agrega ve bitüm arasındaki bağı güçlendirerek, nem hasarını azaltır.                                                                                           |
| Lee vd., 2011 [106]        | sönmüş kireç          | %1 (TAA)                         | kuru agregaya üzerine kuru kireç   | SK, yorulma ve tekerlek izi performansını artırır.                                                                                                             |
| Punith vd. 2012 [107]      | sönmüş kireç          | %1 ve %2 (KAA)                   | kuru agregaya üzerine kuru kireç   | SK içeriği yükseldikçe, çekme dayanımı artar. Sasobit, diğer katkılara göre daha iyi nem hasarına karşı direnç sağlıyor.                                       |
|                            | asphamin,             | %0,3 (TKA)                       | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma |                                                                                                                                                                |
|                            | sasobit               | %1,5 (BA)                        |                                    |                                                                                                                                                                |
|                            | evotherm              | %0,5 (BA)                        |                                    |                                                                                                                                                                |
| Hajj vd., 2013 [108]       | sönmüş kireç          | %1 (KAA)                         | Islak agregaya üzerine kuru kireç  | SK, diğer katkı malzemesinden daha iyi nem hassasiyetini azaltıcı etki yapmaktadır.                                                                            |
|                            | soyulma önleyici sıvı | %0,5 (BA)                        | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma |                                                                                                                                                                |
| Aragoa vd., 2010 [64]      | sönmüş kireç          | %0,5, %1, %1,5, %2 ve %3 (TAA)   | filler olarak                      | SK, karışımın sertliğini artırır. Kalıcı deformasyonlara karşı direnç sağlar.                                                                                  |

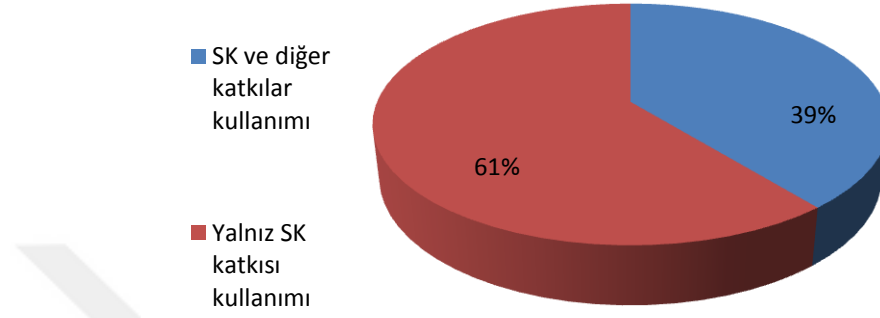
\*TAA: Toplam agregaya ağırlığı cinsinden, \*TKA: Toplam karışım ağırlığı cinsinden, \*KAA: Kuru agregaya ağırlığı cinsinden, \*BA: Bağlayıcı ağırlığı cinsinden

Çizelge 1. 6 Literatürde kullanılan katkı, miktarı, yöntemi ve sonuçları (6)

| Yazar(lar) ve Referans No.     | Katkı malzemesi Adı             | Katkı Maddesi Miktarı                                                    | İlave Yöntemi                          | Olumlu Sonuç                                                                                                                                     |
|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Özen, 2010 [109]               | sönmüş kireç                    | 2% (TAA)                                                                 | filler olarak                          | Polimer ve SK'nın bir arada bulunması, tekerlek izi oluşumunu önlemede en etkili karışımın elde edilmesini sağlamıştır.                          |
|                                | SBS polimer                     | 5% (BA)                                                                  | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma     |                                                                                                                                                  |
| Jaskula ve Judycki, 2005 [21]  | sönmüş kireç                    | %1,5 (TKA)                                                               | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma     | SK, su hasarına karşı daha iyi direnç sağlar.                                                                                                    |
|                                | soyulma önleyici sıvı (teramin) | %0,4 (BA)                                                                | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma     |                                                                                                                                                  |
| Shidhore, 2005 [110]           | sönmüş kireç                    | %1 (TKA)                                                                 | Islak agrega üzerine kuru kireç        | SK, nem hassasiyetini azaltır. Tekerlek izi oluşumuna ve yorulmaya karşı direnç sağlar.                                                          |
| Wisneski vd., 1996 [78]        | sönmüş kireç                    | %1, %2 ve %5 (TAA)                                                       | filler olarak                          | Yaşlanma sertleşmesini azaltır.                                                                                                                  |
| Sebaaly vd., 2007 [16]         | sönmüş kireç                    | %1 (KAA)                                                                 | Islak agrega üzerine kuru kireç        | Soyulmaya karşı oldukça dirençlidir. Tekerlek izi oluşumunu azaltır.                                                                             |
|                                | soyulma önleyici sıvı           | %0,5 (KAA)                                                               | drum yöntemi ile                       |                                                                                                                                                  |
| Little ve Petersen, 2005 [111] | sönmüş kireç                    | %20 (BA)                                                                 | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma     | Sönmüş kireç ve bitüm arasında reaksiyon oluşur ve yüksek sıcaklıklarda asfalt karışımını daha rijit ve sağlam (dayanıklı) yapar.                |
| Xiao vd., 2010 [112]           | sönmüş kireç                    | %1 (KAA)                                                                 | kuru agrega üzerine kuru kireç yöntemi | SK, soyulmayı önlemede diğer sıvı katkılardan daha etkilidir.                                                                                    |
|                                | soyulma önleyici sıvı           | %0,5 (BA)                                                                | doğrudan doğruya bağlayıcıya katma     |                                                                                                                                                  |
| Şengül vd., 2011 [113]         | sönmüş kireç                    | %2, %4 ve %6 (toplam filler miktarına göre)                              | filler olarak                          | SK, nem hasarına karşı direnç gösterir ve karışımdaki miktarı arttıkça, kalıcı deformasyonlara karşı direnci artırır.                            |
| Yardım ve Balcı, 2011 [114]    | sönmüş kireç                    | %0,5, %1, %1,5, %2, %2,5, %3, %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 ve %6,8 | filler olarak                          | SK, karışımın stabilitesini artırır, deformasyonları azaltır ve dolayısıyla yük altında karışımın deformasyonlara karşı direnci daha da artırır. |

\*TAA: Toplam agrega ağırlığı cinsinden, \*TKA: Toplam karışım ağırlığı cinsinden, \*KAA: Kuru agrega ağırlığı cinsinden, \*BA: Bağlayıcı ağırlığı cinsinden

Literatür taraması kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlarla, sönmüş kirecin diğer polimer katkıları ile birlikte çalışma özelliğinin olumlu olduğu birçok kez belirtilmiştir. Ancak, bu çalışma kapsamında incelenen yayınlarda, katkı malzemesi olarak yalnızca sönmüş kireç kullanımı daha fazla (%61) tercih edildiği söylenebilir (Şekil 1.13).



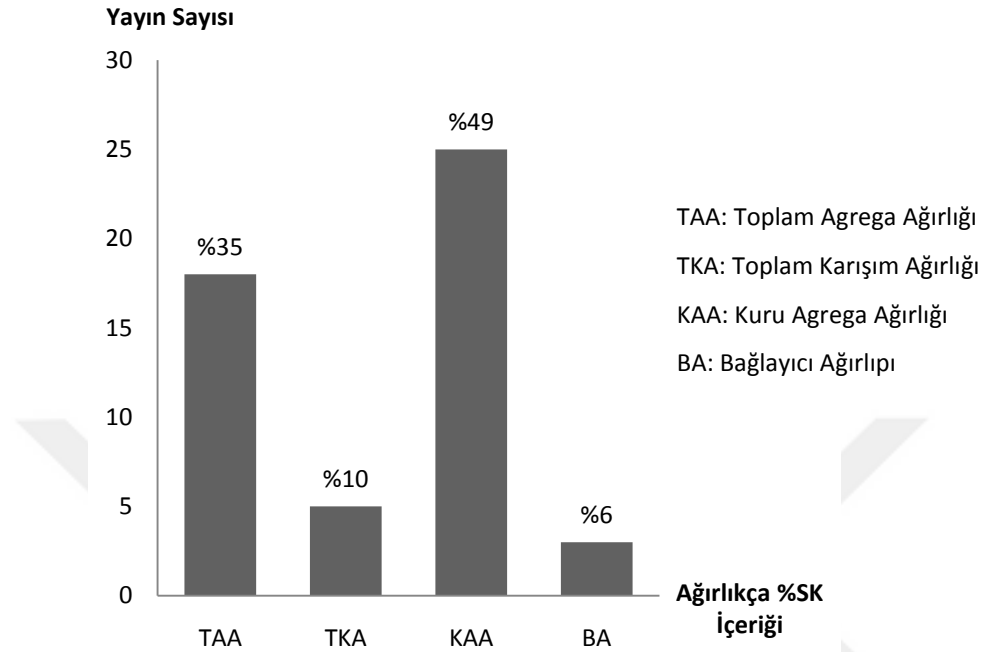
Şekil 1. 13 Literatürde SK'nın diğer katkı malzemeleri ile kullanım oranları

Sönmüş kireç kullanım miktarı ise, karışım özelliklerini belirleyen parametrelerin (pratik özgül ağırlık, hava boşluğu oranı, akma, stabilite, agregalar arası boşluk oranı ve asfaltla dolu boşluk oranı) değişiminde oldukça önemlidir.

Sebaaly vd., "Nevada DOT şartnamesinde, sönmüş kireç uygulama oranı kuru agreganın ağırlığının yüzde 1'inden az, yüzde 2,5'inden çok olamaz" denilmekte olduğunu ve kireç oranının artması ile birlikte, karışım yoğunluklarının düştüğünü ve sıkışma yüzdesinin azaldığını söylemektedir. Marshall karışım tasarımı ile birlikte, laboratuvarında, bitümlü karışımlar % 3–4 arasında bir düzeyde optimum oranda boşluk olarak tasarlanmasına karşın, uygulamada bu boşluk düzeyleri %5–7 arasında gerçekleştiğini belirten Sebaaly vd., bu farklılık, uygulamada, kısa süre içerisinde kendisini tekerlek izi ve su hasarı olarak ortaya koyduğunu belirtmiştir. Kireç oranının, Nevada şartnamesinde verilen oranı aşması durumunda, yoğunluk ve sıkışma yüzdesinin düşmesiyle birlikte, daha da olumsuz bir durum yaratabileceği, bu bağlamda bu üst sınır koşulunun konulduğu tahmin edilmektedir.

Çizelge 1.1- Çizelge 1.6'daki çalışmaların incelenmesiyle, sönmüş kirecin bitümlü karışımlara ilave edilme miktarında, ağırlıkça farklı oranların tercih edildiği gözlemlenmiştir. Sönmüş kireç, karışımdaki toplam agreganın ağırlığı, toplam karışım

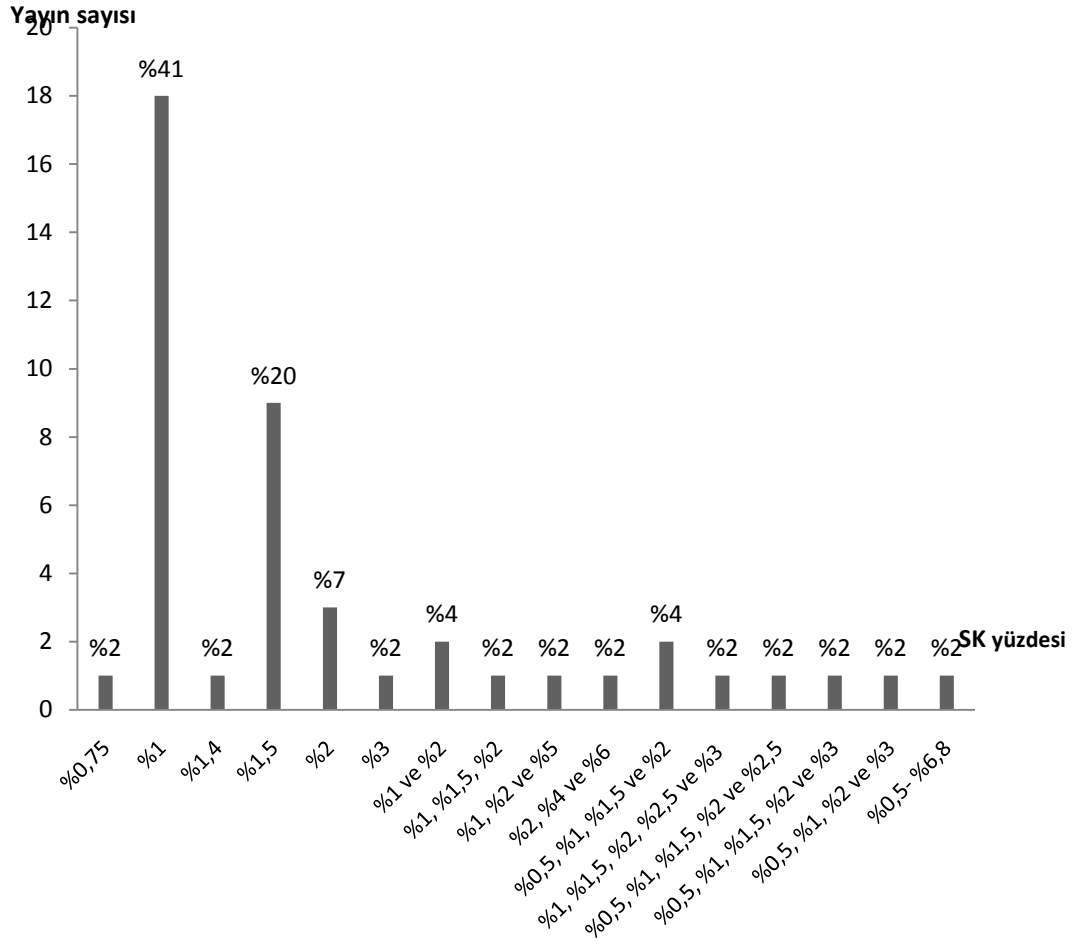
ağırlığı, kuru agreg ağırlığı ve bitüm ağırlığı olmak üzere 4 farklı ağırlık cinsinden ilave edilmiştir. Şekil 1.14 incelendiğinde, bitümlü karışımlara sönmüş kireç ilave edilirken en çok (%49), karışımdaki agreg ağırlığı yüzdesi cinsinden kullanıldığı görülmektedir.



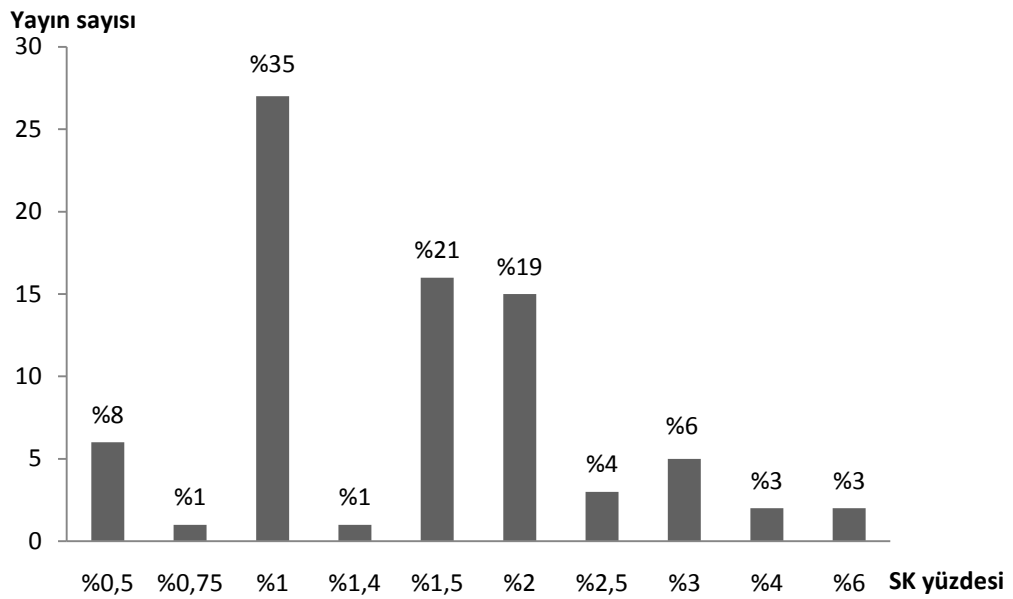
Şekil 1. 14 Literatürde karşılaşılan ağırlıkça %SK içeriği cinsi

Literatürde karşılaşılan çalışmalarda, sönmüş kireç farklı miktarlarda kullanılarak, çok sayıda araştırma yapılmıştır. Tez kapsamında incelenen 44 tane yayından, yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda (%41), sönmüş kirecin, toplam agreg ağırlığının %1'i olarak karışıma ilave edildiği gözlemlenmiştir (Şekil 1.15). Ayrıca literatürde en çok kullanılan SK oranlarından 2. ve 3. sıraları da %1,5 ve %2 SK kullanımı almıştır. Birden fazla oranın kullanıldığı çalışmalar, mükerrer olarak tekli oranlara tekrar dağıtıldığında da benzer bir ağırlığın ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 1.16).

Çok geniş ve hassasiyeti yüksek bir aralıkta sönmüş kireç kullanımı ile ilgili çalışmaların sayısı ise oldukça azdır. Bu nedenle, tez çalışmamız kapsamında sönmüş kirecin, bitümlü karışımlara etkilerinin daha geniş ve yüksek hassasiyetli olarak araştırılabilmesi amacıyla, karışımdaki filler oranından azaltılarak, %0, %0,5, %1, %1,5, %2, %2,5, %3, %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 ve %6,8 oranlarında SK kullanımı tercih edilmiştir.



Şekil 1. 15 Literatürde karşılaşılan SK kullanım miktarları



Şekil 1. 16 Literatürde karşılaşılan SK kullanım miktarları (mükerrerler dâhil)

Literatür araştırması kapsamında, sıcak asfalt karışım deneylerinin değerlendirilmesi hususunda bulanık mantık yöntemlerinin de kullanıldığı belirlenmiştir. Bu çalışmada da kullanılan bulanık mantık yöntemine dair literatüre bu kısımda kısaca değinilecektir.

Bulanık mantık, klasik mantık sistemlerinden ziyade insan düşüncesi ve tabii dil ruhuna daha yakındır. Temel olarak, gerçek dünyanın eksik ve yaklaşık özelliğini yakalayan etkili bir araç sağlar [117].

Bulanık mantık, ikili mantık (0 ve 1) sistemine karşı, günlük hayatta kullandığımız değişkenlere üyelik derecesi atayarak, onların hangi oranda gerçekleştiğini belirleyen çoklu mantığa sahiptir.

Günlük konuşma dilini kullanan bulanık mantık, dilsel değişkenler (linguistic variables) yardımıyla biraz sıcak, ılık, uzun, çok uzun, soğuk gibi günlük hayatımızda kullandığımız kelimeler yardımıyla insan mantığına en yakın doğrulukta denetimi sağlayabilir. Bulanık mantık, denetleyici kullanılarak elektrikli ev aletlerinden otomobil elektroniğine, gündelik kullandığımız iş makinelerinden üretim mühendisliğine, endüstriyel denetim teknolojilerinden otomasyona kadar aklımıza gelebilecek her yerde kendisine uygulama alanı bulabilir [117]. Birçok alanda olduğu gibi karayolu üstyapısı ile ilgili deneysel çalışmalarda da sıklıkla kullanılmaktadır.

Özgan vd. [118], yaptıkları bir çalışmada, farklı sıcaklık ve bekleme sürelerine maruz bırakılan asfalt betonu numunelerine Marshall deneyi uygulamıştır. Deneysel olarak elde ettikleri Marshall stabilitesi değerlerinin, numunelerin fiziksel özellikleri, bitüm miktarları, sıcaklık ve bu sıcaklıklara maruz kalma sürelerine göre tahmin edilebilmesi amacıyla bulanık mantık yöntemiyle tahmin modeli geliştirmiş ve tahmin edilen değerler ile deney sonuçları arasındaki ilişkiyi göstermiştir. Benzer bir çalışma da Morova vd. [119] tarafından yapılmış ve asfalt betonu karışımlarında kullanılacak optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılmak üzere bir model geliştirilmiştir.

Serin vd. [120], çalışmalarında, geliştirilmiş kil kullanılarak üretilen çeşitli karışım özelliklerine sahip hafif asfalt betonun Marshall stabilitesinin bulanık mantık yöntemiyle tahmin edilebilirliğini araştırmışlardır. Elde ettikleri model ile kısa sürede, kolaylıkla, düşük hata oranlarında ve deneysel çalışma gerektirmeden geliştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen asfalt numunelerinin Marshall Stabilitesi değerlerini Bulanık Mantık metoduyla elde etmişlerdir.

## 1.2 Tezin Amacı

Sıcak asfalt karışımlarında SK katkısı kullanımının, belirli şartlar altında çok ve çeşitli yararları olduğu bildirilmektedir [9]. Kullanılan agregata türü, kökeni ve gradasyonu; seçilen bağlayıcı tipi, özellikleri ve miktarı; ilave edilen diğer katkı maddesi türü, miktarı, özelliği ve kullanılma biçimi; iklim ve sıcaklık değişimleri, proje hizmet ömrü ve üstyapı yükleme durumları, SK kullanımında etkili olan faktörler olarak görülmektedir. Bu bağlamda SK, bir bakıma çok fonksiyonlu bir katkı malzemesi olarak nitelendirilmektedir [3, 9, 96].

Bitümlü sıcak karışımlarda olumlu sonuç gözlemek için gerekli koşulların en önemlilerinden biri olan, “katkı maddesi tipi ve miktarının seçimi”, bu çalışmanın çıkış noktasıdır.

Literatürde yer alan, bitümlü sıcak kaplamalarda sönmüş kireç kullanımı ile ilgili çalışmalarda, genellikle kullanılan sönmüş kireç miktarlarının %1 ve %3 arasında olduğu ve sönmüş kireç miktarının çok düşük-çok yüksek olduğu durumlar ile miktarının hassasiyeti ile ilgili pek fazla çalışma olmadığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada öncelikli amaç, bitümlü sıcak karışımlarda, sönmüş kireç hassasiyetinin incelenmesi ve miktarlar arası geçişlerin nasıl olduğunun bütüncül olarak ortaya konmasıdır.

Bu çalışma kapsamında, ilk olarak, sönmüş kireç miktarı ağırlıkça %0, %0,5, %1, %1,5, %2, %2,5, %3, %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 ve 6,8 olan 15 adet Marshall dizaynı [115, 116] tasarlanmıştır. Her bir dizayndan 18 adet olmak üzere, toplam  $15 \times 18 = 270$  adet deney numunesi üretilmiş ve her bir dizayn için optimum asfalt içeriği değeri elde edilmiştir. Yapılan numune üretimleri ve deneyler sonucunda, farklı miktarlarda sönmüş kireç katkısı kullanımının, her bir dizayn için belirlenen optimum asfalt muhtevastaki pratik özgül ağırlık, agregalar arası boşluk, boşluk oranı, akma, stabilite ve asfaltla dolu boşluk değerlerine etkilerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın diğer kısmında ise, yapılan numune üretimleri sonucunda elde edilen optimum bitüm muhtevalarına ait; pratik özgül ağırlık, agregalar arası boşluk, boşluk oranı, akma, stabilite ve asfaltla dolu boşluk değerlerinin doğruluğunu kontrol etmek için, bulunan optimum asfalt içerikleri kullanılarak, her dizayn için 3'er adet olmak üzere,  $15 \times 3 = 45$  adet numune üretimi yapılmıştır. Marshall dizaynına göre üretilmiş 270

adet numuneden elde edilen dizayn sonuçları ve bu numunelere ait optimum bitüm içeriklerine göre üretilen 45 adet numuneden elde edilen hesap sonuçları karşılaştırılarak, uyumlulukları araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen deney sonuçlarını değerlendirmek amacıyla Bulanık Mantık Yöntemi'nden yararlanılmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen bulanık mantık modelinde eğitim verileri olarak, 270 adet deney numunesine Marshall Deneyi uygulanarak elde edilen, her bir bitüm muhtevasına (%4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 ve %6,8) ait karışım parametreleri ( $D_p$ ,  $F$ ,  $V_h$ , VFA, VMA, MS) kullanılmıştır. Modelin test verileri olarak ise, her karışım dizaynı için bulunan optimum bitüm muhtevaları ve yine her bir karışım dizaynı için belirlenen %SK (%0- %6,8) oranları kullanılmıştır. Bulanık mantık modelinin verdiği sonuçlar ile gerçek deney sonuçları karşılaştırılarak, modelin doğruluğu ispatlanmıştır. Ayrıca test verileri olarak kullanılan her bir optimum bitüm içeriği ve sönmüş kireç içeriği değerinde üretilen numunelerin de (45 adet), hesap yöntemiyle elde edilen karışım parametreleri ( $D_p$ ,  $F$ ,  $V_h$ , VFA, VMA, MS) değerleri modelin verdiği sonuçlar ile karşılaştırılarak, Marshall dizayn sonuçları ve Marshall hesap sonuçları arasındaki uyumluluk incelenmiştir.

Geliştirilen Bulanık Mantık Modeli'nde girdi değişkenleri olarak, bitüm oranı ve sönmüş kireç oranı (%AC-%SK), çıktı değişkenleri olarak ise, karışım parametreleri ( $D_p$ , VMA, MS,  $V_h$ ,  $F$  ve VFA) kullanılmıştır.

Elde edilen bu model sonuçları öncelikle gerçek deney sonuçları olan 270 adet numuneye ait parametrelerle karşılaştırılmış ve iyi çalıştığı gözlemlendikten sonra da, dizayn sonuçları ile hesap sonuçları arasındaki ilişkiyi modellemek üzere kullanılmıştır. Böylece, yapılan deney sonuçlarının iyi derecede tahmin edilebilmesine imkân sağlayan pratik ve hızlı bir yöntem elde edilmiştir.

### **1.3 Hipotez**

Bitümlü sıcak karışımlara modifiye edici katkı malzemesi ilave edilmesinin amacı, bitümlü bağlayıcı ve karışımların davranışlarının iyileştirilmesini sağlamaktır. Bu amaçla yapılan uygulamalar, son yıllarda oldukça artış göstermiştir. Sönmüş kireç ilavesi ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımların, sönmüş kireç ilavesiz karışımlara göre daha

olumlu özellikler gösterdiği, birçok çalışmada tespit edilmiştir. Ancak, bitümlü sıcak karışımda kullanılacak sönmüş kireç miktarının da oldukça önemli olduğu bilinmektedir. Yapılan bu çalışmayla, öncelikle sönmüş kireç ile ilgili geniş kapsamlı bir literatür çalışmasının bütüncül biçimde ortaya konularak değerlendirilme imkanı elde edilecektir. İlave olarak, her karışım için, karışıma eklenen kireç oranı kadar filler malzeme karışımdan eksiltiyle, çok küçük oransal artışlarla ilave edilen sönmüş kireç katkısının karışımda meydana getirdiği değişikliklerin Marshall test yöntemi çerçevesinde araştırılarak, değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

Ayrıca, dizayn sonuçlarından yararlanılarak bulunan optimum bitüm değerini veren pratik özgül ağırlık, akma, stabilite, boşluk oranı, agregalar arası boşluk ve asfaltla dolu boşluk değerleri (dizayn sonuçları) ile optimum bitüm miktarına göre üretilmiş, 3'er adet numunenin pratik özgül ağırlık, akma, stabilite, boşluk oranı, agregalar arası boşluk ve asfaltla dolu boşluk değerleri, ilgili hesap formülleri kullanılarak elde edilmiş (hesap sonuçları) ve karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma çerçevesinde elde edilen dizayn sonuçları ile hesap sonuçları arasında yeterli derecede bir yakınlık beklenmiştir. Beklenen bu yakınlığı başka bir yöntemle de incelemek ve desteklemek üzere bir bulanık mantık modeli geliştirilmiştir. Modelin bazı karışım parametrelerinde (pratik özgül ağırlık, akma, stabilite, boşluk oranı, agregalar arası boşluk ve asfaltla dolu boşluk değerleri) gerçeğe yakın sonuçlar vermesi beklenmektedir.

## BÖLÜM 2

### MALZEME VE YÖNTEM

Araştırma kapsamında, malzeme temininin ardından, büro ve laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar ile ilgili detaylı bilgiler bu bölümde sunulmuştur.

Büro çalışmalarına, araştırma konusu ile ilgili detaylı bir literatür taraması yapılarak başlanmıştır. Literatürdeki çalışmaların incelenmesinin ardından, gerekli malzemeler temin edilmiştir. Bu malzemeler kullanılarak üretilen karışımlar üzerinde yapılan deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen veriler büro ortamında değerlendirilmiştir. Yapılan tüm değerlendirmeler göz önünde bulundurularak, bitümlü sıcak karışımlarda, farklı oranlarda sönmüş kireç kullanımının etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

#### 2.1 Malzeme

Bu çalışma kapsamında, katkı ilaveli sıcak asfalt karışımı elde etmek amacıyla, agrega, bitüm ve sönmüş kireç kullanılmıştır. Kullanılan agrega malzemeleri; İSFALT Fabrika depo alanı sınıflandırmasına göre 1 no'lu agrega, 2 no'lu agrega ve taş tozu olmak üzere, üç çeşittir. Bu malzemelerin kaynağı İstanbul'daki Ömerli bölgesi kalker ocaklarıdır. Türkiye'nin kuzey batısında bulunan bu bölgedeki kalkerlerin, ana element oksidini %52,9 CaO oluşturmakta; minerolojik bileşiminde ise %75 civarında kalsit bulunmaktadır. Üretimin yapıldığı kalker tipi genel olarak gri-koyu gri renklidir [121]. İSFALT A.Ş. Ümraniye Üretim Fabrikası'ndan temin edilen bu agrega tiplerinden, toplamda yaklaşık olarak 300 kg kadar alınmıştır. Ayrıca, filler malzemesinden de yaklaşık 50 kg temin edilmiştir. Aynı şantiyede bulunan sıcak (135-140 °C' deki) bitüm

silolarından da 50-70 penetrasyon değeriinde 20 litre bitüm temin edilmiştir. Karışımlarda kullanılan sönmüş kireç ise, Öztüre Holding Bartın Çimento Fabrikası'nda, S-KK 80-T koduyla üretilen söndürölmüş toz kalsiyum kirecidir.

Sönmüş kireç, hava ile uzun süre temas ettiğinde, atmosferdeki CO<sub>2</sub> ile kimyasal reaksiyona girmekte, bu nedenle kimyasal yapısı bozulmaktadır. Hava ile temas halindeki kirecin, karışımda kullanımı, çeşitli olumsuzluklara neden olabilmektedir. Bu durumu engellemek amacıyla, 0,50 kg'lık kapalı paketler halinde toplam 25 kg sönmüş kireç tarafımıza ulaştırılmıştır. Çalışmalarda kullanılan bu sönmüş kireç paketleri, oda sıcaklığında hava almayacak bir biçimde saklanarak, gerektiğinde ilgili paketlerden ihtiyaç kadar açılıp, kullanılabilmesine olanak sağlamıştır.

## **2.2 Malzemelerin Özelliklerinin Belirlenmesi**

Laboratuvar çalışmalarının bir kısmı İSFALT A.Ş. Merkez Laboratuvarı'nda, bir kısmı da Yıldız Teknik Üniversitesi Ulaştırma Anabilim Dalı Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yapılan malzeme deneyleri ve karışım deneyleri aşağıda sunulmuştur.

Bu çalışmada kullanılan agregalara, elek analizi, özgül ağırlık ve su emme (absorbsiyon) deneyleri daha önce uygulandığından dolayı, bu deneyler tekrar edilmemiş ve daha önce elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

### **2.2.1 Elek analizi Deneyi**

Elek analizi, bir agrega karışımının, kare gözlü standart deney eleklerinden elenmesi yolu ile en büyük tane çapı yönünden çeşitli büyüklüklerdeki agrega bölümlerinin, bütün agrega karışımına ağırlıkça oranı yüzdelerinin bulunmasıdır [124].

Bu deneyde, TS EN 933-2' de [125] nitelikleri verilmiş olan elekler kullanılmaktadır. Deneyde, ASTM C 136 [122] ve ASTM C117'de [123] verilen yöntemler kullanılmıştır.

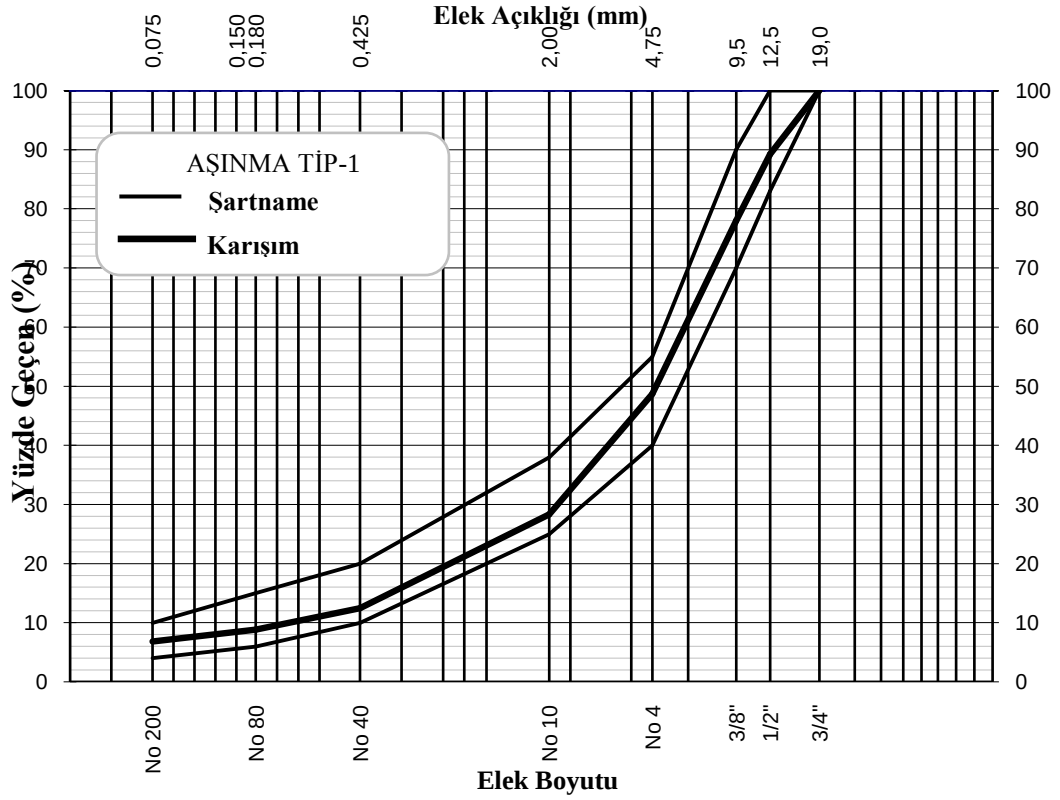
Bitümlü sıcak karışım kaplamalar, ağırlıkça %93-96 oranında agregadan oluşmaktadır. Kaplamanın stabilitesine ve yoğunluğuna etki eden önemli özelliklerden biri de agrega gradasyonudur. Dolayısıyla, değişik boyutlardaki agrega danelerinin hangi oranlarda bulunması gerektiği şartnamelerde alt ve üst limitlerle belirtilmiştir. Her katman için ayrı ayrı gradasyon geliştirilmiştir.

Ülkemizde, karışım agrega gradasyonu Aşınma TİP-1 tabakası için, 3/4", 1/2", 3/8", No:4, No:10, No:40, No:80, No:200 standart elekleri kullanılır [126]. Elekler büyükten küçüğe doğru sıralanır ve malzeme en üst elekten başlanarak elenir. Elek üstü kalan malzemeler yığışlımlı olarak 0,1 gr hassasiyetinde bir terazi ile tartılır. Daha sonra “yüzde geçenler”, toplam yüzde kalanlar ve belli boyutlardaki yüzdeler toplam ağırlığın %0,1’i hassasiyetinde hesaplanır ve ilgili grafik oluşturulur. Birçok ülkenin standardına giren bu eğriler, uygulama kolaylığı açısından tek bir eğri yerine, eğrilerle sınırlandırılmış bölgeler olarak verilir. Böylelikle agrega gradasyonunun şartnameye uygunluğu gösterilir.

Elek analizi için fabrikadan getirilen 2 Nolu, 1 Nolu ve taş tozu agregalar, bölgeçlerle belirli miktarlarda ayrıldıktan sonra, standartlara [122] göre yıkanmış, kurutulmuş ve 3/4", 1/2", 3/8", No. 4, No. 10, No. 40, No. 80 ve No. 200 eleklerin bulunduğu sarsma cihazında elemeye tabi tutulmuştur. Eleklerden geçen malzemelerin tartımları yapılmış ve KGM şartnamesi [126] Aşınma-Tip-1 karışım yüzdelerine (bu çalışmada; 2 Nolu agrega %15, 1 Nolu agrega %40 ve taş tozu %45) göre dağılımları belirlenmiştir (Çizelge 2.1) [126]. Sonuçta, karışımdaki kaba agrega, ince agrega ve filler malzemesi oranları sırayla, %51,3, %41,9 ve %6,8 olarak bulunmuştur. Agregaların mevcut şartname değerlerinin sınırları içerisinde kaldığını gösteren gradasyon eğrisi aşağıda verilmiştir (Şekil 2.1).

Çizelge 2. 1 Aşınma tabakası agrega granülometrisine ait şartname sınırları ve Elek Analizi sonuçları

| Elek No | Elek Boyu |          | 2 Nolu<br>Agrega | 1 Nolu<br>Agrega | Taş<br>Tozu | Karışım | Karışım<br>Formülü | Tip 1         | Tip 2  |
|---------|-----------|----------|------------------|------------------|-------------|---------|--------------------|---------------|--------|
|         | İnch      | mm       |                  |                  |             |         |                    |               |        |
| 1       | ¾ "       | 19 mm    | 15,0             | 40,0             | 45,0        | 100,0   | 100 - 100          | <b>100</b>    |        |
| 2       | ½ "       | 12.5 mm  | 4,3              | 40,0             | 45,0        | 89,3    | 85 - 93            | <b>83-100</b> | 100    |
| 3       | 3/8"      | 9.5 mm   | 0,5              | 32,5             | 45,0        | 78,0    | 74 - 82            | <b>70-90</b>  | 80-100 |
| 4       | No. 4     | 4.75 mm  | 0,1              | 4,4              | 44,2        | 48,7    | 45 - 53            | <b>40-55</b>  | 55-72  |
| 5       | No. 10    | 2.00 mm  | 0,1              | 0,8              | 27,4        | 28,4    | 25 - 31            | <b>25-38</b>  | 36-53  |
| 6       | No. 40    | 0.425 mm | 0,1              | 0,8              | 11,6        | 12,4    | 10 - 15            | <b>10-20</b>  | 16-28  |
| 7       | No. 80    | 0.180 mm | 0,1              | 0,8              | 8,0         | 8,8     | 6 - 12             | <b>6-15</b>   | 8-16   |
| 8       | No. 200   | 0.075 mm | 0,1              | 0,7              | 6,0         | 6,8     | 5 - 9              | <b>4-10</b>   | 4-10   |



Şekil 2. 1 Agregada gradasyon eğrisi

### 2.2.2 Özgöl Ağırlık Deneyi

Özgöl ağırlık, belirli bir hacimdeki numune ağırlığının, aynı hacimdeki +4 °C deki suyun ağırlığına oranı olarak bilinmektedir. Özgöl ağırlık deneyleri, ince agregada, kaba agregada ve filler için ayrı ayrı yapılmaktadır. Burada, sönmüş kireç ilaveli fillerin özgöl ağırlığı, piknometre deneyi kullanılarak, her bir kireç içeriği için ayrı ayrı belirlenmiştir [127, 128].

Bitümlü sıcak karışımlarda, 3 tip agregada özgöl ağırlığı kullanılır [2]:

- **Hacim Özgöl Ağırlık ( $G_{sb}$ ):** Agregada danelerinin kapiler boşluklar dâhil bütün hacmini kapsar. Yani belirli bir sıcaklıkta, agreganın geçirgen olan ve olmayan boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır.
- **Zahiri (Görünür) Özgöl Ağırlık ( $G_{sa}$ ):** 24 saat suda bırakılan ve böylece kapiler boşlukları suyla dolan numunenin, yalnızca geçirimsiz kısmını kapsar. Yani belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin havadaki

ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır.

- Etkin (Efektif) Özgöl Ağırlık ( $G_{ef}$ ): Kaplamada olduğu gibi, taşın fiilen asfaltla doldurulmamış kapiler hacmi ile geçirimsiz kısmının hacmini kapsar. Yani, belirli bir sıcaklıkta agreganın asfalt geçirimli boşlukları hariç geçirimli ve geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır.

#### 2.2.2.1 İri Agregada için Özgöl Ağırlık Tayini

ASTM C 127 yöntemi kullanılarak, kaba agreganın su absorpsiyonu ve özgöl ağırlığı belirlenmiştir [127]. Öncelikle, kullanılan agregada örneğinden yaklaşık 1 kg alınır. Hazırlanan numune yıkanır ve su içinde 24 saat bekletilir. Su içerisinden çıkarılan numune, emici özelliğe sahip olan bir bez üzerine yayılır ve agregada daneleri kurulanır. Yüzey kuru-suya doygun hale gelmiş agregada numunesi tartılır ( $B$ ). Daha sonra, tel sepete konulan agregada numunesinin  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki suda tartımı yapılır ( $C$ ). Son olarak, numune tel sepet içinden bir tepsiye boşaltılarak  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  'lık etüvde 24 saat kadar kurutulur. Etüvden çıkartılan numune 1 ila 3 saat arasında oda sıcaklığında soğutulduktan sonra tartılır ( $A$ ). Özgöl ağırlık değerleri ve su absorpsiyon yüzdesi aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanır:

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C} \quad (2.1)$$

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C} \quad (2.2)$$

$$G_{fa} = \frac{B - A}{A} \quad (2.3)$$

Burada,

$A$ : Kuru ağırlık (gr)

$B$ : Doygun yüzey kuru ağırlık (gr)

$C$ : Sudaki ağırlık (gr)

$G_{sb}$ : Hacim özgül ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)

$G_{sa}$ : Zahiri (görünür) özgül ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)

$G_{fa}$ : Absorbsiyon (%)

Çalışmada iri agregalara yapılan özgül ağırlık deneylerinin sonuçları Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2. 2 İri agreganın özgül ağırlığı ve absorpsiyonu

|                     |                                                        |        |
|---------------------|--------------------------------------------------------|--------|
| <i>A</i>            | Kurutulmuş malzeme ağırlığı (gr)                       | 1176,9 |
| <i>B</i>            | Doygun yüzey kuru malzeme ağırlığı (gr)                | 1181,9 |
| <i>C</i>            | Doygun yüzey malzemenin sudaki ağırlığı (gr)           | 745,7  |
| $A / (B - C)$       | Hacim özgül ağırlığı (kuru) ( $G_{sb}$ )               | 2,698  |
| $B / (B - C)$       | Hacim özgül ağırlığı (doygun yüzey, kuru) ( $G_{sb}$ ) | 2,710  |
| $A / (A - C)$       | Zahiri özgül ağırlık ( $G_{sa}$ )                      | 2,729  |
| $(B - A) / A * 100$ | Absorbsiyon (%) ( $G_{fa}$ )                           | 0,42   |

#### 2.2.2.2 İnce Agreganın İçin Özgül Ağırlık Tayini

İnce agreganın su absorpsiyonu ve özgül ağırlığı ASTM C 128 metodu kullanılarak belirlenir [129]. En az 1 kg agrega kullanılır. Kullanılan agreganın gradasyonu, karışımın gradasyonunu temsil edecek nitelikte olmalıdır.

No.200 elekten yıkanan malzeme, bir tepsi içine alınarak üzeri su ile kaplanır ve 24 saat bekletilir. Daha sonra, suyu, ince malzeme kaybına neden olmayacak şekilde süzülür ve malzeme, absorbtif olmayan düzgün bir yüzey üzerine serilir.

Numuneyi yüzey kuru-suya doymuş hale getirebilmek için, sıcak hava akımı karşısında devamlı karıştırarak kurutma işlemi yapılır. Bu işleme malzeme serbest dökülebilir hale gelinceye kadar devam edilir. Bu anı tespit etmek için koni yöntemi uygulanır.

Yüzey kuru-suya doymuş hale gelen yaklaşık 500 gr numune, piknometre içine konularak tartılır. Üzerine, numune yüzeyini tamamen kaplayacak seviyede su ilave edilir. Hava kabarcıklarının çıkması için piknometre her iki yönde 15-20 dakika boyunca çalkalanır. Daha sonra piknometrenin boş kısmı işaret çizgisine kadar su ile doldurulur.  $25 \pm 1$  °C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilen su ve malzeme, sıcaklıkları 25 °C’ye ulaştığında, piknometre su banyosundan çıkarılıp, kurulanır ve tartılır. İnce agreganın piknometreden bir tepsiye boşaltılır ve  $110 \pm 5$  °C’lik etüvde ağırlığı sabit hale gelene

kadar kurutulur. Etüvden çıkarılan numune soğutularak tartılır. İnce agreganın özgül ağırlık ve su absorpsiyon yüzdesi aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanır:

$$G_{sb} = \left( \frac{A}{(B + D - C)} \right) \quad (2.4)$$

$$G_{sa} = \left( \frac{A}{(A + D - C)} \right) \quad (2.5)$$

$$G_{fa} = \left( \frac{B - A}{A} \right) \times 100 \quad (2.6)$$

Çalışmada ince agregalara yapılan özgül ağırlık deneylerinin sonuçları Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2. 3 İnce agreganın özgül ağırlığı ve absorpsiyonu

|                          |                                                                |          |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------|----------|
| <i>A</i>                 | Kurutulmuş malzeme ağırlığı (gr)                               | 495,950  |
| <i>B</i>                 | Doygun yüzey kuru malzeme ağırlığı (gr)                        | 500,000  |
| <i>C</i>                 | Volumetrik kap + su + ince agreg ağırlığı (gr)                 | 1005,245 |
| <i>D</i>                 | Volumetrik kabın su dolu ağırlığı (gr)                         | 689,395  |
| <i>E</i>                 | Volumetrik kabın boş ağırlığı (gr)                             | 191,450  |
| $A / (B + D - C)$        | Hacim özgül ağırlığı (kuru) (gr/cm <sup>3</sup> )              | 2,693    |
| $B / (B + D - C)$        | Hacim özgül ağırlığı (doygun yüzey, kuru)(gr/cm <sup>3</sup> ) | 2,715    |
| $A / (A + D - C)$        | Zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )                     | 2,754    |
| $(B - A) / A \times 100$ | Absorpsiyon (%)                                                | 0,82     |

### 2.2.2.3 Filler + Sönmüş Kireç Özgül Ağırlık Tayini

Filler malzemelerinin zahiri özgül ağırlıkları ASTM D 854 yöntemi kullanılarak belirlenir [130]. Öncelikle, etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulan filler malzemesi, şişenin üçte biri dolacak şekilde piknometrenin içerisine konulur ve tartılır. Daha sonra, piknometrenin yarısı damıtılmış su ile doldurulur ve beklemeye bırakılır. Sonrasında, piknometre 15-30 dakika, yaklaşık 50 mbar vakum sağlayan desikatör içerisinde bırakılarak havası alınır. Daha sonra, vakumla ilişkisi kesilir ve malzemenin kendi halinde iyice çökmesi beklenir. Üst kısımda tamamen berrak su oluşunca, piknometre taşıncaya kadar damıtık suyla doldurulur. Kapağı hava kabarcığı kalmayacak şekilde kapatılır ve 25 ± 1 °C'lik su banyosunda en az

60 dk bekletilir. Piknometre, havlu ya da süzgeç kâğıdı ile iyice kurutularak 0,1 gram hassasiyetli terazide tartılır. Deney iki adet numune üzerinde tekrarlanır ve iki deneyin sonuçlarının ortalama değeri alınır. Aşağıda verilen hesaplamalar kullanılarak, fillere belirli oranlarda sönmüş kireç ilavesi ile elde edilen özgül ağırlık değerleri Çizelge 2.4 'de sunulmuştur.

$$G_{sa} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} \quad (2.7)$$

A: Piknometrenin boş ağırlığı

B: Piknometrenin su ile dolu ağırlığı

C: Piknometrenin kuru numune ile dolu ağırlığı

D: İçerisinde numune bulunan piknometrenin, numune üzerinde kalan kısmının suyla doldurulması ile elde edilen ağırlığı

$G_{sa}$ : Zahiri (görünür) özgül ağırlık ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

Çizelge 2. 4 Sönmüş kireç+ filler özgül ağırlık değerleri

| Dizayn No | Karışımdaki Oran |                  | (Filler+SK)<br>Zahiri Öz.<br>Ağ. ( $G_{sa}$ )<br>( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) |
|-----------|------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|           | Filler (%)       | Sönmüş Kireç (%) |                                                                              |
| 1         | 6,8              | 0                | 2,806                                                                        |
| 2         | 6,3              | 0,5              | 2,766                                                                        |
| 3         | 5,8              | 1                | 2,76                                                                         |
| 4         | 5,3              | 1,5              | 2,702                                                                        |
| 5         | 4,8              | 2                | 2,519                                                                        |
| 6         | 4,3              | 2,5              | 2,588                                                                        |
| 7         | 3,8              | 3                | 2,609                                                                        |
| 8         | 3,3              | 3,5              | 2,586                                                                        |
| 9         | 2,8              | 4                | 2,571                                                                        |
| 10        | 2,3              | 4,5              | 2,505                                                                        |
| 11        | 1,8              | 5                | 2,448                                                                        |
| 12        | 1,3              | 5,5              | 2,544                                                                        |
| 13        | 0,8              | 6                | 2,501                                                                        |
| 14        | 0,3              | 6,5              | 2,488                                                                        |
| 15        | 0,0              | 6,8              | 2,419                                                                        |

### 2.2.3 Bitümlü Bağlayıcının Fiziksel Özellikleri

Ülkemizde genel olarak yol esnek üstyapılarında kullanılan bitümlü bağlayıcı asfalt çimentosudur. Bitümlü bağlayıcılar yardımıyla, agrega daneleri ve agrega ile yol yüzeyi arasındaki yapışma (bağlantı) sağlanır [1, 2]. Bulundukları ortamlara, taşıma şartlarına ve ticari şekillerine göre, sıvı, yarı katı veya katı halde bulunabilirler. Yarı katı ve katı haldekiler, ısıtarak sıvı hale getirildikten sonra kullanılabilirler. Sıvı halden de tekrar önceki haline geçerken yapışkanlıkları sayesinde kohezyon ve adezyon gibi iki önemli özelliği gösterirler. Kohezyon, çatlama ve ayrılma olmaksızın şekil değiştirme özelliğidir. Adezyon, yapışma özelliğidir [131].

Çalışma kapsamında, asfalt çimentosu olarak, Tüpraş Rafinerisi'nden temin edilen AC 50-70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır.

Bitümün karakteristik özelliklerini belirlemek üzere yapılan, penetrasyon, yumuşama noktası, ince film halinde ısıtma kaybı, kalıcı penetrasyon, düktilite, parlama noktası, ince film halinde ısıtma deneyi sonrası düktilite ve özgül ağırlık deneyleri daha önce uygulandığı için tekrar edilmemiştir. Deneylerin sonucunda bulunan özellikler ve kriterler doğrudan aşağıda gösterilmiştir (Çizelge 2.5).

Çizelge 2. 5 Kullanılan bitüm özellikleri

| Özellikler                                          | Standartlar       | Test Sonuçları | Şartname [126] |
|-----------------------------------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> ), 25 °C'de       | ASTM D 70 [132]   | 1,009          |                |
| Parlama noktası (Cleveland) (°C)                    | ASTM D 92 [133]   | 345            | > 230          |
| Penetrasyon (0,1 mm), 25 °C'de,                     | ASTM D 5 [134]    | 59,8           | 50-70          |
| Düktilite (cm), 25 °C'de, 5 cm/dak                  | ASTM D 113 [135]  | > 100          | > 100          |
| İnce film halinde ısıtma kaybı (%), 163 °C'de, 5 sa | ASTM D 1754 [136] | 11             | < 80           |
| Isıtma kaybı sonrası penetrasyon yüzdesi (%)        | ASTM D 5 [134]    | 65,9           | > 54           |
| Isıtma kaybı sonrası düktilite (cm)                 | ASTM D 113 [135]  | 65,4           | > 50           |
| Yumuşama noktası (°C)                               | ASTM D 36 [137]   | 48,5           | 45-55          |

#### 2.2.4 Sönmüş Kirecin Fiziksel Özellikleri

Bu çalışmada, gradasyonu belirlenen agrega karışımından belirli oranlarda (%0, %0,5, %1, %1,5, %2, %2,5, %3, %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 ve %6,8 oranlarında) filler malzemesi eksiltiilerek, yerine aynı oranlarda SK ilave edilmiştir.

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



Kireç taşı ve/veya dolomitik kayaçların kalsinasyonu ile üretilen ve esas olarak kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksitten (MgO) oluşan hava kireçlerine, sönmemiş kireç denir [138]. Sönmemiş kireçler su ile etkileşince, ısı yayan (ekzotermik) bir reaksiyon verirler. Bu reaksiyon sonucu elde edilen ve esas olarak kalsiyum oksit veya kalsiyum hidroksitten [Ca(OH)<sub>2</sub> ve Mg(OH)<sub>2</sub>] oluşan kireçlere, sönmüş kireç (SK) denir.



Kirecin, pek çok kimyasal sürecin 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 yaygın biçimde kullanılmasında önemli rol oynamaktadır [139].

Sönmüş kireç, bitümlü sıcak karışımlarda pek çok açıdan iyileşme sağlaması sebebiyle, modifiye katkısı olarak kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır [138].

Sıcak asfalt karışımlarında sönmüş kireç katkısı kullanımının, belirli şartlar dâhilinde çok ve çeşitli yararları olduğu bildirilmektedir. Bu bağlamda SK bir bakıma çok işlevli bir katkı malzemesi olarak nitelendirilmektedir [9, 96].

Deneylerde kullanılan katkı malzemesi, Öztüre Holding A.Ş. Bartın Kireç Fabrikası'nda, S-KK 80-T koduyla üretilen ticari söndürülmüş toz kalsiyum kireçtir. Aşağıda özellikleri verilen (Çizelge 2.6) bu malzeme, piyasada yoğunluğu en düşük sönmüş kireçlerden biri olarak üretilmektedir.

Çizelge 2. 6 Kullanılan sönmüş kireç özellikleri

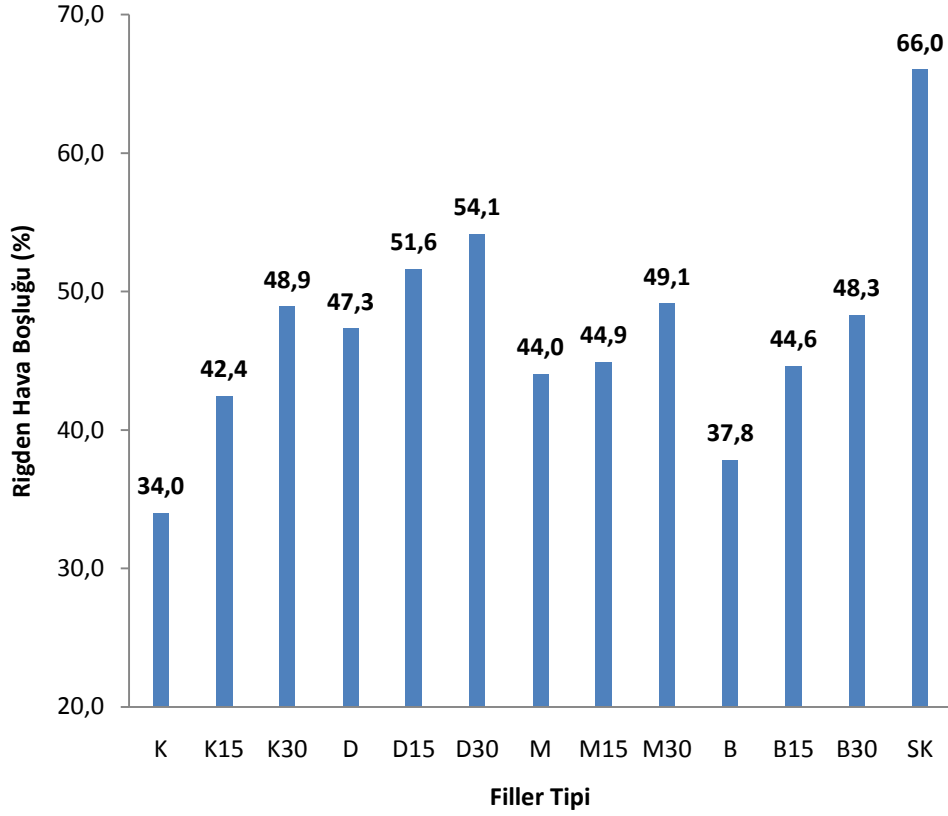
| Özellikler                    | Standartlar          | Test Sonuçları | Standart Sınır Değer [12] |
|-------------------------------|----------------------|----------------|---------------------------|
| Kimyasal Özellikler           |                      |                |                           |
| Toplam CaO (%)                | TS EN 459-1 [138]    | 85,78          | > 80                      |
|                               | TS 32 EN 459-2 [140] |                |                           |
| MgO (%)                       | TS EN 459-1          | 3,52           | < 5                       |
|                               | TS 32 EN 459-2       |                |                           |
| Toplam CaO+MgO (%)            | TS EN 459-1          | 89,3           | >80                       |
| Kızdırma Kaybı (%)            | TS 32 EN 459-2       | 22,51          |                           |
| SO <sub>3</sub> (%)           | TS EN 459-1          | 1,47           | < 2,0                     |
|                               | TS 32 EN 459-2       |                |                           |
| CO <sub>2</sub> (%)           | TS EN 459-1          | 3,89           | < 7,0                     |
|                               | TS 32 EN 459-2       |                |                           |
| Fiziksel Özellikler           |                      |                |                           |
| İncelik-                      | TS EN 459-1          | 6              | < 9,0                     |
| 90 mikron üzeri (%)           | TS 32 EN 459-2       |                |                           |
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) | TS 32 EN 459-2       | 472            | < 600                     |

#### 2.2.4.1 Sönmüş Kireç ve Mineral Filler

Kuru sıkıştırılmış fillerin boşluk oranı, numunenin ölçülen yoğunluğunun, filler malzemesinin bilinen yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilmektedir. Bu yöntem ismini mucidi P.J. Rigden’den almaktadır ve “ Rigden Hava Boşluğu” olarak adlandırılmaktadır [141].

Sönmüş kireç, mineral fillerlerden daha yüksek kuru poroziteye sahiptir. Mineral fillerlerde boşluk oranı %30-34 civarındayken, sönmüş kireçte bu oran %60-70 arasında değişmektedir. Karışım fillerlerinde Rigden hava boşluğu oranı sönmüş kireç içeriğine göre değişmektedir.

Şekil 2.2’ten anlaşılabileceği gibi karışımın sönmüş kireç içeriği arttıkça, Rigden boşluk oranı değeri artmaktadır. Ağırlıkça %25 sönmüş kireç içeren karışım fillerleri için, boşluk oranı %45-50 arasında değişmektedir [142,143]. Uçucu kül de Rigden hava boşluğu değerinde artışa sebep olmaktadır [143]. Bu durum, sönmüş kirecin bitümlü sıcak karışımlarda beklenen bazı fonksiyonları yerine getirmesine engel teşkil edebilmektedir.



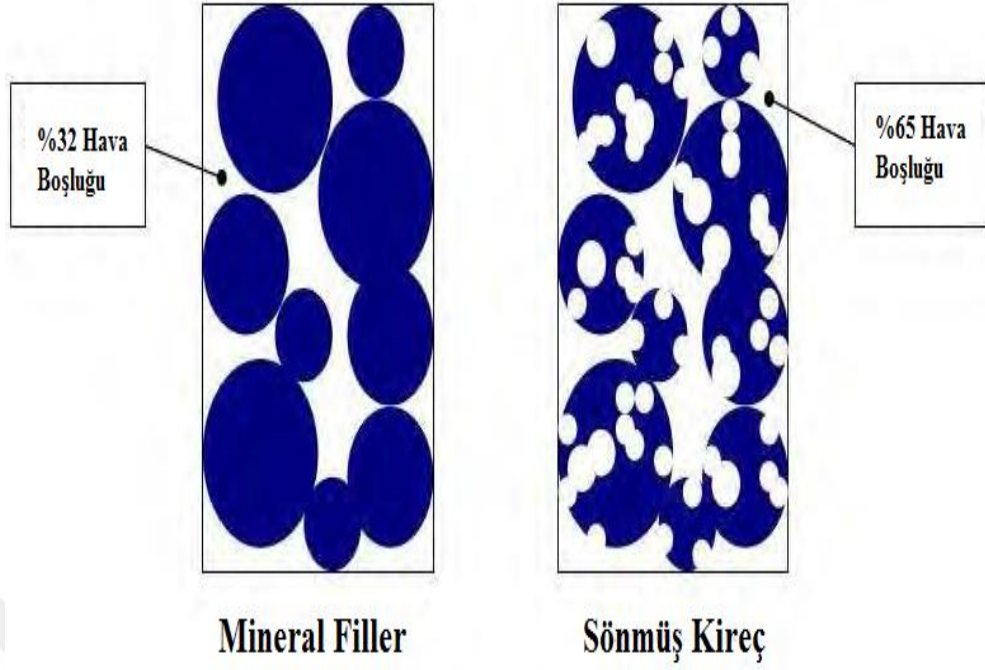
Şekil 2. 2 Bazı filler tipi ve karışımları için rigden hava boşlukları

Şekil 2.2’de yer alan ifadelerden, K:kireçtaşı, D:dolomit, M:melafir, B:bazalt, X15:X+%15 sönmüş kireç ve X30:X+%30 sönmüş kireç’tir [142].

Mineral fillerlerin boşluk oranı, genellikle %28-40 arasındadır [142, 144, 145]. Kireçtaşı fillerinde olduğu gibi, birçok filler tipinde de genelde %30-34 arasında boşluk bulunmaktadır (Şekil 2.3). Sönmüş kireçte ise, boşluk oranı daha yüksektir ve yaygın olarak %65 olmakla birlikte, %60-70 arasında değişmektedir [142].

Mineral fillerlerde porozite, parçacıklar arasındaki boşluklardan oluşmaktadır. Ancak, sönmüş kireçte porozite, hem parçacıkların kendi içerisindeki boşlukların hem de parçacıklar arasındaki boşlukların toplamı şeklinde bulunduğundan, daha yüksek boşluk oranına sahip olduğu görülebilmektedir.

Sönmüş kirecin kuru porozitesi mineral fillerden daha fazladır. Çünkü mineral filler parçacıklarının kendi içerisindeki boşlukları ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle, mineral fillerlerde toplam boşluk oranı, yalnızca parçacıklar arasındaki boşluk oranı olarak düşünülebilir.



Şekil 2. 3 Sönmüş kireç ile mineral fillerin boşluk oranı karşılaştırması [5]

Sönmüş kireç ilavesi, bitümlü kaplamalardaki çatlama problemini azaltır. Çatlama, kaplama yaşlandıkça, mikro çatlaklar olarak sık sık şekillenmeye başlar ve zamanla kaplamaya hasar verecek makro-çatlaklara dönüşür. Mikro çatlaklar, sönmüş kirecin küçük parçacıklarının hareketlerine engel olurlar. Kireç, çatlamayı, aktif olmayan fillerden daha fazla azaltır. Bunun sebebi, asfalttaki polar molekülleri ve kireç arasındaki reaksiyondur. Bu reaksiyon, mikro çatlak kusurlarını daha kolay önleyecek olan daha geniş parçacıklar oluşturur. Sonuç olarak, sönmüş kireç, mikro çatlakların önünü keser ve bir araya gelerek daha büyük çatlaklar oluşturmalarını engeller [3].

Bu çalışma kapsamında, ilk olarak, sönmüş kireç miktarı ağırlıkça %0, %0,5, %1, %1,5, %2, %2,5, %3, %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 ve 6,8 olan 15 adet Marshall dizaynı [115, 116] tasarlanmıştır. Her bir dizayndan 18 adet olmak üzere, toplam 15x18=270 adet deney numunesi üretilmiş ve her bir dizayn için optimum asfalt içeriği değeri elde edilmiştir. Yapılan numune üretimleri ve deneyler sonucunda, farklı miktarlarda sönmüş kireç katkısı kullanımının, her bir dizayn için belirlenen optimum asfalt muhtevastaki pratik özgül ağırlık, agregalar arası boşluk, boşluk oranı, akma, stabilite ve asfaltla dolu boşluk değerlerine etkilerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın diğer kısmında ise, yapılan numune üretimleri sonucunda elde edilen optimum bitüm muhtevalarına ait; pratik özgül ağırlık, agregalar arası boşluk, boşluk oranı, akma, stabilite ve asfaltla dolu boşluk değerlerinin doğruluğunu kontrol etmek için, bulunan optimum asfalt içerikleri kullanılarak, her dizayn için 3'er adet olmak üzere,  $15 \times 3 = 45$  adet numune üretimi yapılmıştır. Marshall dizaynına göre üretilmiş 270 adet numuneden elde edilen dizayn sonuçları ve bu numunelere ait optimum bitüm içeriklerine göre üretilen 45 adet numuneden elde edilen hesap sonuçları karşılaştırılarak, uyumlulukları araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen deney sonuçlarını değerlendirmek amacıyla Bulanık Mantık Yöntemi'nden yararlanılmıştır.

Bulanık mantık modeli, öncelikle, 15 adet Marshall dizaynı sonucunda elde edilen karışım parametreleri ile eğitilmiştir. Marshall dizaynları sonucunda elde edilen bir başka parametre olan, her karışıma ait optimum bitüm içeriği değerleri de her dizayn için bulunmuştur. Bulunan bu optimum bitüm değerleri ve %SK oranları da modelin test edilmesi için kullanılmıştır. Elde edilen uyumluluk neticesinde, son olarak dizayn sonuçları ve hesap sonuçları da karşılaştırılarak, yapılan deney sonuçları modellenmiştir.

### **2.3 Bitümlü Sıcak Karışım Marshall Deneyi**

Sıcak asfalt karışımları, esnek üstyapıların stabilite ve performansından sorumludur. Karışımlar, asfalt çimentosu ile agregaların homojen olarak karışması ve agregaların üzerlerinin de iyice asfalt çimentosu ile kaplanması ile elde edilmektedir. İyi bir akıcılığa ve işlenebilirliğe sahip asfalt karışımı elde edilebilmesi için agregaların ve kullanılacak asfaltın ısıtılması gerekmektedir. Uygun sıcaklıklara kadar ısıtılarak, kurutulmuş ve bağlayıcı ile yine uygun bir sıcaklık ve sürede karıştırılmış gradasyonlu agregaya "Bitümlü Sıcak Karışım" denmektedir.

Esnek yol kaplamalarının gerek stabilite, gerekse performans yönünden üstün nitelikli, daha uzun ömürlü olmaları ve daha düşük bakım-onarım maliyeti gerektirmeleri arzu edilmektedir. Esnek kaplamaların kendilerinden beklenen işlevleri yerine getirebilmesi için, kalıcı deformasyonlar, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve su etkisi ile asfalt soyulması ve düşük durabilite gibi başlıca kusurların en aza

indirgenmesi gerekir [146]. Modifikasyon işlemi, bu kusurları azaltmak için önemli bir araçtır. Marshall deneyinin [115, 116] aşamaları aşağıdaki kısımlarda verilmiştir.

### 2.3.1 Agregaların Kullanıma Hazırlanması

Çalışma kapsamında, Marshall numunelerinde kullanmak üzere fabrikadan temin edilen agregalar, yıkanma suyunun görüntüsü tamamen berrak olana kadar yıkanmıştır. Yıkama işleminin ardından, agregalar, kurumaları için, 110<sup>0</sup>C'deki etüvde bir gece bekletilmiştir. Sonrasında etüvden çıkarılan numuneler, 3/4 inç, 1/2 inç, 3/8 inç, No.4, No.10, No.40, No.80 ve No.200 eleklerin bulunduğu sarsma cihazında elenmiştir. Elenen her bir malzeme gerekli miktarlarda alınarak yapılacak tartıma hazır hale getirilmiştir.

### 2.3.2 Marshall Numunelerinin Hazırlanması

Bu aşamada, karışımların optimum bitüm içeriklerini belirlemek üzere, Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Çizelge 2.7'de verilen tartım değerleri, sönmüş kireç ilavesi olmayan geleneksel Marshall Dizaynı için kullanılan tartım değerleridir. Bu değerler, her bir Marshall dizaynında filler yüzdesi belirli oranda (%0,5) azaltılıp, yerine sönmüş kireç ilave edilerek oluşturulan tartım tablolarından okunmuş ve her bir dizayndan 18'er adet (ağırlıkça %4, %4,5, %5, %5,5 %6 ve %6,5) olmak üzere, toplam 270 adet numune oluşturulmuştur. Buna göre, sönmüş kireç oranları %0, %0,5, %1, %1,5 %2, %2,5, %3, %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 ve %6,8 olmak üzere 15 Marshall Dizaynı elde edilmiştir.

Çizelge 2. 7 Agrega karışımı için tartım değerleri (geleneksel karışım)

| Elek No. | Karışım (%)<br>geçen) | Beher Elek<br>(% kalan) | 1150,0 gr<br>Briket İçin | Kümülatif<br>Tartım (gr) |
|----------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 3/4"     | 100,0                 | 10,7                    | 123,3                    | 123,3                    |
| 1/2"     | 89,3                  | 11,3                    | 129,8                    | 253,1                    |
| 3/8"     | 78,0                  | 29,3                    | 336,8                    | 589,9                    |
| No 4     | 48,7                  | 20,3                    | 234,0                    | 823,9                    |
| No 10    | 28,4                  | 15,9                    | 183,0                    | 1006,9                   |
| No 40    | 12,4                  | 3,6                     | 41,6                     | 1048,4                   |
| No 80    | 8,8                   | 2,0                     | 22,8                     | 1071,3                   |
| No 200   | 6,8                   | 6,8                     | 78,7                     | 1150,0                   |
|          |                       | 100,0                   | 1150                     |                          |

Marshall deneylerinin uygulanacağı numunelerin hazırlanmasında belirli bir iş programı izlenmiştir. Numunelerin hazırlanması aşamasında yapılan işlemler aşağıda belirtilmiştir:

#### *Agrega Tartımı*

Agrega tartım hesabında belirlenen (Çizelge 2.7) agreg a oranları dikkate alınarak, her bir Marshall numunesi için 1150 gr'lık kümülatif tartım yapılmıştır (Şekil 2.4). Kümülatif olarak tartım yapılması, olası hataları en aza indirmeyi ve telafi etmeyi sağlamaktadır. Bu tartımlarda dizayn numarasına göre sırasıyla Çizelge 2.8'de yer alan miktarlarda filler ve sönmüş kireç içeriği mevcuttur.



Şekil 2. 4 Tartımı yapılan numune örnekleri

Çizelge 2. 8 Marshall dizaynlarına ait filler ve sönmüş kireç miktarları

| Dizayn No | Filler Oranı | Sönmüş Kireç Oranı |
|-----------|--------------|--------------------|
| 1         | %6,8         | %0                 |
| 2         | %6,3         | %0,5               |
| 3         | %5,8         | %1                 |
| 4         | %5,3         | %1,5               |
| 5         | %4,8         | %2                 |
| 6         | %4,3         | %2,5               |
| 7         | %3,8         | %3                 |
| 8         | %3,3         | %3,5               |
| 9         | %2,8         | %4                 |
| 10        | %2,3         | %4,5               |
| 11        | %1,8         | %5                 |
| 12        | %1,3         | %5,5               |
| 13        | %0,8         | %6                 |
| 14        | %0,3         | %6,5               |
| 15        | %0           | %6,8               |

Tartılan ve ayrı kaplara konulan agregaların, kap içerisinde homojen dağılımını sağlamak amacı ile iyice karıştırılması gerekmektedir. Bu işlem sırasında malzeme kaybı olmamasına dikkat edilmelidir.

#### *Agregaların ısıtılması*

Tartımı yapılan agregalar, 1 gece boyunca  $160^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki etüvde bekletilmiştir.

#### *Agrega-bitüm karışımı elde edilmesi*

Karışıma başlamadan önce, gerekli malzemelerin düzenli bir şekilde hazırlanmasına dikkat edilmelidir. Şekil 2.5'teki gibi çalışma ortamı hazırlanmalı ve kullanılacak tüm malzemeler karışımın yapılacağı yere yakın olmalıdır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan biri de, karışımın mümkün olduğunca hızlı gerçekleştirilmesidir. Uygun karışım sıcaklığı düşmeden, agrega ve bitümün karışımı gerçekleştirilmelidir.



Şekil 2. 5 Agreg-a-bitüm karışımının hazırlanması

Tartımı yapılan ve bir gece boyunca  $160^{\circ}\text{C}$ 'deki etüvde bekletilen agregalara bitüm ilave etmeden önce, bitümün de  $140^{\circ}\text{C}$ 'deki bir başka etüvde uygun sıcaklığa gelmesi sağlanmıştır. Karışımı gerçekleştirmek için, öncelikle mikser kabına agregalar konulur ve orta kısımlarında spatula yardımı ile bir çukur açılır. Çukur açılan bu bölgeye ağırlıkça belirlenen oranlarda (%4, %4,5, %5, %5,5, %6 ve %6,5 oranlarında) bitüm ilave edilir (Şekil 2.6).



Şekil 2. 6 Agregalara bitüm ilave edilmesi

Karışım için uygun sıcaklıklardaki agrega ve bitüm, agregalar bitüm ile kaplanıncaya kadar (1 ya da 1,5 dakika boyunca) karıştırılır (Şekil 2.7). Her bitüm yüzdesi için 3'er adet numune hazırlanmaktadır.



Şekil 2. 7 Agrega ile bitümün karıştırılması

Karışımından sonra, numuneler, sıkıştırma sıcaklığından yaklaşık  $10^{\circ}\text{C}$  daha yüksek sıcaklığa ayarlanmış bir etüvde kür (yeterli kür, sıvı petrol asfaltı çözücüsünün %50 kadarının uçtuğu andır) tamamlanıncaya kadar bekletilir.

Kür tamamlandıktan sonra, numuneleri kalıplara dökme ve sıkıştırma işlemlerinin gerçekleştirilmesi gereklidir.

#### *Numunelerin kalıplara dökülmesi ve sıkıştırılması*

Bu aşamada TS EN 12697' da [147] yer alan işlemler uygulanmıştır. Bu işlemlerin gerçekleştirilmesinden önce malzemelerin içlerine konulacakları kalıplar (Şekil 2.8), iyice temizlenmelidir. Kalıpların içerisinde kurumuş malzeme olması, numunenin iyi sıkışmasını engelleyecektir. Numune sıcaklıklarında herhangi bir düşüşe sebep olmaması için, kalıplar ve numunenin kalıba dökülmesinde kullanılacak olan kürek de, yaklaşık  $110^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtılmalıdır.



Şekil 2. 8 Numune kalıpları

Deneyde kullanılan standart silindirik briketin yüksekliği 2,5 inch (63,5 mm), taban çapı 4 inch (101,6 mm) olup, farklı yükseklikteki numunelerin mukavemetleri standart yüksekliğe göre düzeltilerek değerlendirilmiştir [147].

Kür alması için  $160^{\circ}\text{C}$ 'de yaklaşık 2 saat bekletilen karışımlar, kalıplara dökülerek, Marshall tokmağı (Şekil 2.9) yardımı ile sıkıştırılmaktadır. Bu işlemi gerçekleştirmeden önce, kullanılacak Marshall tokmağının kafasında artık malzeme olmamasına dikkat etmek gerekmektedir. Ayrıca, numuneleri kalıba dökmeden önce, kalıbın en alt kısmına filtre etkisi yaratan kâğıt konulmalıdır. Kalıbın içine yerleştirilen bu kâğıt üzerine numune dökülmeli ve ardından, uzun bir spatula yardımı ile kalıptaki numunenin kenar kısımları yaklaşık 15 kez şişlenmelidir. Ardından, numunenin üst kısmına da bir filtre kâğıdı konulur ve tokmaktama işlemi gerçekleştirilir.

4,5 kg lık Marshall tokmağı 457 mm yükseklikten serbest olarak düşürülerek, otoyol kaplamaları için 75 ve normal yol kaplamaları için 50 darbe olmak üzere, numunenin

her iki yüzüne de uygulanır. Bu çalışmada, numunelerin her iki yüzüne de 50'şer darbelik sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. 9 Marshall tokmağı

Yeterli stabilitenin sağlanabilmesi için, sıkıştırılma işlemleri tamamlanan numuneler, sıkıştırmanın hemen ardından kalıptan çıkarılmaz. Bir gece laboratuvar sıcaklığında soğumaları için bekletilir (Şekil 2.10).



Şekil 2. 10 Hazırlanan Marshall briketleri

### 2.3.3 Hazırlanan Numunelere Marshall Deneyinin Uygulanması

Bu aşamada, hazırlanan Marshall deney numunelerinin özelliklerinin belirlenmesi ve Marshall numune kırma cihazında stabilite ve akma değerlerinin bulunması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Marshall tokmağı ile sıkıştırılan ve bir gece oda sıcaklığında soğuması için bekletilen numuneleri, Marshall stabilitesi ve akma deneylerine hazırlamak amacıyla aşağıda sıralanan işlemler yapılmaktadır:

#### 1. Numunelerin kalıplardan çıkarılması ve numaralandırılması

Deneyin bu kısmında, kalıpların içerisindeki numuneler, kalıp çıkarma krikosu yardımıyla kalıplarından çıkarılmıştır (Şekil 2.11).



Şekil 2. 11 Numunelerin kalıptan çıkarılması

Üretilen numuneler, üretim sıralarının ve özelliklerinin ayırt edilebilmesi için önceden belirlenen, kendilerine ait numaralara göre isimlendirilir. Bunun için, ilgili numaralar, kalıplarından çıkarılan numunelerin üzerine yağlı tebeşirle yazılmıştır.

### 2. Numunelerin çapaklarından arındırılması

Burada yapılan işlem, spatula ve tel fırça kullanılarak, numunelerin üzerindeki çapaklanmaların giderilmesidir. Aksi halde, yapılacak ölçümler, numune yüzeyindeki pürüzler sebebi ile hatalı sonuçlar verebilmektedir.

### 3. Numune yüksekliklerinin ölçülmesi

Marshall deney numunelerinin yüksekliklerinin bulunması için yapılan bu işlemde, dijital kumpas (hassas boyut ölçme aleti) kullanılmıştır. Her briketin, 3 farklı yerinden yükseklik ölçümü yapılmış ve bu 3 yükseklik değerinin aritmetik ortalaması Briket Kontrol Raporu'nda (Şekil 2.12) ilgili yere yazılmıştır.

| BRIKET KONTROL RAPORU |         |               |           |                  |                                 |                     |           |                           |      |                          |
|-----------------------|---------|---------------|-----------|------------------|---------------------------------|---------------------|-----------|---------------------------|------|--------------------------|
| Düzenleme Tarihi      |         |               |           |                  | Rapor No 0                      |                     |           |                           |      |                          |
| Düzenleyen Birim      |         |               |           |                  |                                 |                     |           |                           |      |                          |
| Alt Olduğu Yer        |         |               |           |                  |                                 |                     |           |                           |      |                          |
| Briketin Cinsi        |         |               |           |                  |                                 |                     |           |                           |      |                          |
| Briket No             | Bitüm % | Bitüm Miktarı | Yükseklik | Havadaki Ağırlık | Havadaki Ağırlık (gr) Doy.Yüzey | Sudaki Ağırlık (gr) | Hacmi (V) | Pratik Özgül Ağırlık (Dp) | Akma | Tahsis Edilmiş Stabilité |
| (Wa)                  | (gr)    | (mm)          | (A)       | (B)              | (C)                             | (B - C)             | (A / V)   | (mm)                      | (kN) |                          |
|                       |         |               |           |                  |                                 |                     |           |                           |      |                          |
|                       |         |               |           |                  |                                 |                     |           |                           |      |                          |
|                       |         |               |           |                  |                                 |                     |           |                           |      |                          |
| ORTALAMA              |         |               |           |                  |                                 |                     |           |                           |      |                          |

Şekil 2. 12 Briket kontrol raporu örneği

#### 4. Numune ağırlıklarının belirlenmesi

Şekil 2.13'te yer alan Briket Kontrol Formu'ndaki "Havadaki Ağırlık", "Havadaki Ağırlık Doygun Yüzey" ve "Sudaki Ağırlık" değerlerinin bulunması için öncelikle, her bir numune sırasıyla hassas terazi üzerine yerleştirilip, tartım değeri "Numune Havadaki Ağırlık" değeri olarak forma kaydedilir.

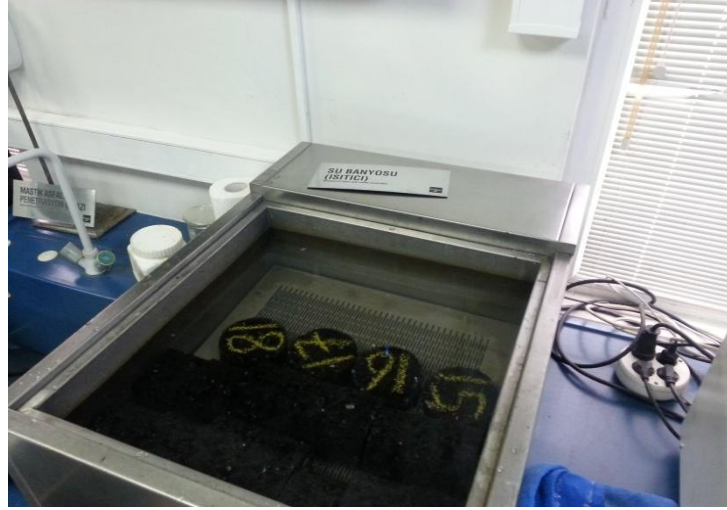
Daha sonra, tartımı yapılan numuneler, oda sıcaklığındaki durgun su içerisinde yaklaşık 30 dakika kadar beklemeye bırakılır. Bekleme sonrasında, numunelerin sudaki ağırlıklarını belirlemek üzere, suda tartım (Şekil 2.13) yapılarak kaydedilir. Sudaki ağırlıkları tartılan numuneler, doymun kuru yüzey ağırlıklarının belirlenmesi için, bir havlu yardımıyla iyice kurutulup, tekrar hassas terazi üzerinde tartılır ve tartım değeri kaydedilir. Bu işlemler tüm briketler için yapılmaktadır.



Şekil 2. 13 Sudaki ağırlık ölçümü

#### 5. Hazırlanan briketlerin kırılması

Tartım işlemleri gerçekleştirilen numuneler, Marshall cihazında kırılmadan önce, 60°C'ye ayarlanmış olan su banyosu (Şekil 2.14) içerisinde, 50 dakika bekletilmiştir [148].



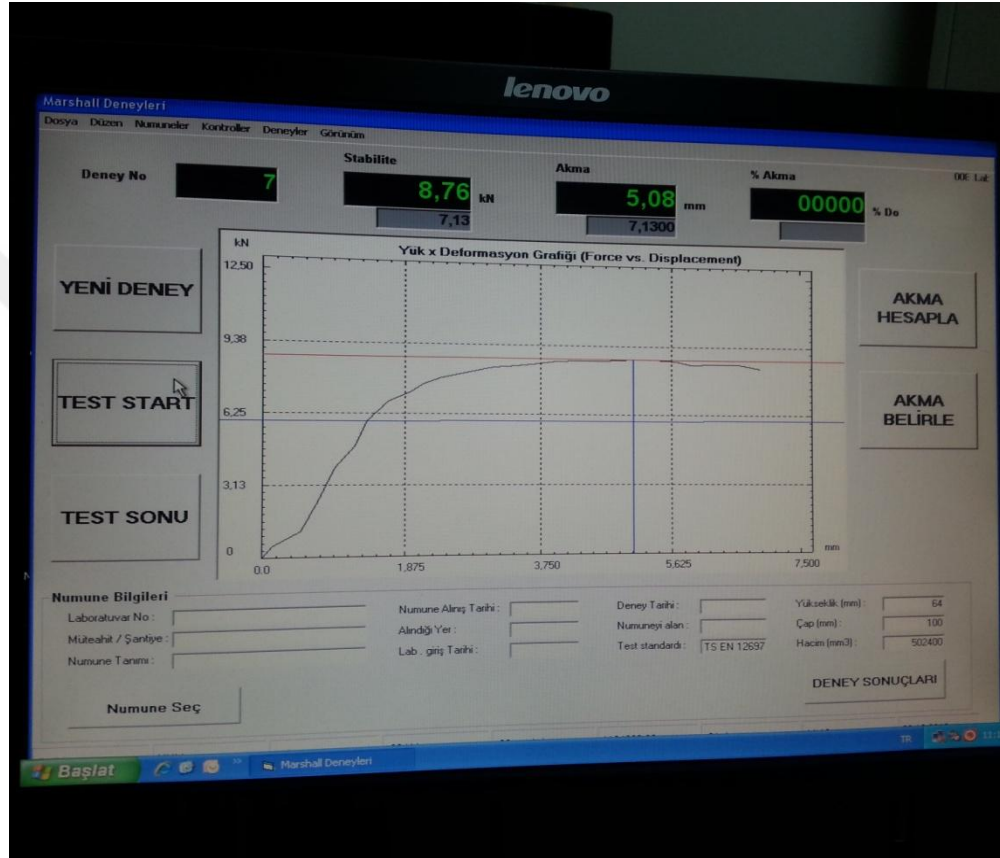
Şekil 2. 14 Su banyosu içinde bekletilen numuneler

Bu sırada da, kırma kafasının, kırılacak numunenin sıcaklığına bağlı olarak, 20°C ile 40°C arasında olması sağlanmaktadır. Su banyosu içerisinde bekletilen numuneler, yeterli süre geçtikten sonra, numara sıralarına göre, kırma kafasının alt başlığı üzerine yerleştirilir. Akma ölçme aleti de, kırma kafası üzerinde bulunan bölgedeki yerine düzgün bir şekilde yerleştirilir ve sıfırlanır. Numunelere “Marshall Yükleme Cihazı” (Şekil 2.15) ile yükleme yapılır.



Şekil 2. 15 Marshall yükleme cihazı

Yükleme işlemi, 51 mm/dk'lık sabit bir deformasyon hızıyla, en büyük yük değerine ulaşıncaya kadar devam eder ve en büyük yük değeri (stabilite) ile bu değere karşılık gelen kırılma deformasyonu (akma) değeri cihazın bağlı olduğu ekrandan okunur (Şekil 2.15). Okunan değer kaydedilir. Bu işlemler kısa süre içerisinde (yaklaşık 30 saniye) bitirilmelidir. Bu süre, numunenin istenilen sıcaklıkta kırılma işleminin gerçekleştirilebilmesi açısından önemlidir.



Şekil 2. 16 Marshall cihazına bağlı olan ekran görüntüsü örneği

Bu işlemler sonucunda elde edilen stabilite ve akma değerleri de (Şekil 2.16), ilgili formlara kaydedilmiştir.

## 2.4 Optimum Bitüm İçeriğinin Hesaplanması

Optimum bitüm içeriğini hesaplamak için, farklı bitüm yüzdelerinde hazırlanmış olan numunelere ait pratik özgül ağırlık, stabilite, akma, boşluk, bitüm ile dolu boşluk, mineral agregalar içindeki boşluk grafikleri çizilir. Daha sonra, pratik özgül ağırlık ve stabilite eğrilerinin en büyük değerlerine karşılık gelen bitüm içeriği değeri, asfaltla dolu boşluk- bitüm yüzdesi grafiğinde % 65–75 arasına karşılık gelen (%70) bitüm içeriği

değeri ve boşluk oranı- bitüm yüzdesi grafiğinde % 3–5 arasına karşılık gelen (%4) bitüm içeriği değeri, grafiklerden okunur. Bulunan değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak optimum bitüm içerikleri tayin edilir. Bu çalışma kapsamında, sönmüş kireç oranlarına bağlı olarak elde edilen optimum bitüm içerikleri Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2. 9 Sönmüş kireç miktarına bağlı optimum bitüm içerikleri

| Dizayn No | Sönmüş Kireç İçeriği (%) | Optimum Bitüm İçeriği (%) |
|-----------|--------------------------|---------------------------|
| 1         | %0,0                     | %5,20                     |
| 2         | %0,5                     | %5,28                     |
| 3         | %1,0                     | %5,25                     |
| 4         | %1,5                     | %5,47                     |
| 5         | %2,0                     | %5,35                     |
| 6         | %2,5                     | %5,59                     |
| 7         | %3,0                     | %5,38                     |
| 8         | %3,5                     | %5,60                     |
| 9         | %4,0                     | %5,39                     |
| 10        | %4,5                     | %5,54                     |
| 11        | %5,0                     | %6,16                     |
| 12        | %5,5                     | %6,33                     |
| 13        | %6,0                     | %6,23                     |
| 14        | %6,5                     | %5,74                     |
| 15        | %6,8                     | %6,10                     |

Yapılan deneyler sonucu ölçülerek elde edilen veriler; karışıma katılan agreganın miktarı, bitüm miktarı, sönmüş kireç miktarı, sönmüş kireç özgül ağırlığı ve sıkıştırılmış Marshall numunesinin yüksekliği, havadaki ağırlığı, sudaki ağırlığı, suya doygun yüzey ağırlığı, Marshall stabilitesi ve akma değeridir. Bulunan bu değerler yardımıyla hesaplanarak elde edilen veriler ise; numunenin hacmi (V), pratik özgül ağırlığı ( $D_p$ ), maksimum teorik özgül ağırlığı ( $D_T$ ), boşluk hacmi ( $V_h$ ), asfaltla dolu boşluk yüzdesi, (VFA), agregalar arası boşluk hacmi (VMA) ve düzeltilmiş Marshall stabilitesi değerleridir.

Numune yüksekliklerinde belirli bir standart olmadığı için tespit edilen stabilite değeri, numune yükseklik değerine göre belirlenen bir düzeltme faktörüyle (Çizelge 2.10) çarpılır [116] ve düzeltilmiş stabilite değerleri hesaplanır.

Çizelge 2. 10 Düzeltme faktörleri

| Numune Yüksekliği (mm) | Düzeltme Faktörü TSE-3720 | Numune Yüksekliği (mm) | Düzeltme Faktörü TSE-3720 | Numune Yüksekliği (mm) | Düzeltme Faktörü TSE-3720 | Numune Yüksekliği (mm) | Düzeltme Faktörü TSE-3720 |
|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| 56,1                   | 1,228                     | 58,6                   | 1,143                     | 61,1                   | 1,064                     | 63,6                   | 0,998                     |
| 56,2                   | 1,224                     | 58,7                   | 1,140                     | 61,2                   | 1,062                     | 63,7                   | 0,995                     |
| 56,3                   | 1,220                     | 58,8                   | 1,137                     | 61,3                   | 1,059                     | 63,8                   | 0,992                     |
| 56,4                   | 1,216                     | 58,9                   | 1,133                     | 61,4                   | 1,056                     | 63,9                   | 0,990                     |
| 56,5                   | 1,214                     | 59,0                   | 1,130                     | 61,5                   | 1,053                     | 64,0                   | 0,988                     |
| 56,6                   | 1,210                     | 59,1                   | 1,127                     | 61,6                   | 1,050                     | 64,1                   | 0,975                     |
| 56,7                   | 1,206                     | 59,2                   | 1,124                     | 61,7                   | 1,047                     | 64,2                   | 0,982                     |
| 56,8                   | 1,202                     | 59,3                   | 1,107                     | 61,8                   | 1,044                     | 64,3                   | 0,980                     |
| 56,9                   | 1,198                     | 59,4                   | 1,117                     | 61,9                   | 1,040                     | 64,4                   | 0,978                     |
| 57,0                   | 1,194                     | 59,5                   | 1,114                     | 62,0                   | 1,038                     | 64,5                   | 0,975                     |
| 57,1                   | 1,190                     | 59,6                   | 1,110                     | 62,1                   | 1,036                     | 64,6                   | 0,972                     |
| 57,2                   | 1,187                     | 59,7                   | 1,107                     | 62,2                   | 1,033                     | 64,7                   | 0,970                     |
| 57,3                   | 1,184                     | 59,8                   | 1,104                     | 62,3                   | 1,031                     | 64,8                   | 0,967                     |
| 57,4                   | 1,181                     | 59,9                   | 1,100                     | 62,4                   | 1,028                     | 64,9                   | 0,965                     |
| 57,5                   | 1,178                     | 60,0                   | 1,097                     | 62,5                   | 1,016                     | 65,0                   | 0,962                     |
| 57,6                   | 1,175                     | 60,1                   | 1,094                     | 62,6                   | 1,023                     | 65,1                   | 0,960                     |
| 57,7                   | 1,172                     | 60,2                   | 1,090                     | 62,7                   | 1,021                     | 65,2                   | 0,957                     |
| 57,8                   | 1,169                     | 60,3                   | 1,088                     | 62,8                   | 1,018                     | 65,3                   | 0,955                     |
| 57,9                   | 1,164                     | 60,4                   | 1,085                     | 62,9                   | 1,016                     | 65,4                   | 0,953                     |
| 58,0                   | 1,161                     | 60,5                   | 1,082                     | 63,0                   | 1,013                     | 65,5                   | 0,951                     |
| 58,1                   | 1,158                     | 60,6                   | 1,079                     | 63,1                   | 1,011                     | 65,6                   | 0,949                     |
| 58,2                   | 1,155                     | 60,7                   | 1,076                     | 63,2                   | 1,008                     | 65,7                   | 0,947                     |
| 58,3                   | 1,152                     | 60,8                   | 1,073                     | 63,3                   | 1,006                     | 65,8                   | 0,945                     |
| 58,4                   | 1,149                     | 60,9                   | 1,059                     | 63,4                   | 1,003                     | 65,9                   | 0,943                     |
| 58,5                   | 1,146                     | 61,0                   | 1,067                     | 63,5                   | 1,000                     | 66,0                   | 0,940                     |

#### 2.4.1 Karışım Hesapları için Gerekli Bağlılar

Kaplama karışım hesapları için, agrega efektif özgül ağırlığı, karışım agregasının özgül ağırlığı ve bitüm absorpsiyonu, teorik birim hacim ağırlık, pratik birim hacim ağırlık, boşluk hacmi, numunedeki bitüm hacmi, asfaltla dolu boşluk yüzdesi ve agregalar arası boşluk hacmi hesaplamaları yapılmıştır. Bunlar için gerekli bağıntılar aşağıda verilmiştir.

##### 2.4.1.1 Agregada Efektif Özgül Ağırlığı

Agregada tarafından absorbe edilen asfalt hacmi, absorbe edilen suyun hacminden daha azdır. Bunun sonucu olarak agreganın efektif özgül ağırlık değeri, hacim ve zahiri özgül ağırlık değerleri arasında olmalıdır. Efektif özgül ağırlık bu limitlerin dışına düştüğünde, değerin yanlış olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda, ASTM D 2041'e [149] göre yapılan teorik özgül ağırlık deneyi yeniden gözden geçirilmelidir. Bu deneyin yapılamadığı durumlarda, hacim özgül ağırlık ve zahiri özgül ağırlık değerlerinin ortalaması alınarak

bulunan efektif özgül ağırlık değeri hesaplarda kullanılabilir [149]. Agreganın efektif özgül ağırlığı Eşitlik (2.8)' de verildiği gibi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G_{ef} = \frac{100}{\left(\frac{100 + P_B}{G_m}\right) - \left(\frac{P_B}{G_B}\right)} \quad (2.8)$$

$G_{ef}$ : Agreganın efektif özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>) (Asfalt absorbe eden boşluklar hariç tüm boşlukları içerir.)

$P_B$ : Agreganın kütlece yüzdesi olarak bitüm yüzdesi (%)

$G_m$ : Gevşek kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

$G_B$ : Bitüm özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

#### 2.4.1.2 Agreganın Bitüm Absorbsiyonu ve Hacim Özgül Ağırlığı

Agrega karakteristiğine ve bitümlü maddenin viskozitesine göre agregaların bitümlü madde emme dereceleri değişiktir. Aynı şekil de agreganın su emme derecesi de değişiktir. Agreganın su emme derecesi ile bitüm emme derecesi arasında bir bağıntı yoktur. Bazı agregalar çok su emme yeteneğine sahip oldukları halde az bitüm emerler veya tersi olur. Suyu karşı ilgisi olmayan agregaya "Hidrofobik", suya karşı ilgisi olan agregaya "Hidrofilik" denmektedir. Agreganın bitümlü maddeye olan ilgisi arttıkça onun soyulmaya karşı direnci artar. Bunun için kaplamalarda hidrofobik karekterde agregaya kullanılması arzu edilir [150].

Absorbsiyon karışımının toplam ağırlığının yüzdesinden ziyade agreganın ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilir [149]. Asfalt absorbsiyon yüzdesi ( $P_{ba}$ ) eşitlik 2.9'de verildiği gibi hesaplanır:

$$P_{ba} = \frac{G_{ef} - G_{sb}}{G_{ef} \times G_{sb}} \times 100 \times G_B \quad (2.9)$$

Burada:

$P_{ba}$ : Agreganın bitüm absorbsiyonu (%)

$G_{ef}$ : Agreganın efektif özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

$G_{sb}$ : Agreganın hacim özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

$G_B$ : Bitüm özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

Bitümlü karışım içindeki agrega karışımı farklı tane yoğunluğuna sahip tane sınıflarından oluşuyorsa, agrega karışımının tane yoğunluğu aşağıda belirtilen eşitlik 2.10'daki bağıntı kullanılarak hesaplanır:

$$G_{sb} = \frac{P_{iri} + P_{ince} + P_{filler}}{\left( \frac{P_{iri}}{G_{iri}} + \frac{P_{ince}}{G_{ince}} + \frac{P_{filler}}{G_{filler}} \right)} \quad (2.10)$$

Burada;

$G_{sb}$ : Karışım agregasının özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

$G_{iri}$ : Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

$G_{ince}$ : İnce agreganın hacim özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

$G_{filler}$ : Fillerin özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

$P_{iri}$ : Kaba agreganın kütlece yüzdesi

$P_{ince}$ : İnce agreganın kütlece yüzdesi

$P_{filler}$ : Filler malzemenin kütlece yüzdesi

#### 2.4.1.3 Teorik ve Pratik Birim Hacim Ağırlık Tayini

Teorik birim hacim ağırlık değeri, eşitlik 2.11'te verilmiştir:

$$D_T = \frac{100}{\left( \frac{P_{agrega}}{G_{sb}} + \frac{P_{bitüm}}{G_B} \right)} \quad (2.11)$$

Burada:

$D_T$ : Teorik birim hacim ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)

$P_{agrega}$ : Numunedeki agrega miktarı (gr)

$P_{bitüm}$ : Numunedeki bitüm miktarı (gr)

$G_{sb}$ : Karışım agregasının özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

$G_B$ : Bitüm özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

Pratik birim hacim ağırlık değeri, eşitlik 2.12’te verilmiştir:

$$D_p = \frac{W_{hava}}{(W_{hava} - W_{su})} \quad (2.12)$$

$D_p$ : Pratik (ölçülen) birim hacim ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)

$W_{hava}$ : Numunenin havadaki ağırlığı (gr)

$W_{su}$ : Numunenin sudaki ağırlığı (gr)

#### 2.4.1.4 Sıkıştırılmış Kaplama Karışımındaki Boşluk Hacmi (%) [148]

Sıkıştırılmış kaplama karışımı içerisindeki boşluk hacmi ( $V_h$ ), bitümle kaplanmış agrega daneleri arasındaki küçük hava boşluklarından ibarettir. Sıkıştırılmış bitümlü karışımındaki hava boşluğu yüzdesi, Eşitlik 2.13’den yararlanılarak hesaplanır:

$$V_h (\%) = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100 \quad (2.13)$$

Burada;

$V_h$ : Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımındaki hava boşluğu (%)

$D_T$ : Teorik birim hacim ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)

$D_p$ : Pratik (ölçülen) birim hacim ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)

#### 2.4.1.5 Numunedeki Bitüm Hacmi

Numunedeki bitüm hacmi (cm<sup>3</sup>), eşitlik 2.14’den faydalanarak hesaplanmaktadır:

$$V_b (\%) = \frac{P_{bitüm}}{G_B} \times D_p \quad (2.14)$$

$V_b$ : Numunedeki bitüm hacmi (cm<sup>3</sup>)

$D_p$ : Pratik (ölçülen) birim hacim ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)

$P_{bitüm}$ : Numunedeki bitüm miktarı (gr)

$G_B$ : Bitüm özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

#### 2.4.1.6 Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi ve Agregalar Arası Boşluk Hacmi [148]

Asfaltla dolu boşluk (VFA), sıkıştırılmış kaplama karışımının bitümle dolan boşluklarını içerir; eşitlik 2.15'den yararlanarak bu değer hesaplanır:

$$VFA = \frac{V_b}{V_b + V_h} \times 100 \quad (2.15)$$

Agregalar arası boşluk hacmi ise, eşitlik 2.16'dan faydalanarak hesaplanır:

$$VMA = 100 - \frac{D_p \times (100 - P_b)}{G_{sb}} \times 100 \quad (2.16)$$

VMA: Agregalar arası boşluk hacmi (%)

$P_b$ : Karışımındaki bitüm yüzdesi (%)

$D_p$ : Pratik (ölçülen) birim hacim ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)

$G_{sb}$ : Karışım agregasının özgül ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

İlgili eşitlikler yardımıyla gerekli veriler elde edildikten sonra, numunelerdeki bitüm miktarı değişimine bağlı olarak Pratik Özgül Ağırlık ( $D_p$ ) - %AC, Stabilite - %AC, Boşluk Yüzdesi ( $V_h$ ) - %AC, Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA) - %AC, Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) - %AC ve Akma - %AC grafikleri çizilir (Şekil 2.17). Bu grafiklerden 4 tanesindeki bitüm yüzdesi değeri okunur. Dört bitüm yüzdesi değerinin 2 tanesi, maksimum stabilite ve maksimum pratik özgül ağırlık değerlerine karşılık gelen bitüm yüzdeleri iken, diğer iki değer ise, boşluk oranı ve asfaltla dolu boşluk oranı değerleri için şartname aralığından çekilerek tespit edilen değerlerdir. Bu şekilde elde edilen 4 bitüm yüzdesi değerinin aritmetik ortalaması alındığında (Eşitlik 2.17); elde edilen değer "optimum bitüm içeriği" olarak belirlenmiş olur.

$$Opt.\%AC = \frac{AC_{Dp} + AC_{MS} + AC_h + AC_{Vf}}{4} \quad (2.17)$$

Opt. %AC: Optimum bitüm içeriği (%)

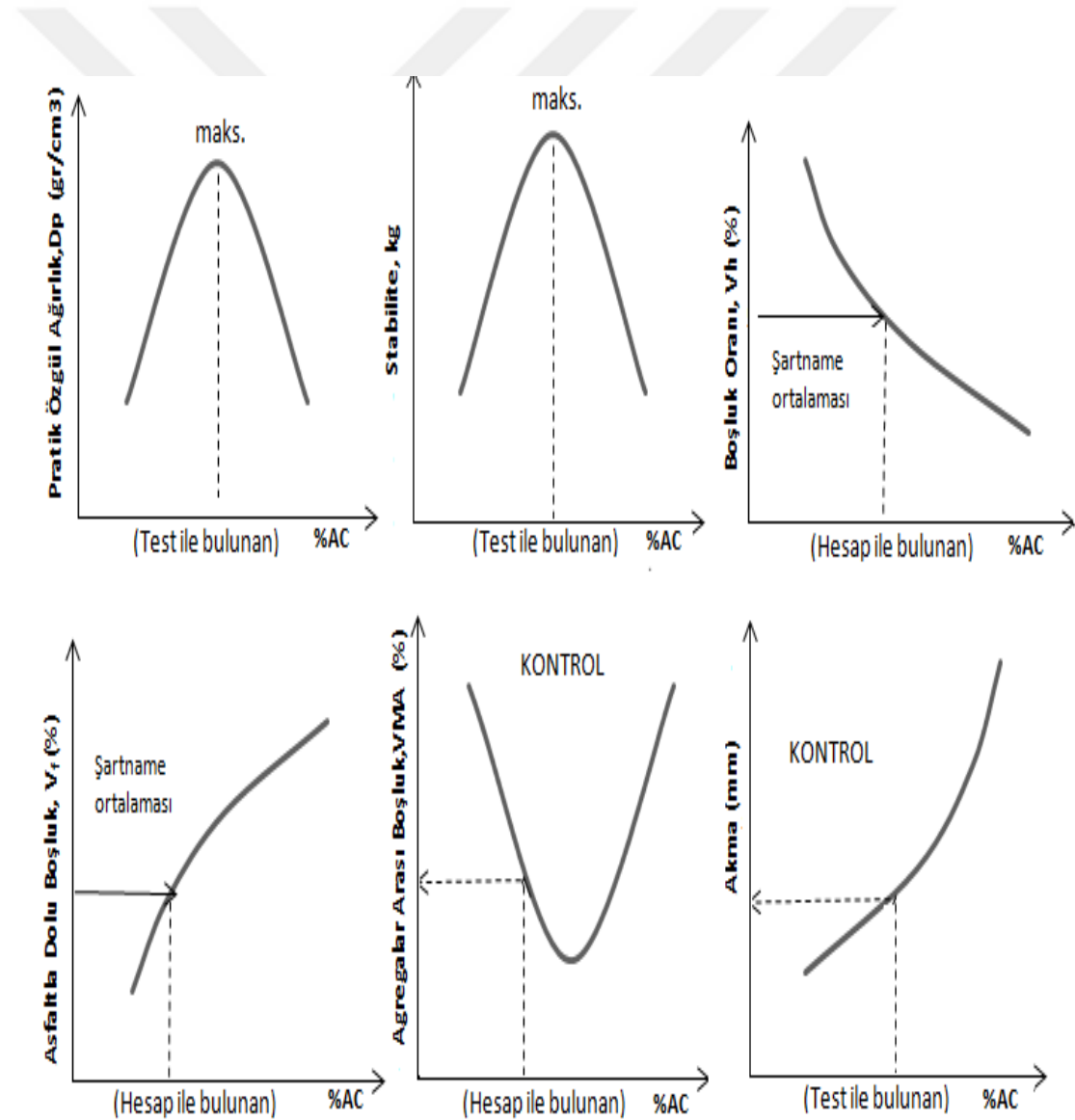
$AC_{Dp}$ : Pratik özgül ağırlık ile bitüm miktarı arasındaki değişim eğrisinden elde edilen bitüm yüzdesi

$AC_S$ : Stabilite ile bitüm miktarı arasındaki değişim eğrisinden elde edilen bitüm yüzdesi

$AC_h$ : Boşluk hacmi yüzdesi ile bitüm miktarı arasındaki değişim eğrisinden elde edilen bitüm yüzdesi

$AC_{VFA}$ : Asfaltla dolu boşluk yüzdesi ile bitüm miktarı arasındaki değişim eğrisinden elde edilen bitüm yüzdesi

Çizilen Akma - %AC ve Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) - %AC grafiklerinden de, optimum bitüm yüzdesine karşılık gelen değerler okunarak, kontrol yapılır.



Şekil 2. 17 Marshall tasarım grafikleri ve optimum bitüm muhtevası tayini

Çalışma kapsamında üretilen ve farklı oranlarda sönmüş kireç içeriğine göre dizayn edilen numunelere ait optimum bitüm içeriğini belirlemek için kullanılan değerler ve elde edilen sonuçlar Çizelge 2.11’de verilmiştir.

Çizelge 2. 11 Optimum bitüm içerikleri hesap sonuçları

| Dizayn No | AC <sub>Dp</sub> | AC <sub>VFA</sub> | AC <sub>MS</sub> | AC <sub>Vh</sub> | Opt. AC (%)          |
|-----------|------------------|-------------------|------------------|------------------|----------------------|
|           | a                | b                 | c                | d                | Ortalama=(a+b+c+d)/4 |
| 1         | 6,50             | 5,05              | 4,00             | 5,25             | 5,20                 |
| 2         | 6,50             | 5,17              | 4,00             | 5,45             | 5,28                 |
| 3         | 6,50             | 5,10              | 4,00             | 5,40             | 5,25                 |
| 4         | 6,50             | 5,51              | 3,99             | 5,87             | 5,47                 |
| 5         | 6,50             | 5,18              | 4,31             | 5,39             | 5,35                 |
| 6         | 6,51             | 5,45              | 4,58             | 5,81             | 5,59                 |
| 7         | 6,50             | 5,31              | 4,01             | 5,70             | 5,38                 |
| 8         | 6,49             | 5,42              | 4,66             | 5,84             | 5,60                 |
| 9         | 6,51             | 5,37              | 4,00             | 5,68             | 5,39                 |
| 10        | 6,51             | 5,64              | 4,00             | 5,99             | 5,54                 |
| 11        | 6,50             | 5,90              | 5,85             | 6,38             | 6,16                 |
| 12        | 6,50             | 5,90              | 6,51             | 6,40             | 6,33                 |
| 13        | 6,50             | 5,75              | 6,50             | 6,18             | 6,23                 |
| 14        | 6,63             | 6,00              | 4,00             | 6,35             | 5,74                 |
| 15        | 6,50             | 5,85              | 5,80             | 6,25             | 6,10                 |

## 2.5 Bulanık Mantık

Bulanık ilkeler hakkında ilk bilgiler, Azerbaycan asıllı Lütfü Asker Zade (Zadeh, 1965) tarafından literatüre sokulmuştur. Bu fikirler, batı dünyasında şüphe ile karşılanmış ve oldukça yoğun eleştiri almıştır. Bunun ana sebebi, batı kültürünün temelinde ikili mantık, yani Aristo mantığının yatması ve olaylara evet-hayır, beyaz-siyah, kurak-sulak, artı-eksi vb. gibi ikili esasta yaklaşılmasıdır. Bu iki değer arasında başka seçeneklere, kesin olmadığı düşüncesi ile hiç yer verilmez. Batı toplumunda bulanık kelimesi güvenirsizliği ifade eder. Ancak, 1970’li yıllardan sonra doğu dünyasında ve özellikle de Japonya’da bulanık mantık ve sistem kavramlarına önem verilmiştir. Bu sistemlerin, teknolojik cihaz yapım ve işleyişinde kullanılması sonrasında, tüm dünyada yaygın bir biçimde tanınmışlardır [151].

Bulanıklık, çoklu değerlilik (multi – valued) demektir. İkili mantığın 0-1 önermelerine karşılık bulanıklık, üç veya daha fazla, belki de sonsuz sayıda önermeler yapar. Yani bu mantıkta küme üyelikleri ya var ya yok şeklinde ifade

edilmek zorunda değildir; derecelendirilebilir. Başka bir deyişle, yalnızca siyah ve beyaz değil, ikisinin arasında yer alan sonsuz sayıda gri ton da dikkate alınabilmektedir. Örneğin uzaklıkla ilgili bir problemde mesafenin yalnızca yakın ya da uzak olduğunu belirtmekle kalmayıp ne kadar yakın ya da ne kadar uzak olduğunu da belirtir [117].

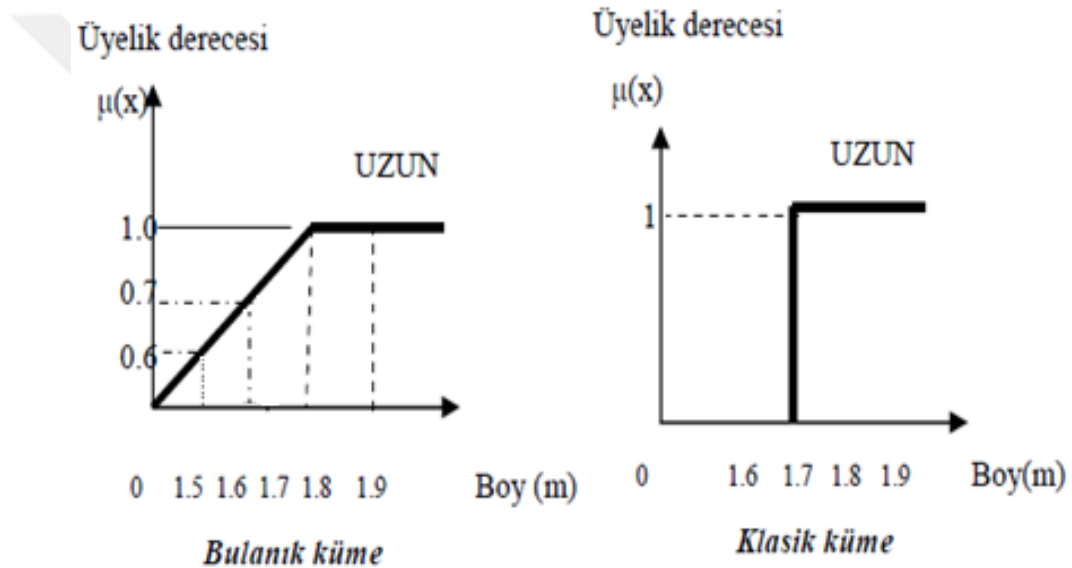
Bulanık mantık, son yıllarda birçok mühendislik dalında, veri tabanlarının sözelleştirilmesinde, tele sekreterlerin cevaplamasında ve birçok konuda dünyada kullanılır hale gelmektedir. Değişik bilim ve mühendislik konularını yayınlayan uluslararası dergilere bakıldığında, hemen her mühendislik konusunda ve teknolojik çalışmalarda artık bulanık sistem kontrollerinin ve hesaplamalarının yaygınlaştığı görülmektedir [117].

### **2.5.1 Bulanık Küme ve Üyelik Dereceleri**

Günlük hayatta karşılaştığımız birçok durumda, görüşlerimizi ifade etmek için sayısal bilgilerden ziyade sözel ifadeler kullanmaktayız. Bu ifadeleri, diğer insanlara iletmek için de en az bir dil kullanmaya ihtiyaç vardır. Dil ne kadar kesin olmayan kelime ve cümleleri içerse de, insan iletişiminde ve bilgi akışında kullanılan en etkin araçtır. Örnek olarak, 'hava sıcak' denildiğinde herkes hava kelimesinin günlük hayattaki kullanımını kesinlikle anlamakta, ancak 'sıcak' kelimesinin ifade ettiği anlam göreceli olarak birbirinden farklı olabilmektedir. Kutuplarda bulunan bir kişinin sıcak için  $15^{\circ}\text{C}$ ' yi algılamasına karşılık, ekvatorda yaşayan bir kişi için bu değer  $35^{\circ}\text{C}$ ' yi bulabilir. Böylece, 'sıcak' kelimesinin altında insanların ima ettiği sayısal anlayışın bir sonucu olarak, belirsiz bir durum ortaya çıkar. Bu rastgele değildir ancak belirsizdir ve bu şekilde kelimelerin algılanmalarındaki belirsizliklere bulanıklık denir. Aristo mantığı geçerli sayılacak olsaydı, bu iki grup insan arasında sürekli anlaşmazlıklar bulunacaktı. Bunun nedeni, Aristo mantığında sadece sıcak veya soğuk ifadesi olması, ikisi arasına değer verilmemesidir. Böylelikle, bulanık mantığın sayılardan çok, sözel kelimeleri esas aldığı anlaşılmış olmaktadır [117].

Bulanık küme kavramında klasik kümelerdeki (0-1 mantığı) “elemandır veya değildir” ifadesi yerine “şu kadar elemandır ya da şu kadar eleman değildir”

ifadeleri yer alır (Şekil 2.18). Bir varlık için eleman olma durumu 1 ve olmama durumu 0 ile değil, 0 ile 1 arasındaki üyelik derecesi ile gösterilir. Örneğin “Uzun boylu kime denir?” sorusuna cevap verecek olan bir “UZUN” alt kümesini her iki mantığa göre tanımlayalım. Şekil 2.18’de de görüldüğü gibi klasik küme mantığına göre 160 cm boyundaki bir kişi uzun boylu insanlar kümesi içinde değildir. Hatta 169 cm boyundaki bir kişi uzun boylu insanlar kümesi içinde değildir. Oysa bulanık mantığa göre 160 cm boyundaki kişiye kısa denilmez. Çünkü kısmen de olsa uzun boylu insanlar kümesi içindedir. Bulanık mantıkta 160 cm boyundaki biri 0,6 üyelik derecesiyle, 170 cm boyundaki biri 0,7 üyelik derecesiyle, 180 cm boyundaki biri de 1,0 üyelik derecesiyle uzun boylu olabilir [117].



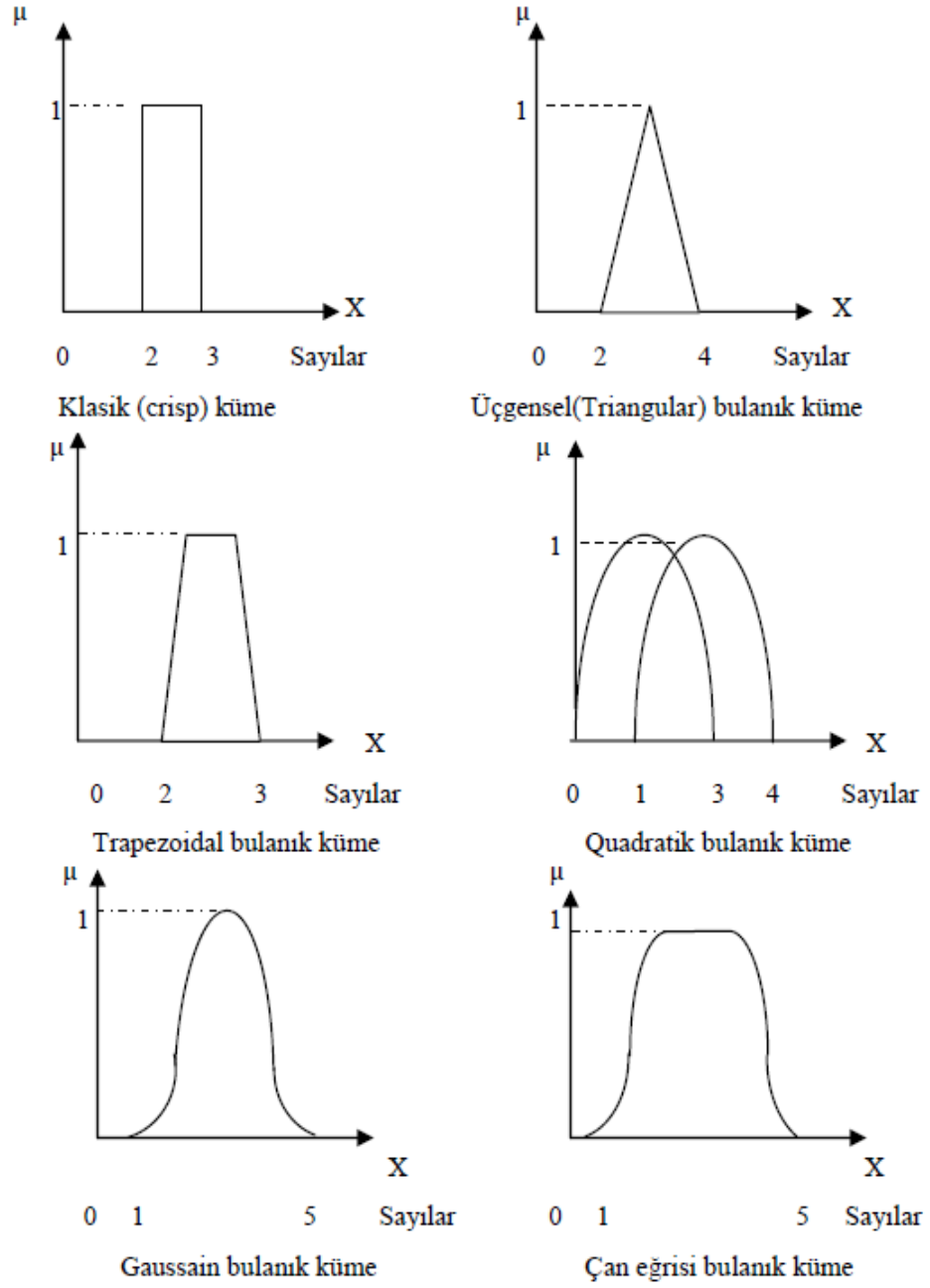
Şekil 2. 18 Bulanık küme ve klasik küme karşılaştırması [117]

### 2.5.2 Üyelik Fonksiyonları

Üyelik fonksiyonları, sistem parametrelerini tanımlar. Şekil 2.19’de, üyelik fonksiyonların alabileceği muhtemel şekiller verilmiştir.

Üyelik fonksiyonlarının sayısına ve sekline ait hiçbir kısıtlama yoktur. Tamamıyla tasarımcının istek ve tecrübesine bağlıdır. Bu zamana kadar olan çalışmalarda en çok üçgen, yamuk, çan eğrisi şeklinde üyelik fonksiyonları kullanıldığı görülmektedir [117].

Bu çalışma kapsamında oluşturulan bulanık mantık modelinde, üyelik fonksiyonu tipi olarak trapezoidal ve üçgensel (triangular) bulanık kümeleri tercih edilmiştir.



Şekil 2. 19 Üyelik fonksiyonlarının alabildiği değişik şekiller [117]

### 2.5.3 Bulanık Sistem

Bulanık sistemlere bir başka örnek, bir kişinin araba sürmeyi öğrenmesinde ortaya çıkan sözel bilgilerdir. Sürücü adayına hız şu kadar kilometreye varınca gaza, şu kadar miktar bas demektense, eğitim sırasında;

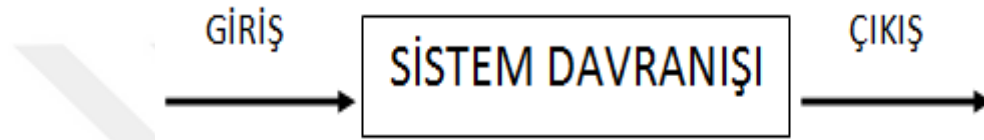
**“EĞER hız düşük İSE gaza fazla bas”**

veya

**“EĞER hız yüksek İSE gaza az bas”**

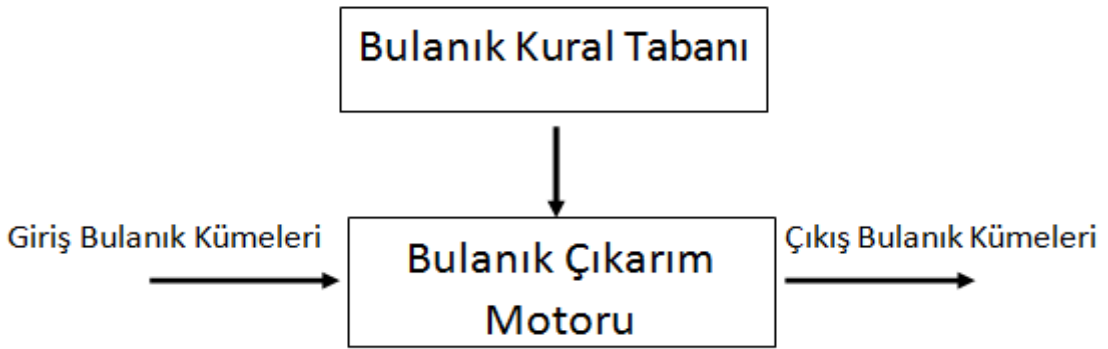
gibi kurallar söylenir. Bu kurallardaki düşük, az ve yüksek kelimeleri, kişilere belirli bir aralıkta sayısal değerleri ifade etmektedir. Bu ifade edilen değerler topluluğuna, o kelimeyi temsil eden *küme* denir. Bu kümenin her üyesi aynı derecede önemli değildir, ancak bazı değerler, diğerlerine göre önceliklidir. **“EĞER – İSE”** şeklindeki kuralların **“EĞER”** ile **“İSE”** kelimeleri arasında kalan kısımlara öncül kısım ve ‘İSE’ kelimesinden sonra olan kısma da soncul kısım veya kural çıkarımı adı verilir [152].

Şimdiye kadar öğrenilen matematik, stokastik veya kavramsal sistemlerin hemen hepsi Şekil 2.20' de verilen üç ayrı birimden (giriş, sistem davranışı ve çıkış) ibarettir [151].



Şekil 2. 20 Klasik Sistem [151]

Bulanık sistemlerin bu klasik tasarımdan farkı, sistem davranışı kısmının ikiye ayrılarak Şekil 2.21' de gösterildiği gibi kendi aralarında bağlantılı dört birimin oluşmasıdır.



Şekil 2. 21 Genel Bulanık Sistem [151]

#### 2.5.4 Çalışma kapsamında yapılan modelleme aşamaları

Bu çalışmada, bulanık sistemin girdi parametreleri olarak, karışımlardaki bitüm yüzdesi (%AC) ve sönmüş kireç yüzdesi %SK, çıktı parametreleri olarak ise karışım özelliklerini belirleyen, pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ), akma (F), stabilite (MS), boşluk Oranı ( $V_h$ ), asfaltla dolu boşluk oranı (VFA) ve agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) değerleri alınmıştır.

Çalışmada, öncelikle, girdi parametreleri Çizelge 2.12 ve Çizelge 2.13'te yer alan farklı kategorilere bölünmüştür. Çalışmada kullanılan sönmüş kireç aralığı %0-%6,8 arasında değişmektedir. Bu aralıktaki değerlerin sınıflandırılmasında 8 adet kategori yer almaktadır. Marshall deneyi uygulanan numunelerde %AC olarak ise, %4, %4,5, %5, %5,5, %6 ve %6,5 arasında bitüm kullanıldığından, bu aralıktaki değerler de kendi içinde 4 adet kategoriye ayrılmıştır.

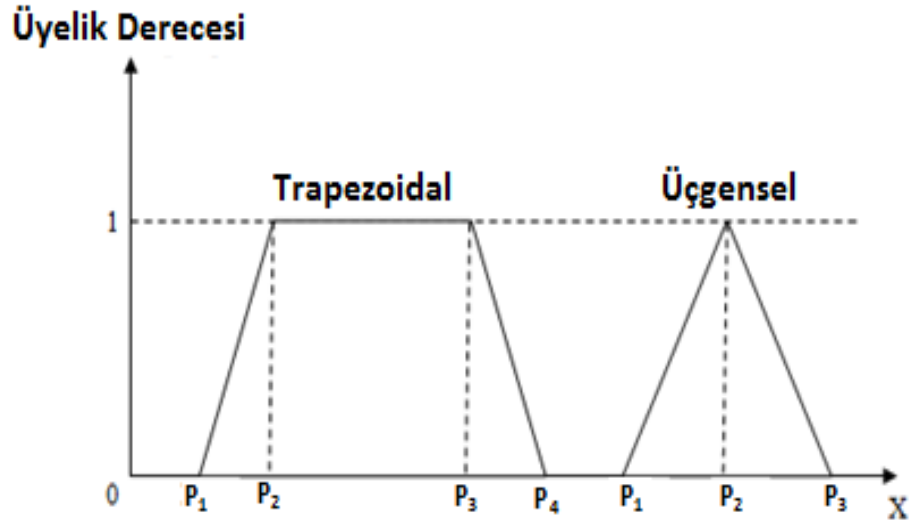
Çizelge 2. 12 Sönmüş kireç (%SK) kategorileri

| Kategori ismi | Üyelik Fonksiyonu tipi | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> | P <sub>4</sub> |
|---------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Sıfıra yakın  | Trapezoidal            | -2.52          | -1             | 0              | 0.75           |
| Çok çok az    | Üçgensel               | 0.3            | 1              | 1.7            | -              |
| Çok az        | Üçgensel               | 1.2            | 2              | 2.8            | -              |
| Az            | Üçgensel               | 2.3            | 3              | 3.7            | -              |
| Orta          | Üçgensel               | 3.3            | 4              | 4.7            | -              |
| Fazla         | Üçgensel               | 4.3            | 5              | 5.7            | -              |
| Çok fazla     | Üçgensel               | 5.3            | 6              | 6.6            | -              |
| Çok çok fazla | Trapezoidal            | 6.2            | 7              | 7.77           | 8.17           |

Çizelge 2. 13 Bitüm yüzdesi (%AC) kategorileri

| Kategori ismi | Üyelik Fonksiyonu tipi | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> | P <sub>4</sub> |
|---------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Az            | Trapezoidal            | -2.52          | -0.28          | 3.75           | 4.75           |
| Orta          | Üçgensel               | 4.25           | 5              | 5.75           | -              |
| Fazla         | Üçgensel               | 5.25           | 6              | 6.6            | -              |
| Çok fazla     | Trapezoidal            | 6.1            | 6.7            | 7.05           | 9.86           |

Kategorilere ayrılan girdi parametrelerinin, seçilen üyelik fonksiyonu tipine bağlı olarak değişen sayıda P<sub>i</sub> (üyelik fonksiyonu) değerleri mevcuttur. P<sub>i</sub> (i = 1, 2, 3, 4) ile gösterilen değerlerin anlamı Şekil 2.22'de gösterildiği gibi üçgensel ve trapezoidal tipli fonksiyonlardır.



Şekil 2. 22 %SK ve %AC için üyelik fonksiyonu ( $P_i$ ) değerlerinin anlamı

Kullanılan girdi üyelik fonksiyonları deneysel sonuçlar kullanılarak seçilmiştir. Eğer iki deney setine ait girdi parametreleri birebir aynı kuralı tetikliyorsa, çıktı parametreleri birbirine çok yakın demektir. Ancak, çıktı parametrelerine ilişkin deney sonuçları %AC ve %SK değerlerindeki ufak değişikliklerden hassasiyetle etkilendiği için bu durum arzu edilmez. Bu nedenle, girdi parametrelerimizi kategorize ederken, herhangi iki deney setine ait girdi parametrelerinin birebir aynı kategorilere girmemesine dikkat edilmiştir.

Modellemenin bir sonraki aşaması ise kural kümelerinin oluşturulmasıdır. Girdi parametrelerimizden biri 8, diğeri ise 4 kategoriye ayrıldığı için, toplamda 32 ( $4 \times 8$ ) farklı kombinasyon gerçekleşmiştir. Her farklı kombinasyon için en az 1 adet kural bulunması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında toplam 38 adet kural belirlenmiştir. Bu kurallar, Şekil 2.14'te gösterilmiştir.

Bulanık modelleme yapılırken, Sugeno tipi bulanık model seçilmiştir. Bunun sebebi, yapılan deney sonuçları için Mamdani tipinin kullanımından daha iyi sonuçlar elde edilmiş olmasıdır. Sugeno tipi bulanık mantık sisteminde çıktı parametreleri ya sabit sayılar ya da girdi parametrelerinin doğrusal bir fonksiyonu olabilmektedir. Bulanık sistemlerde kullanılan ve model için optimum çözümü veren "ANFIS", Sugeno tipi bulanık modellerde, yalnızca bir adet çıktı parametresinin olduğu durumlarda kullanılabilen bir uygulamadır [153, 154]. Ancak, bu çalışmadaki çıktı parametresi sayısı birden fazla olduğundan dolayı,

ANFİS uygulanamamıştır. Bunun yerine her kural için, o kuralı tetikleyen veriler belirlenmiştir. Her farklı çıktı değişkeni için de, Microsoft® Excel programı kullanılarak, çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Böylece girdiler (%AC ve %SK) ile çıktılar ( $D_p$ , VMA, MS,  $V_h$ , F ve VFA) arasında doğrusal bir ilişki sağlanmıştır.

Böylelikle kurallar;

**“EĞER %AC az VEYA %SK orta İSE stabilite (MS),  $a*(\%AC) + b*(\%SK) + c$  VEYA asfaltla dolu boşluk (VFA)  $d*(\%AC) + e*(\%SK) + f$  AND .....”,**

şeklinde oluşturulmuştur. Burada a, b, c, d, e, f... gibi değerler gerçek (negatif olabilen) sabitlerdir. Bazı kurallar için, çok az veri (1 veya 2) bulunduğundan, doğrusal regresyon yapılamamış ve bu kurallar için sabit üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.

Oluşturulan modelin, daha önce tanıtılan veriler arasından doğruyu göstermesinden ziyade, daha önce sisteme girilmemiş test verisi için vereceği anlamlı sonuç önemlidir. Bu nedenle deneysel çalışma sonucunda elde edilen tüm veriler modelin kalibrasyonu için kullanılmamıştır. Yani model kalibrasyonu için öncelikle, optimum bitüm muhtevalarını belirlemek ve sönmüş kireç etkisini gözlemlemek için üretilen 270 adet numuneye ait veriler sisteme girilmiştir. Modeli test etmek amacıyla da, optimum bitüm içeriklerine göre üretilen numunelerde, hesap yöntemi ile elde edilen karışım parametreleri ( $D_p$ , VMA, MS,  $V_h$ , F ve VFA) değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 2. 14 Modelde kullanılan kurallar listesi

|      | %AC       |      | %SK           |     | D <sub>p</sub> | VMA  | MS   | V <sub>h</sub> | F    | VFA  |
|------|-----------|------|---------------|-----|----------------|------|------|----------------|------|------|
| EĞER | az        | VEYA | sıfıra yakın  | İSE | MF1            | MF1  | MF1  | MF1            | MF1  | MF1  |
| EĞER | az        | VEYA | çok çok az    | İSE | MF2            | MF2  | MF2  | MF2            | MF2  | MF2  |
| EĞER | az        | VEYA | çok az        | İSE | MF3            | MF3  | MF3  | MF3            | MF3  | MF3  |
| EĞER | az        | VEYA | az            | İSE | MF4            | MF4  | MF4  | MF4            | MF4  | MF4  |
| EĞER | az        | VEYA | orta          | İSE | MF5            | MF5  | MF5  | MF5            | MF5  | MF5  |
| EĞER | az        | VEYA | fazla         | İSE | MF6            | MF6  | MF6  | MF6            | MF6  | MF6  |
| EĞER | az        | VEYA | çok fazla     | İSE | MF7            | MF7  | MF7  | MF7            | MF7  | MF7  |
| EĞER | az        | VEYA | çok çok fazla | İSE | MF8            | MF8  | MF8  | MF8            | MF8  | MF8  |
|      |           |      |               |     |                |      |      |                |      |      |
| EĞER | orta      | VEYA | sıfıra yakın  | İSE | MF9            | MF9  | MF9  | MF9            | MF9  | MF9  |
| EĞER | orta      | VEYA | çok çok az    | İSE | MF10           | MF10 | MF10 | MF10           | MF10 | MF10 |
| EĞER | orta      | VEYA | çok az        | İSE | MF11           | MF11 | MF11 | MF11           | MF11 | MF11 |
| EĞER | orta      | VEYA | az            | İSE | MF12           | MF12 | MF12 | MF12           | MF12 | MF12 |
| EĞER | orta      | VEYA | orta          | İSE | MF13           | MF13 | MF13 | MF13           | MF13 | MF13 |
| EĞER | orta      | VEYA | fazla         | İSE | MF14           | MF14 | MF14 | MF14           | MF14 | MF14 |
| EĞER | orta      | VEYA | çok fazla     | İSE | MF15           | MF15 | MF15 | MF15           | MF15 | MF15 |
| EĞER | orta      | VEYA | çok çok fazla | İSE | MF16           | MF16 | MF16 | MF16           | MF16 | MF16 |
|      |           |      |               |     |                |      |      |                |      |      |
| EĞER | fazla     | VEYA | sıfıra yakın  | İSE | MF17           | MF17 | MF17 | MF17           | MF17 | MF17 |
| EĞER | fazla     | VEYA | çok çok az    | İSE | MF18           | MF18 | MF18 | MF18           | MF18 | MF18 |
| EĞER | fazla     | VEYA | çok az        | İSE | MF19           | MF19 | MF19 | MF19           | MF19 | MF19 |
| EĞER | fazla     | VEYA | az            | İSE | MF20           | MF20 | MF20 | MF20           | MF20 | MF20 |
| EĞER | fazla     | VEYA | orta          | İSE | MF21           | MF21 | MF21 | MF21           | MF21 | MF21 |
| EĞER | fazla     | VEYA | fazla         | İSE | MF22           | MF22 | MF22 | MF22           | MF22 | MF22 |
| EĞER | fazla     | VEYA | çok fazla     | İSE | MF23           | MF23 | MF23 | MF23           | MF23 | MF23 |
| EĞER | fazla     | VEYA | çok çok fazla | İSE | MF38           | MF38 | MF38 | MF38           | MF38 | MF38 |
|      |           |      |               |     |                |      |      |                |      |      |
| EĞER | çok fazla | VEYA | sıfıra yakın  | İSE | MF24           | MF24 | MF24 | MF24           | MF24 | MF24 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | sıfıra yakın  | İSE | MF25           | MF25 | MF25 | MF25           | MF25 | MF25 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | çok çok az    | İSE | MF26           | MF26 | MF26 | MF26           | MF26 | MF26 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | çok çok az    | İSE | MF27           | MF27 | MF27 | MF27           | MF27 | MF27 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | çok az        | İSE | MF28           | MF28 | MF28 | MF28           | MF28 | MF28 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | çok az        | İSE | MF29           | MF29 | MF29 | MF29           | MF29 | MF29 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | az            | İSE | MF30           | MF30 | MF30 | MF30           | MF30 | MF30 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | az            | İSE | MF31           | MF31 | MF31 | MF31           | MF31 | MF31 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | orta          | İSE | MF32           | MF32 | MF32 | MF32           | MF32 | MF32 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | fazla         | İSE | MF33           | MF33 | MF33 | MF33           | MF33 | MF33 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | fazla         | İSE | MF34           | MF34 | MF34 | MF34           | MF34 | MF34 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | çok fazla     | İSE | MF35           | MF35 | MF35 | MF35           | MF35 | MF35 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | çok çok fazla | İSE | MF36           | MF36 | MF36 | MF36           | MF36 | MF36 |
| EĞER | çok fazla | VEYA | çok çok fazla | İSE | MF37           | MF37 | MF37 | MF37           | MF37 | MF37 |

## BÖLÜM 3

### BULGULAR

Bu çalışmada, öncelikle, SK oranı %0,0'dan %6,8'e kadar 0,5 birim aralıklarla değişen 15 adet Marshall dizaynı üretilmiş ve bu dizaynlara ait optimum bitüm içerikleri elde edilmiştir. Ardından, her bir dizayn için bulunan optimum bitüm içeriklerine karşılık gelen, pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ), akma (F), stabilite (MS), boşluk oranı ( $V_h$ ), asfaltla dolu boşluk oranı (VFA) ve agregalar arası boşluk oranı (VMA) değerleri elde edilerek ilgili grafikler değerlendirilmiştir. Daha sonra, bulunan optimum bitüm yüzdeleri kullanılarak, her bir dizayn için 3'er adet olmak üzere toplam  $15 \times 3 = 45$  adet numune üretilmiştir. Karışımlara ait pratik özgül ağırlık, boşluk oranı, asfaltla dolu boşluk oranı ve agregalar arası boşluk oranı değerleri ilgili denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Bu şekilde elde edilen veriler ve ilk veriler karşılaştırılarak, sonuçlar arasındaki uyumluluk durumları değerlendirilmiştir.

#### 3.1 Marshall Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Marshall dizayn verileri kullanılarak hazırlanan, SK katkısız geleneksel karışımda (kontrol karışımı) %5,2'lik optimum bitüm muhtevastaki; stabilite 11,60 kN; akma, 4,40 mm; karışımın pratik özgül ağırlığı  $2,409 \text{ gr/cm}^3$ ; boşluk yüzdesi %4,10; agregalar arası boşluk yüzdesi %15,27; asfalt dolu boşluk yüzdesi %73,00; karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı  $2,513 \text{ gr/cm}^3$  olarak bulunmuştur. Bu değerler (akma hariç) şartname sınırları arasında kalmaktadır [126].

Marshall karışım tasarım yöntemine göre hazırlanan numunelerin tartım ve ölçüm değerleri kullanılarak, pratik özgül ağırlıkları ( $D_p$ ), hava boşluğu yüzdesi ( $V_h$ ), agregalar

arası boşluk yüzdesi (VMA) ve asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 3.1).

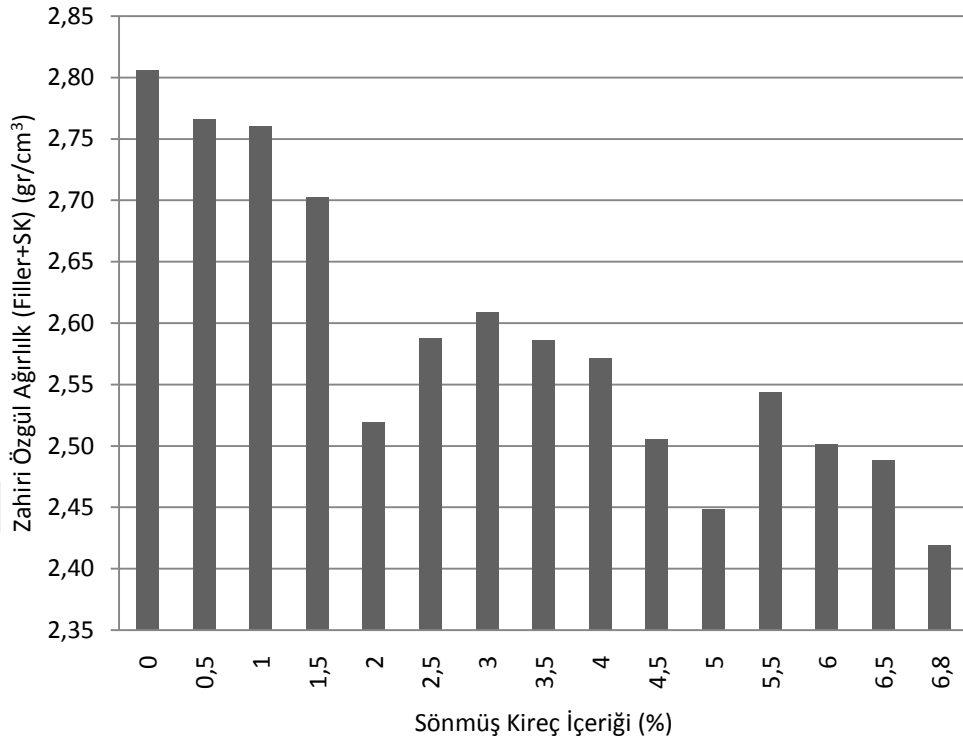
Çizelge 3. 1 Marshall dizayn sonuçları

| Marshall Dizayn No. | SK İçeriği (%) | Zahiri Özgül Ağırlık (Filler+SK) (gr/cm <sup>3</sup> ) | Optimum AC İçeriği (%) | D <sub>p</sub> (gr/cm <sup>3</sup> ) | VFA (%) | MS (kN) | V <sub>h</sub> (%) | F mm | VMA (%) | Marshall Oranı |
|---------------------|----------------|--------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|---------|---------|--------------------|------|---------|----------------|
| 1                   | 0              | 2,806                                                  | 5,20                   | 2,409                                | 73,00   | 11,60   | 4,10               | 4,40 | 15,27   | 2,64           |
| 2                   | 0,5            | 2,766                                                  | 5,28                   | 2,398                                | 71,60   | 11,64   | 4,45               | 4,85 | 15,70   | 2,40           |
| 3                   | 1              | 2,760                                                  | 5,25                   | 2,400                                | 72,00   | 11,60   | 4,40               | 4,75 | 15,58   | 2,44           |
| 4                   | 1,5            | 2,702                                                  | 5,47                   | 2,371                                | 68,90   | 8,58    | 5,18               | 4,13 | 16,63   | 2,08           |
| 5                   | 2              | 2,519                                                  | 5,35                   | 2,387                                | 72,90   | 9,81    | 4,09               | 4,20 | 15,55   | 2,34           |
| 6                   | 2,5            | 2,588                                                  | 5,59                   | 2,372                                | 71,60   | 8,41    | 4,62               | 4,40 | 16,29   | 1,91           |
| 7                   | 3              | 2,609                                                  | 5,38                   | 2,377                                | 70,05   | 9,25    | 4,80               | 6,05 | 16,20   | 1,53           |
| 8                   | 3,5            | 2,586                                                  | 5,60                   | 2,374                                | 72,00   | 8,75    | 4,50               | 4,27 | 16,26   | 2,05           |
| 9                   | 4              | 2,571                                                  | 5,39                   | 2,371                                | 70,03   | 10,24   | 4,84               | 4,55 | 16,25   | 2,25           |
| 10                  | 4,5            | 2,505                                                  | 5,54                   | 2,355                                | 69,00   | 8,70    | 5,18               | 4,10 | 16,65   | 2,12           |
| 11                  | 5              | 2,448                                                  | 6,16                   | 2,342                                | 73,00   | 8,41    | 4,80               | 5,10 | 17,32   | 1,65           |
| 12                  | 5,5            | 2,544                                                  | 6,33                   | 2,358                                | 76,50   | 8,05    | 4,20               | 5,40 | 17,44   | 1,49           |
| 13                  | 6              | 2,501                                                  | 6,23                   | 2,366                                | 77,00   | 8,30    | 3,80               | 6,52 | 16,78   | 1,27           |
| 14                  | 6,5            | 2,488                                                  | 5,74                   | 2,324                                | 66,00   | 8,12    | 6,10               | 4,11 | 17,94   | 1,98           |
| 15                  | 6,8            | 2,419                                                  | 6,10                   | 2,350                                | 74,00   | 8,70    | 4,42               | 4,60 | 17,04   | 1,89           |

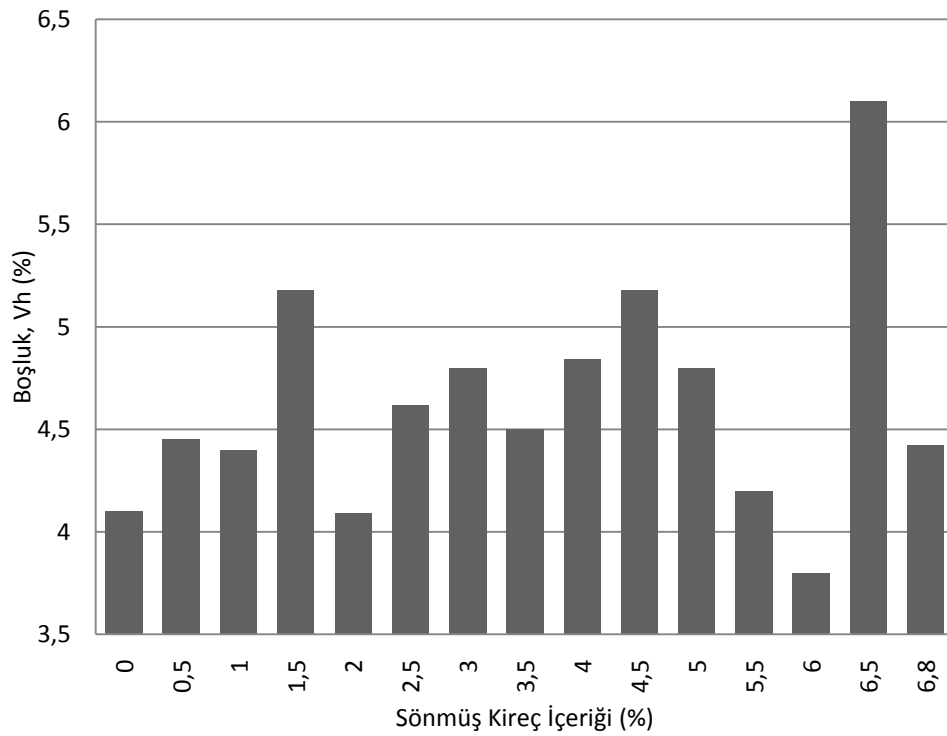
Çizelge 3.1’de verilen değerlerden koyu renge boyalı olanlar, genel eğilime çok aykırı olduklarından, deneysel hatalar sonucu elde edildikleri düşünülmüştür. Bu nedenle söz konusu veriler (outlier data) değerlendirmeye alınmadan ikili karşılaştırmalar yapılmıştır.

Agrega karışımındaki filler malzemenin yoğunluğu, SK yoğunluğundan büyük olduğundan, SK katkısı, asfalt numunelerinin özgül ağırlıklarında düşüşe yol açmıştır (Şekil 3.1). Özellikle %3,0-%3,5’lik SK oranlarından sonraki ani düşüşler bunu doğrulamaktadır. Bu duruma paralel olarak, SK katkısının miktarı arttıkça, karışım daha boşluklu bir yapıya dönüşmektedir (Şekil 3.2). Nitekim, Marshall mikserinde numune hazırlanırken SK miktarı arttıkça bitümün agregayı sarmasının zorlaştığı gözlenmiştir. Özellikle %3-3,5’lik SK muhtevalarında, en kaba agregaların bazı kısımlarının bitümle sarılmadığı görülmeye başlanmış, SK içeriği arttıkça bu durumun daha küçük dane boyutundaki agregalara sirayet ettiği izlenmeye başlanmıştır. Buna paralel olarak, agregalar arası boşluk

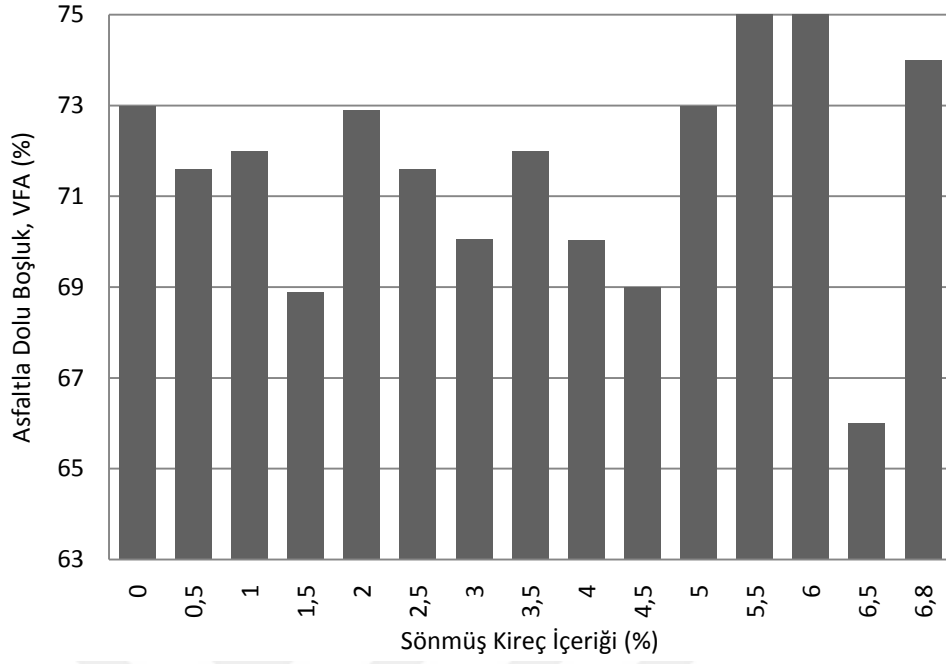
artarken, asfaltla dolu boşluk yüzdesi azalmaktadır (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4). Nitekim, SK muhtevası arttıkça optimum bitüm miktarı ihtiyacı artmaktadır.



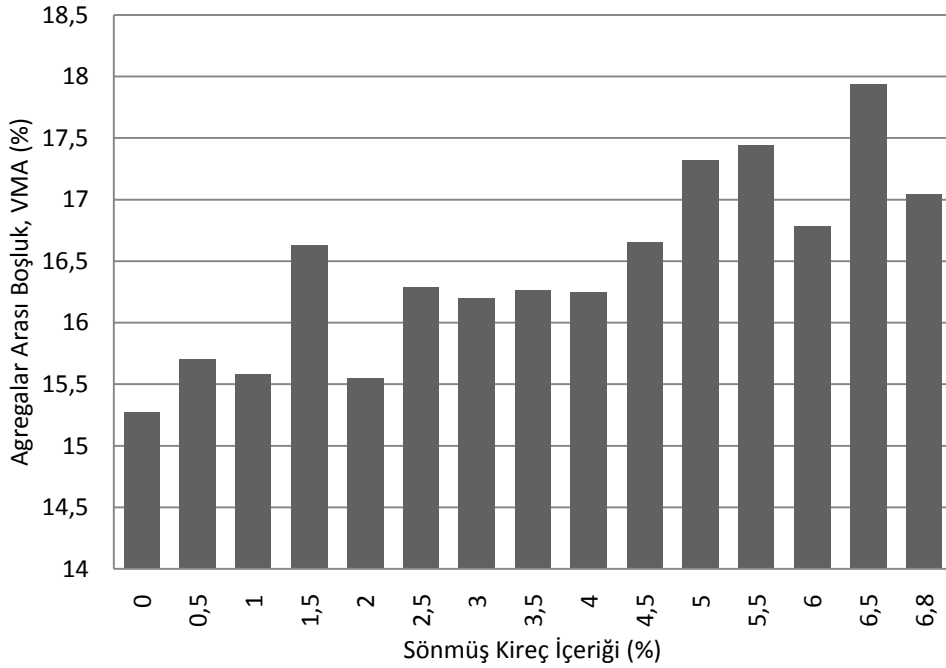
Şekil 3. 1 Sönmüş kireç içeriği ve zahiri özgül ağırlık arasındaki ilişki



Şekil 3. 2 Sönmüş kireç içeriği ve boşluk yüzdesi arasındaki ilişki



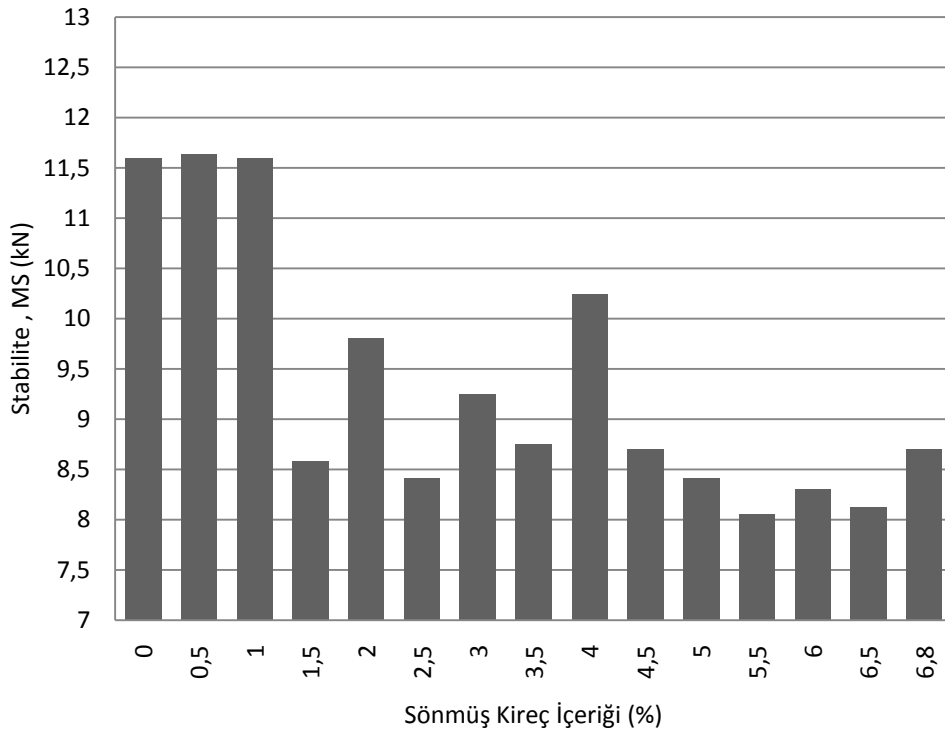
Şekil 3. 3 Sönmüş kireç içeriği ve VFA arasındaki ilişki



Şekil 3. 4 Sönmüş Kireç içeriği ve VMA arasındaki ilişki

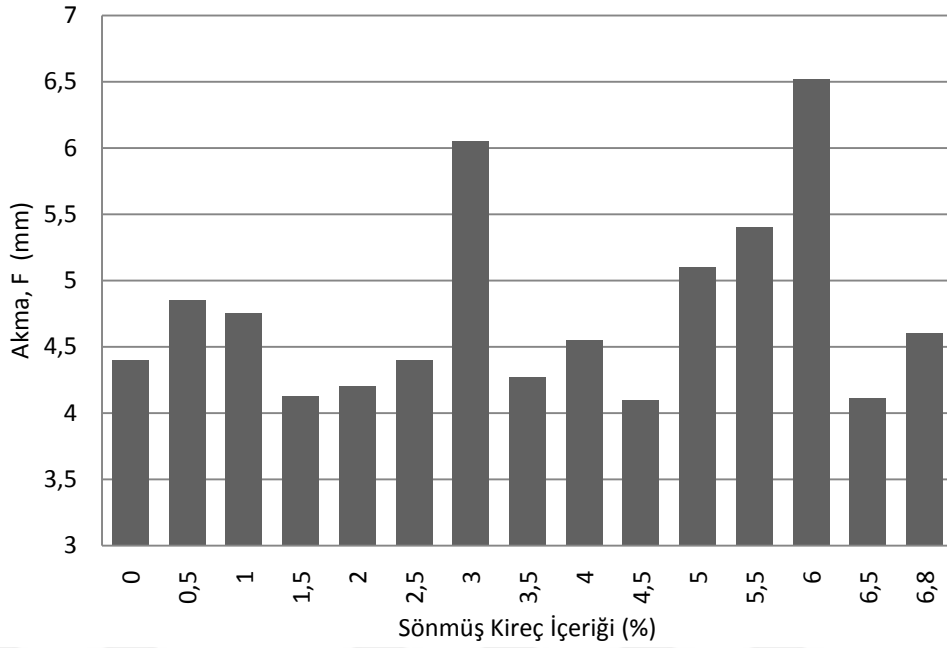
Sönmüş kireç içeriğinin, karışım stabilitesine etkisini gösteren grafik, Şekil 3.5’de verilmektedir. Karışımdaki sönmüş kireç içeriğinin artışı ile birlikte, stabilite değerlerinde genel olarak düşüş gözlenirken, %3-4,5 SK içeriğindeki karışımların stabilite değerleri, şartnamede belirtilen 9kN’luk sınır değerine çok yakın seyir etmiştir.

Numunelerdeki stabilite artışlarını SK'nın, mekanik olarak asfalt-agrega bağının kırılma riskini azaltmasıyla, olumlu bir etkiye neden olması şeklinde açıklamak mümkündür [23].



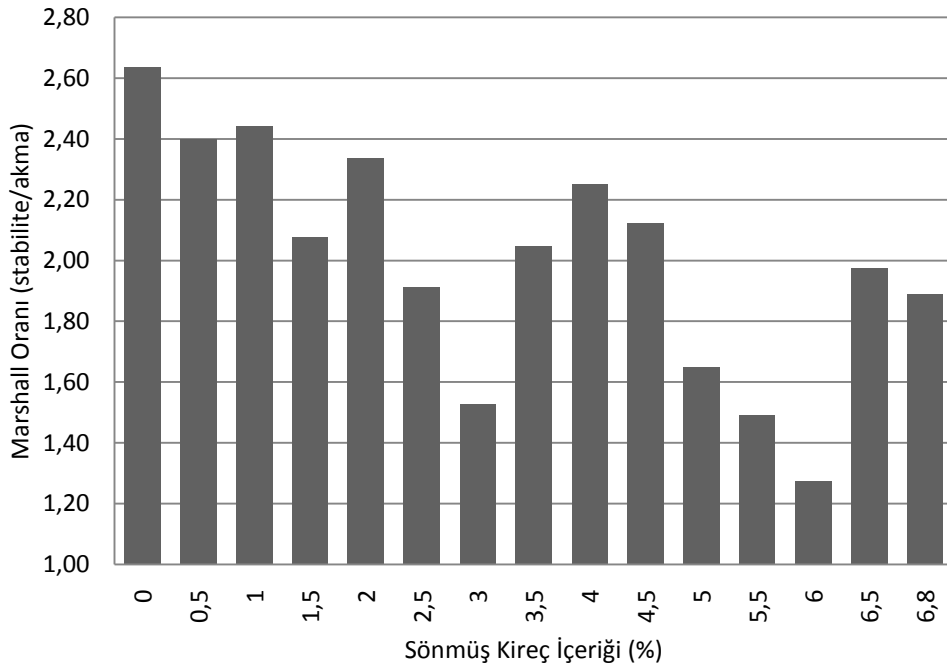
Şekil 3. 5 Sönmüş kireç içeriği ve stabilite arasındaki ilişki

Bilindiği gibi, akma, Marshall numunelerinin stabilitesine (kırıldığı yüke) karşılık gelen deformasyonu temsil etmektedir. Akmanın değeri, sıkıştırılmış karışımların iç sürtünmesinin bir ölçüsü olup; bu değerle iç sürtünme arasında doğrusal ters bir ilişki vardır. Şartnamelerde belirtilen en yüksek akma değeri, karışımın plastikliğini ve kullanılabilecek en fazla bağlayıcı yüzdesini; en alt değeri ise, karışımın gevrekliğini ve dayanıklılığını (durabilitesini) kontrol eder [8]. Şartnamede akma aralığı 2-4 mm olarak verilmektedir [126]. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, sönmüş kireç içeriğine bağlı akma değişimleri şartname sınırları içerisinde yer almamıştır. Sönmüş kirecin sahip olduğu boşluklu yapı sebebiyle, karışımlarda meydana gelen yüksek boşluk oranı değerleri, akmanın da standartların üzerinde seyir etmesine neden olmuştur. %2 ve %4 SK oranlarında, akma değeri en düşük seviyelere ulaşırken, %4,5 SK içerinden daha yüksek oranlarda sönmüş kireç kullanımının, karışımların akma değerlerini oldukça yüksek değerlere taşıdığını da söylemek mümkündür.



Şekil 3. 6 Sönmüş kireç içeriği ve akma arasındaki ilişki

Karışımın rijitliğinin ve deformasyon karşısındaki direncinin bir ölçüsü olarak kullanılan Marshall oranı (stabilite/akma oranı), üretilen asfalt briketlerinin deformasyon direncinin değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, Marshall oranı, sönmüş kireç içeriğindeki artışa bağlı olarak değişmektedir. %3 ve %6 SK oranları itibariyle yükselme eğilimi olmasına karşın genel eğilim, sönmüş kirecin boşluklu yapısından kaynaklı olarak azalma etkisi altındadır.



Şekil 3. 7 Sönmüş kireç içeriği ve Marshall oranı arasındaki ilişki

### 3.2 Elde Edilen Marshall Dizayn Sonuçları ile Marshall Hesap Sonuçlarının

#### Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında, Marshall Dizayn yöntemine göre üretilen numunelerin optimum bitüm içerikleri ve sönmüş kireç miktarına göre, Pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ), Akma (F), Stabilité (MS), Boşluk Oranı ( $V_h$ ), Asfaltla Dolu Boşluk Oranı (VFA) ve Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA) değerlerinin değişimleri bulunmuştur.

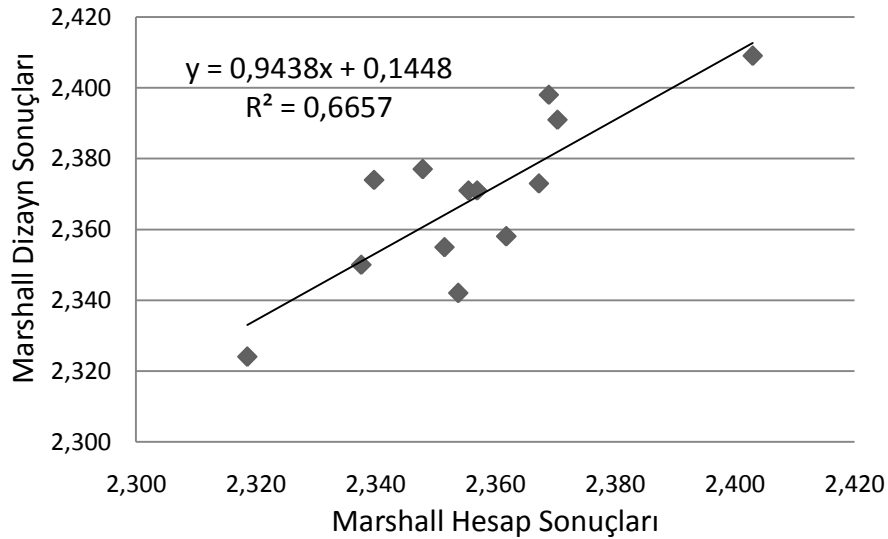
Optimum bitüm içeriğine göre her bir SK yüzdesi içeriğinden 3'er adet olmak üzere, 15 adet dizayndan meydana gelen, toplamda 45 adet numune üretilmiştir. Karışımların, Pratik Özgül Ağırlık, Boşluk oranı, Asfaltla Dolu Boşluk Oranı ve Agregalar arası boşluk oranı değerleri, numunelerin; yükseklik, sudaki ağırlık, havadaki ağırlık, suya doymun yüzey ağırlığı değerlerinden ve gerekli bağıntılardan (Eşitlik 2.1-2.10) faydalanarak elde edilmiştir (Çizelge 3.2). Karışımların akma ve stabilité değerleri ise, Marshall Test yöntemi sonucunda elde edilmiştir. Bağıntılardan elde edilerek bulunan bu sonuçlar, grafiklerde "Marshall Hesap Sonuçları" olarak, Marshall Test Metodu ile elde edilen ilk sonuçlar ( $15 \times 18 = 270$  adet numuneden) ise "Marshall Dizayn Sonuçları", şeklinde adlandırılarak gösterilmiştir.

Çizelge 3. 2 Marshall hesap sonuçları

| Marshall Dizayn No. | SK içeriği (%) | Optimum AC içeriği (%) | $D_p$         | VFA   | MS    | $V_h$ | F    | VMA   | Marshall Oranı (MS/F) |
|---------------------|----------------|------------------------|---------------|-------|-------|-------|------|-------|-----------------------|
|                     | (%)            | (%)                    | ( $gr/cm^3$ ) | (%)   | (kN)  | (%)   | mm   | (%)   |                       |
| 1                   | 0              | 5,2                    | 2,403         | 71,72 | 11,35 | 4,38  | 6,57 | 15,50 | 1,73                  |
| 2                   | 0,5            | 5,28                   | 2,369         | 66,64 | 9,79  | 5,57  | 4,73 | 16,70 | 2,07                  |
| 3                   | 1              | 5,25                   | 2,365         | 65,77 | 8,89  | 5,75  | 4,55 | 16,79 | 1,96                  |
| 4                   | 1,5            | 5,47                   | 2,356         | 66,78 | 8,33  | 5,70  | 3,99 | 17,17 | 2,09                  |
| 5                   | 2              | 5,35                   | 2,370         | 69,93 | 9,56  | 4,85  | 4,28 | 16,14 | 2,23                  |
| 6                   | 2,5            | 5,59                   | 2,367         | 70,94 | 8,63  | 4,82  | 3,84 | 16,60 | 2,24                  |
| 7                   | 3              | 5,38                   | 2,348         | 65,47 | 8,69  | 5,93  | 3,86 | 17,17 | 2,25                  |
| 8                   | 3,5            | 5,6                    | 2,340         | 66,35 | 7,43  | 5,91  | 4,03 | 17,57 | 1,84                  |
| 9                   | 4              | 5,39                   | 2,357         | 67,43 | 10,08 | 5,46  | 4,08 | 16,77 | 2,47                  |
| 10                  | 4,5            | 5,54                   | 2,352         | 68,51 | 9,76  | 5,33  | 5,28 | 16,92 | 1,85                  |
| 11                  | 5              | 6,16                   | 2,354         | 75,06 | 8,73  | 4,29  | 5,83 | 17,18 | 1,50                  |
| 12                  | 5,5            | 6,33                   | 2,362         | 76,99 | 8,17  | 3,97  | 4,54 | 17,27 | 1,80                  |
| 13                  | 6              | 6,23                   | 2,368         | 77,77 | 8,67  | 3,75  | 4,61 | 16,87 | 1,88                  |
| 14                  | 6,5            | 5,74                   | 2,319         | 65,08 | 8,12  | 6,36  | 3,88 | 18,20 | 2,09                  |
| 15                  | 6,8            | 6,1                    | 2,338         | 71,94 | 8,52  | 4,95  | 4,20 | 17,63 | 2,03                  |

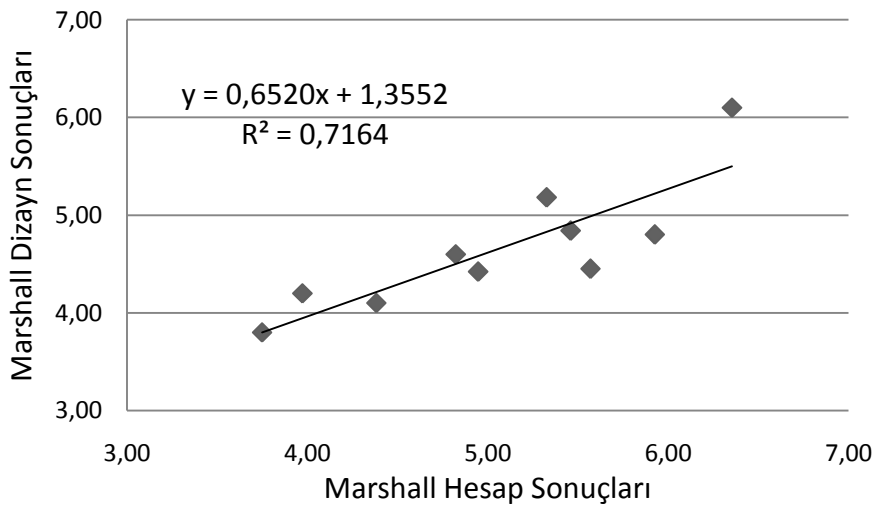
Çizelge 3.3'te verilen değerlerden koyu renge boyalı olanlar, genel eğilime çok aykırı olduklarından, deneysel hatalar sonucu elde edildikleri düşünülmüştür. Bu nedenle söz konusu verilen değerlendirmeye alınmadan karşılaştırmalar yapılmıştır.

Pratik özgül ağırlık ve sönmüş kireç içeriği değişimi arasındaki ilişkinin elde edildiği Marshall dizayn sonuçları ile Marshall hesap sonuçları grafiksel yöntemle karşılaştırıldığında, Şekil 3.8'de de görüldüğü gibi,  $R^2$  değeri, 0,6657 olarak bulunmuştur.



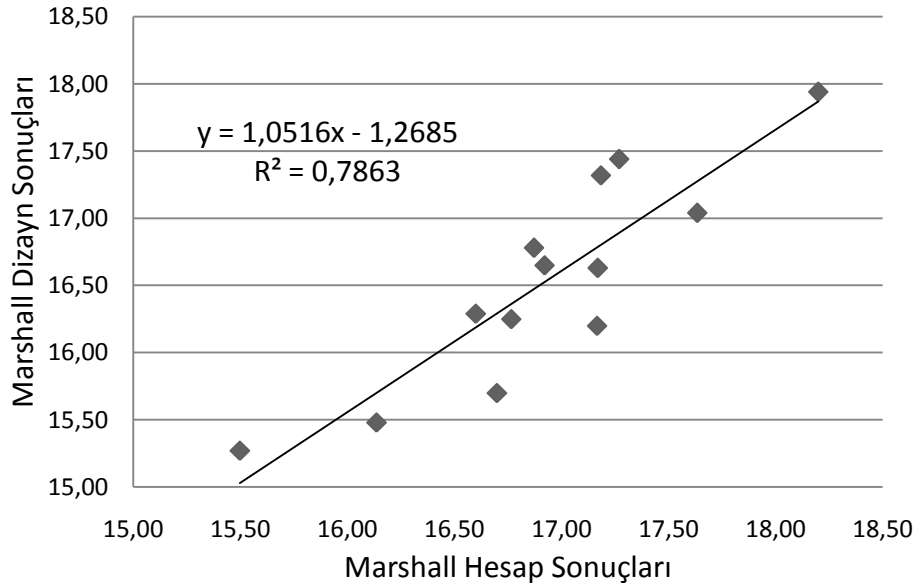
Şekil 3. 8 Pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ) - SK içeriği ilişkisi

Karışımındaki boşluk oranı ve sönmüş kireç içeriği arasındaki değişimi gösteren, Marshall hesap sonuçları ve Marshall dizayn sonuçları arasındaki grafiksel karşılaştırmada,  $R^2$  değerinin, Şekil 3.9'da görüldüğü gibi 0,7164 olarak elde edilmesiyle, kabul edilebilir bir korelasyon olduğu söylenebilir.



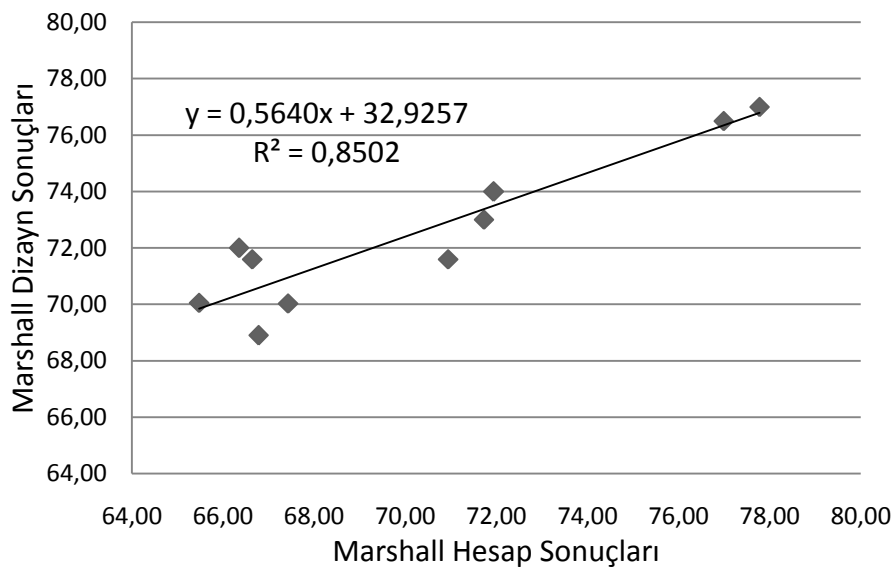
Şekil 3. 9 Boşluk oranı ( $V_h$ ) - SK içeriği ilişkisi

Agregalar arasındaki boşluk (VMA) ve sönmüş kireç içeriği arasındaki ilişkiyi ifade eden Marshall hesap sonuçları ve Marshall dizayn sonuçları grafiksel olarak karşılaştırıldığında  $R^2$  değerinin 0,7863 olarak bulunması ile kabul edilebilir sonuçlar ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 3.10).



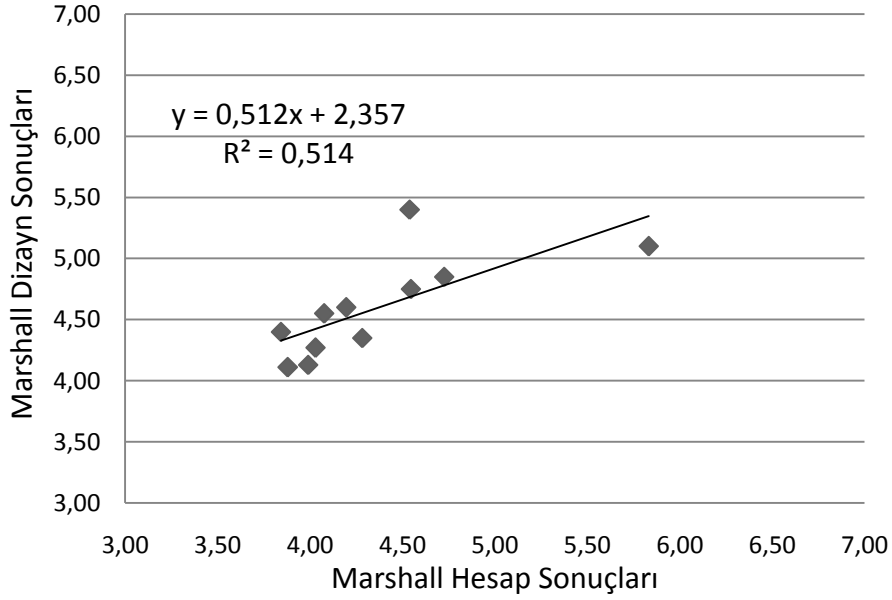
Şekil 3. 10 VMA - SK içeriği ilişkisi

Asfaltla dolu boşluk (VFA) ve sönmüş kireç miktarı arasındaki ilişkiyi ifade eden Marshall hesap sonuçları ve Marshall dizayn sonuçları arasındaki grafiksel karşılaştırmada,  $R^2$  değerinin 0,8502 olarak bulunması ile kabul edilebilir olduğunu söylenebilir (Şekil 3.11).



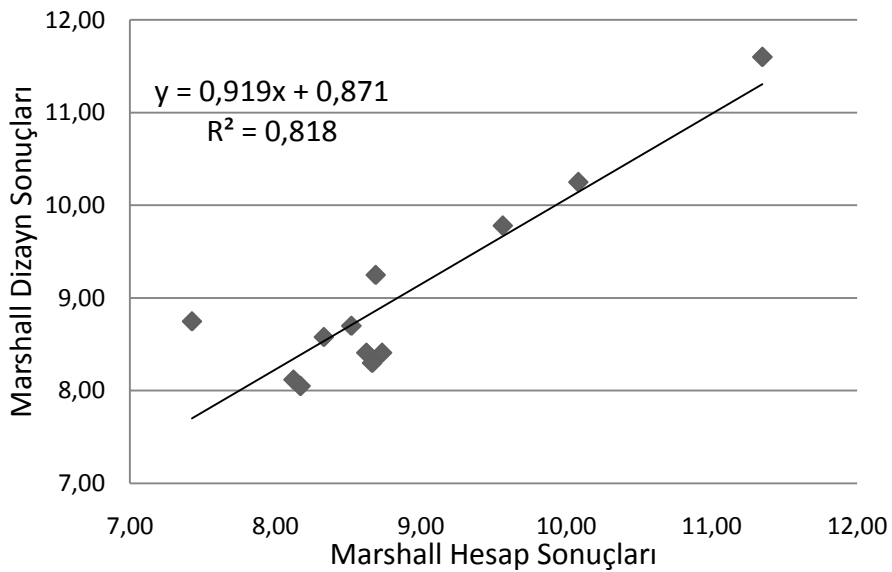
Şekil 3. 11 VFA - SK içeriği ilişkisi

Akma değeri ve sönmüş kireç içeriği arasındaki değişim, Marshall hesap sonuçları ve Marshall dizayn sonuçları arasındaki grafiksel karşılaştırmada,  $R^2$  değerinin 0,5144 olarak bulunması ile çok iyi olmamak ile birlikte kabul edilebilir olduğunu göstermektedir (Şekil 3.12).



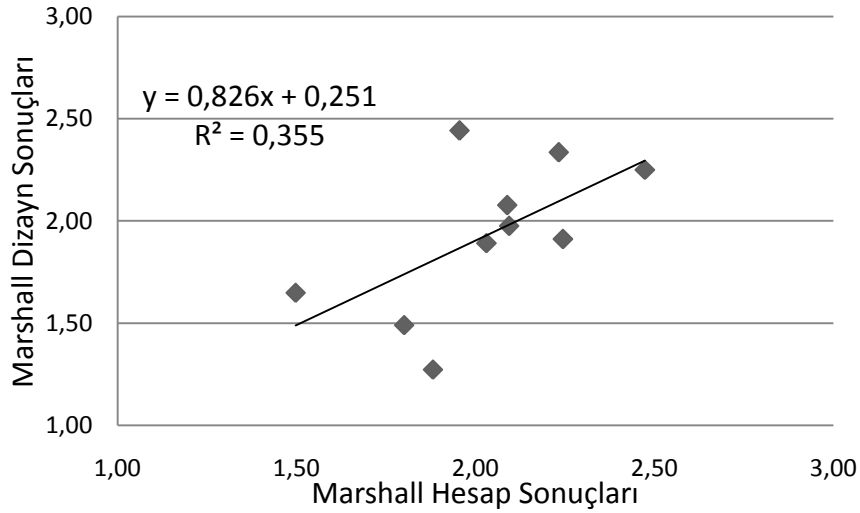
Şekil 3. 12 Akma (F)- SK içeriği ilişkisi

Stabilite ve sönmüş kireç içeriği arasındaki değişimi göstermek için elde edilen Marshall hesap sonuçları ve Marshall dizayn sonuçları grafiksel olarak karşılaştırıldığında,  $R^2$  değerinin 0,8181 olarak bulunması ile kabul edilebilir olduğunu göstermektedir (Şekil 3.13).



Şekil 3. 13 Stabilite - SK içeriği ilişkisi

Şekil 3.14'te de Marshall dizayn verilerine ve Marshall hesap verilerine ait Marshall oranı değerlerinin ilişkisi yer almaktadır.  $R^2$  değerinin düşük olması sebebiyle, bu ikilide iyi bir korelasyon elde edildiği söylenememektedir.

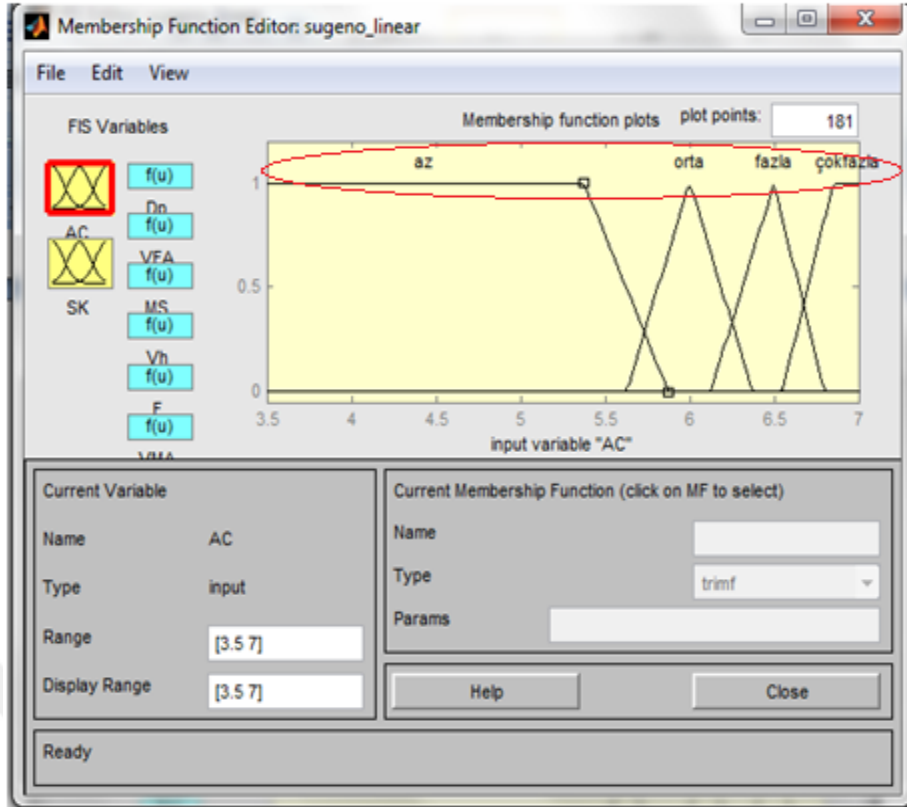


Şekil 3. 14 Marshall oranı - SK içeriği ilişkisi

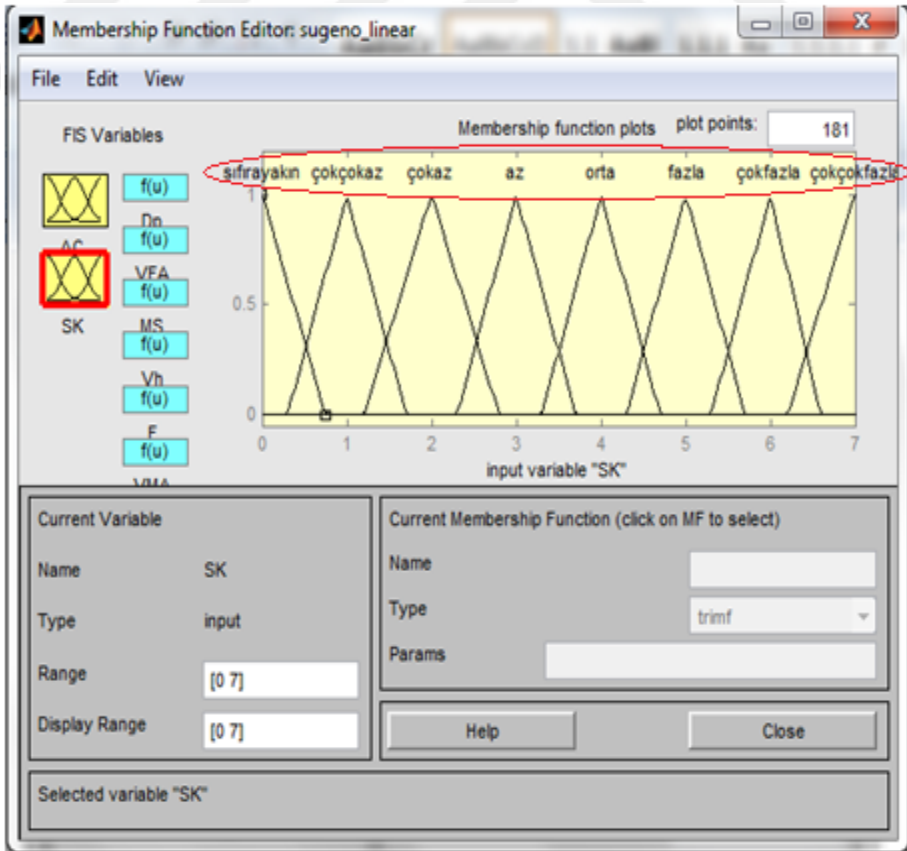
### 3.3 Bulanık Mantık Model Sonuçları

Bitümlü asfalt karışımlarında, sönmüş kireç kullanımını, yüksek hassasiyetli (%0-%6,8 SK aralığında) olarak incelemek amacıyla yapılan bu çalışmanın bir diğer kısmını da, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi oluşturmaktadır. Bu amaçla geliştirilen bulanık mantık modeli, Marshall dizayn sonuçlarının değerlendirilmesine ve Marshall hesap sonuçları ile uyumluluğunun karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır.

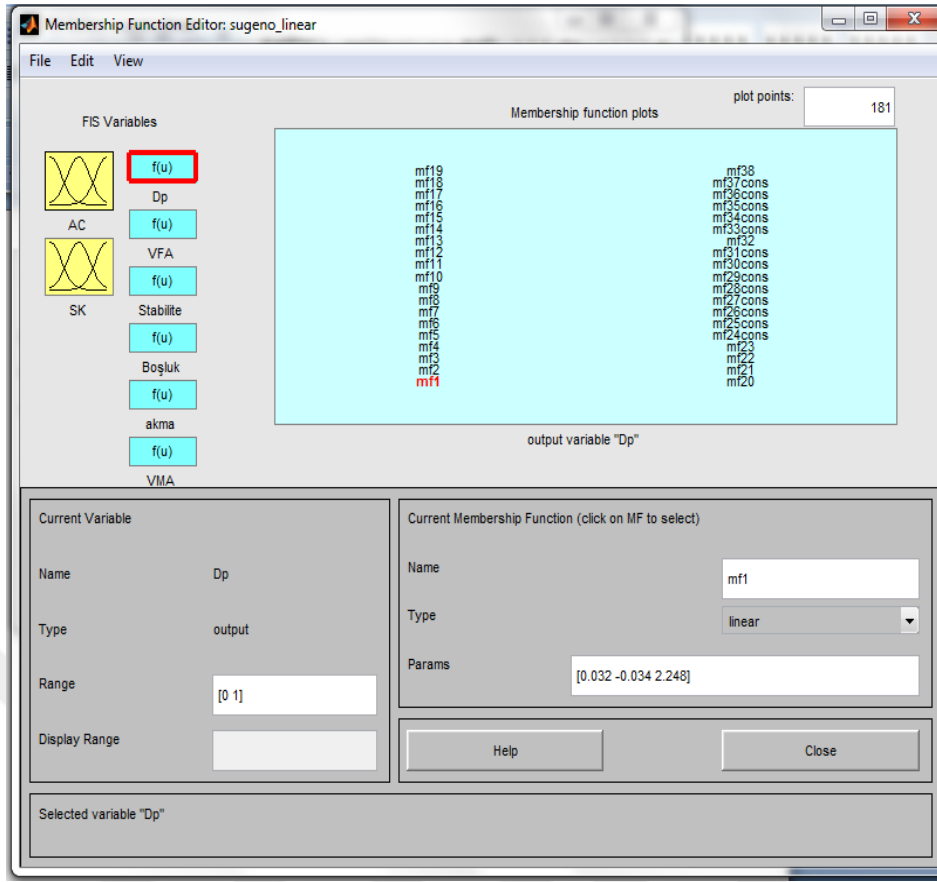
Daha önce de bahsedildiği gibi, model için kullanılan girdi parametreleri, bitüm oranı (%AC) ve sönmüş kireçtir (%SK). Çıktı parametreleri ise bitümlü karışımlara uygulanan Marshall deneyi sonucunda elde edilen, karışım özelliklerini yansıtan, pratik özgül ağırlık, boşluk oranı, akma, stabilite, asfaltla dolu boşluk oranı ve agregalar arası boşluk oranı değerleridir. Girdi parametrelerinden %AC, 4 kategoriye (Şekil 3.15), %SK ise 8 kategoriye (Şekil 3.16) bölünmüştür. Marshall dizayn sonuçları, belirlenen kategori cinsine ve üyelik fonksiyonu tipine göre MATLAB® programında “Fuzzy Logic Toolbox” kullanılarak, sisteme girilmiştir. Çıktı parametreleri ise, Sugeno tipi Bulanık Mantık modeli için, doğrusal olarak girilmiştir. Çıktı parametrelerine örnek olarak, MATLAB® programında “Fuzzy Logic Toolbox” ile elde edilen ekran görüntüsü Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3. 15 Girdi parametresi olarak bitüm oranı üyelik fonksiyonu



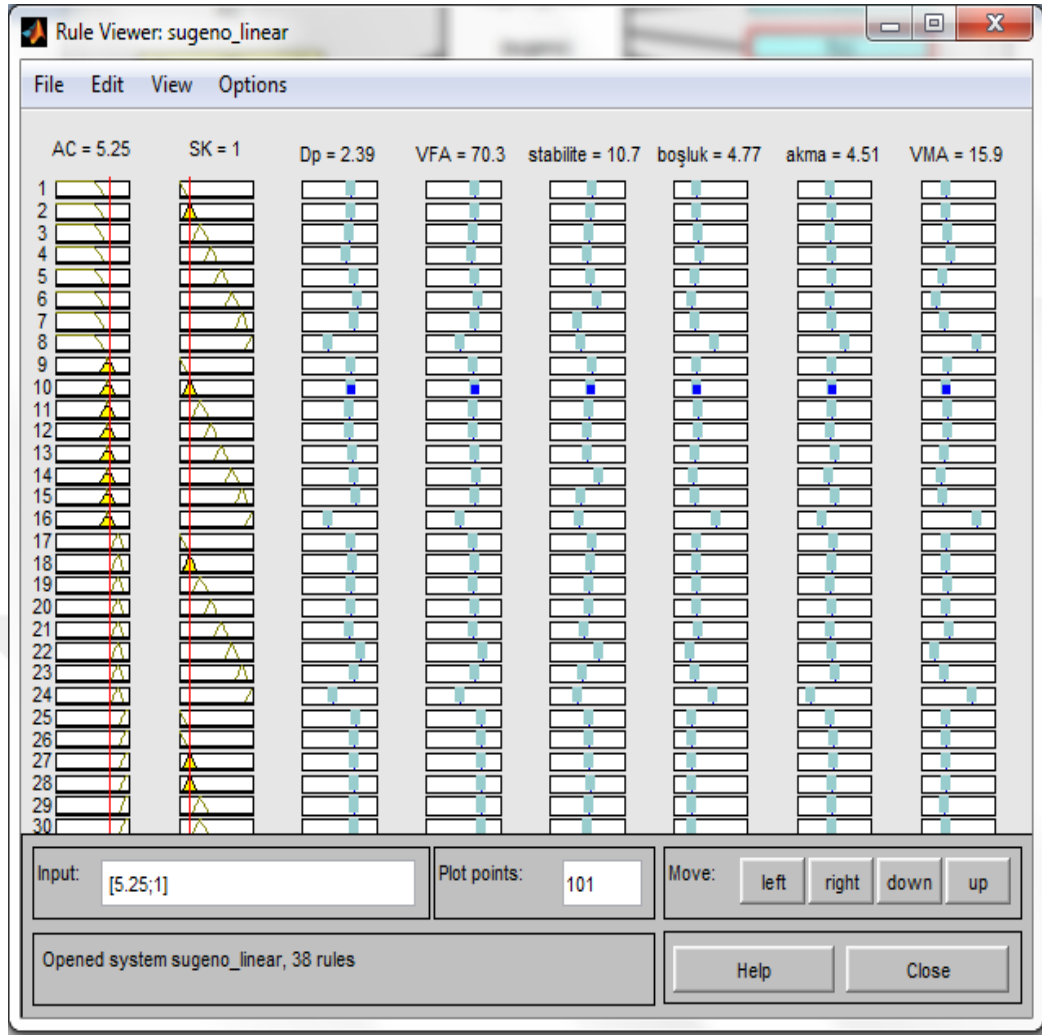
Şekil 3. 16 Girdi parametresi olarak sönmüş kireç oranı üyelik fonksiyonu



Şekil 3. 17 Çıktı parametrelerine ait üyelik fonksiyonları örneği

Daha sonra, girdi ve çıktı değerleri arasındaki ilişkileri kurabilmek için kurallar belirlenmiştir. Geliştirilen modelde girdi parametrelerinden sönmüş kireç, 8 kategoriye, bitüm oranı ise 4 kategoriye ayrıldığından,  $4 \times 8 = 32$  farklı kombinasyon meydana gelmektedir. Her farklı kombinasyondan da en az bir adet kural belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, sönmüş kireç ilavesinin karışım özelliklerine olan etkileri göz önünde bulundurularak geliştirilen bu bulanık mantık modeli için toplamda 38 adet kural belirlenmiştir.

Elde edilen modelin eğitimi için daha önce de bahsedilen Marshall dizayn sonuçları, modelin test edilmesi için ise Marshall dizayn sonuçlarından elde edilen optimum %AC değerleri ve her bir dizaynda kullanılan %SK değerleri kullanılmıştır. Geliştirilen Bulanık Mantık modeline ait, “MATLAB® Fuzzy Logic Toolbox” penceresinden bir ekran görüntüsü Şekil 3.18’de yer almaktadır. Modelin çıktı ekranında görüldüğü gibi, girdi parametreleri modele girilerek, elde edilen çıktı parametrelerinin tahmini gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. 18 Matlab programı kullanılarak elde edilen modelin ekran görüntüsü

Çizelge 3.3'te, Marshall dizayn sonuçlarından elde edilen optimum bitüm muhtevaları ve farklı sönmüş kireç oranları için, geliştirilen Bulanık Mantık Modeli'nin verdiği sonuçlar yer almaktadır. Bu sonuçlar, bundan sonra "Bulanık Dizayn Sonuçları" olarak anılacaktır.

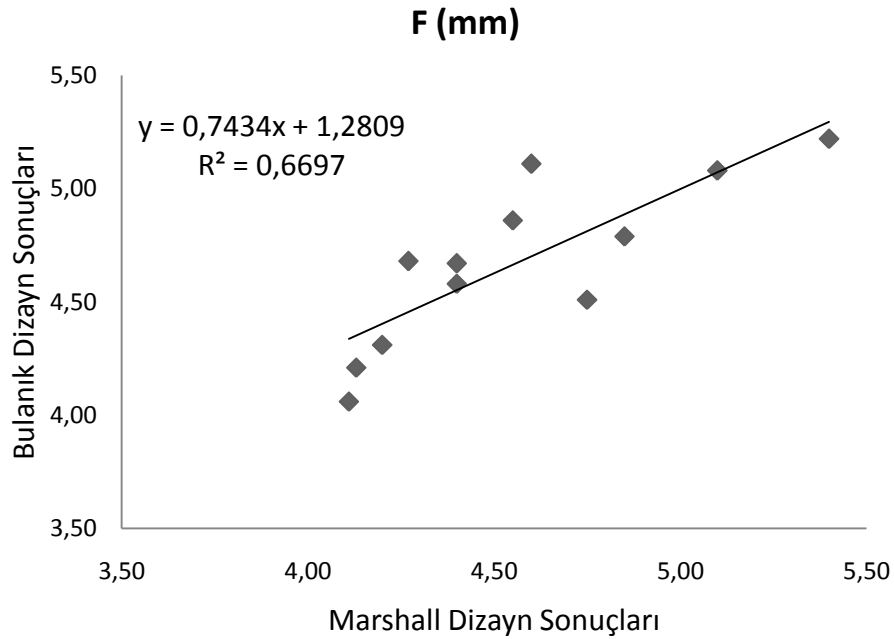
Bulanık dizayn sonuçlarına ait elde edilen değerlerin, Marshall deneyi sonuçları ile elde edilen değerlere yakın olması beklenen bir durumdur. Bu durum geliştirilen bulanık mantık modelinin, gerçek deney sonuçlarına olan yakınlığını göstermesi açısından oldukça önemlidir. Bu yakınlık, daha sonra, bulanık dizayn sonuçları ve Marshall hesap sonuçları arasındaki uyumluluğun da araştırılabilmesi için olanak sağlamaktadır. Yapılan ikili karşılaştırmalarda elde edilen grafiklere ait korelasyon katsayıları ve yüzde hata oranı değerleri, sonuçların birlikte değerlendirilebilmesi açısından da önemlidir.

Çizelge 3. 3 Bulanık dizayn sonuçları

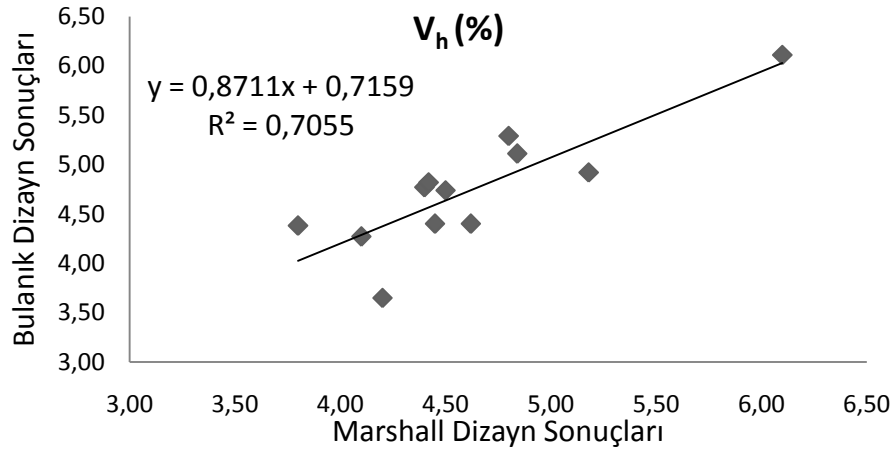
| Marshall<br>Dizayn<br>No. | SK<br>İçeriği<br>% | Optimum<br>AC içeriği<br>% | D <sub>p</sub><br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | VFA<br>(%) | MS<br>(kN) | Vh<br>(%) | F<br>mm | VMA<br>(%) |
|---------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------------------|------------|------------|-----------|---------|------------|
| 1                         | 0                  | 5,2                        | 2,41                                    | 72,10      | 11,00      | 4,27      | 4,67    | 15,40      |
| 2                         | 0,5                | 5,28                       | 2,40                                    | 71,90      | 11,90      | 4,40      | 4,79    | 15,70      |
| 3                         | 1                  | 5,25                       | 2,39                                    | 70,30      | 10,70      | 4,77      | 4,51    | 15,9       |
| 4                         | 1,5                | 5,47                       | 2,38                                    | 71,70      | 9,13       | 4,60      | 4,21    | 16,20      |
| 5                         | 2                  | 5,35                       | 2,37                                    | 68,10      | 8,89       | 5,04      | 4,31    | 16,30      |
| 6                         | 2,5                | 5,59                       | 2,38                                    | 72,90      | 8,76       | 4,40      | 4,58    | 16,20      |
| 7                         | 3                  | 5,38                       | 2,36                                    | 68,10      | 8,94       | 5,29      | 4,35    | 16,60      |
| 8                         | 3,5                | 5,6                        | 2,37                                    | 71,20      | 8,86       | 4,74      | 4,68    | 16,5       |
| 9                         | 4                  | 5,39                       | 2,36                                    | 68,90      | 9,46       | 5,11      | 4,86    | 16,50      |
| 10                        | 4,5                | 5,54                       | 2,36                                    | 70,40      | 9,59       | 4,92      | 4,84    | 16,60      |
| 11                        | 5                  | 6,16                       | 2,36                                    | 77,3       | 8,54       | 3,90      | 5,08    | 17,00      |
| 12                        | 5,5                | 6,33                       | 2,37                                    | 78,90      | 8,03       | 3,65      | 5,22    | 17,20      |
| 13                        | 6                  | 6,23                       | 2,35                                    | 75,00      | 7,53       | 4,38      | 4,84    | 17,60      |
| 14                        | 6,5                | 5,74                       | 2,33                                    | 66,00      | 7,89       | 6,11      | 4,06    | 18,00      |
| 15                        | 6,8                | 6,1                        | 2,34                                    | 72,30      | 8,23       | 4,82      | 5,11    | 17,50      |

### 3.3.1 Bulanık Dizayn Sonuçları ile Marshall Dizayn Sonuçları Karşılaştırması ve Bulanık Mantık Modelinin Doğrulanması

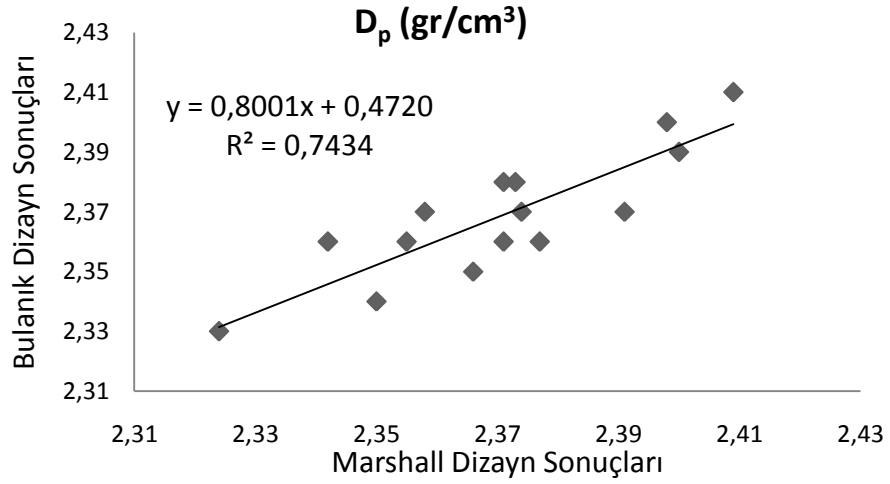
Geliştirilen bu modele, Marshall dizayn yöntemi ile elde edilen optimum bitüm değerleri ve %SK içerikleri girilerek, Bulanık dizayn- Marshall dizayn sonuçları arasındaki ilişkiyi veren sonuçlara ait grafikler de elde edilmiştir (Şekil 3.19 – Şekil 3.24).



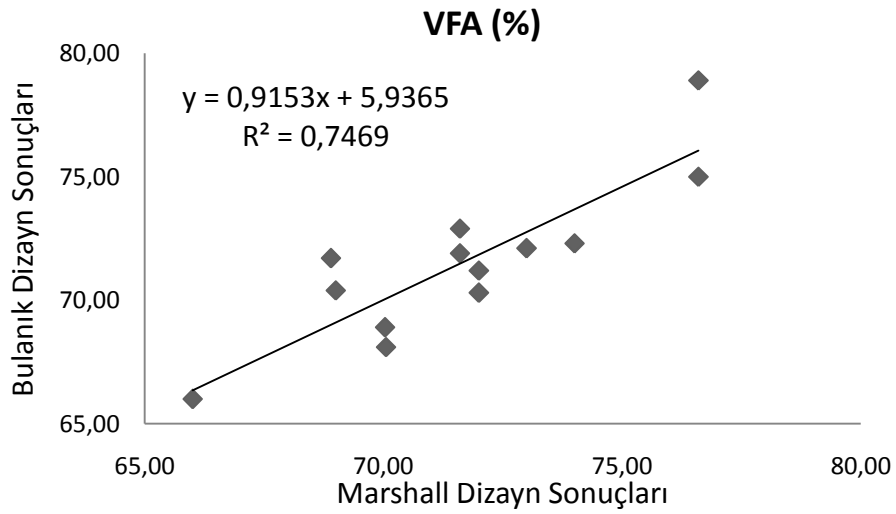
Şekil 3. 19 %SK- Akma (F) ilişkisi



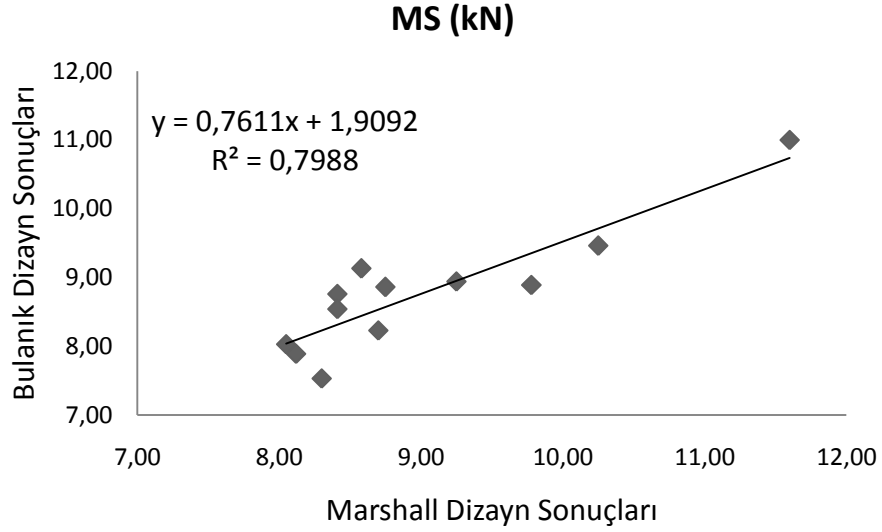
Şekil 3. 20 %SK- Boşluk Oranı (V<sub>h</sub>) İlişkisi



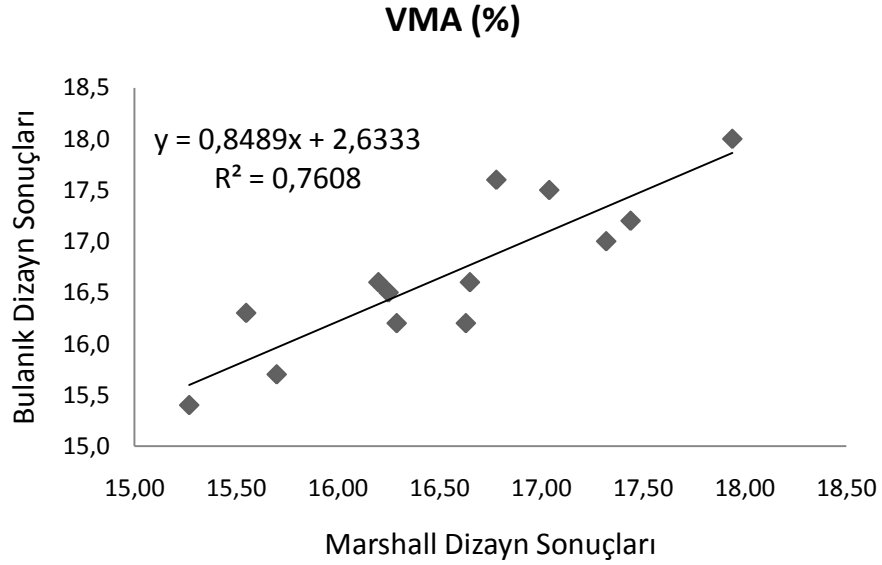
Şekil 3. 21 %SK- Pratik Özgöl Ağırlık (D<sub>p</sub>) İlişkisi



Şekil 3. 22 %SK- Asfaltla Dolu Boşluk (VFA) İlişkisi



Şekil 3. 23 %SK- Marshall Stabilitesi (MS) ilişkisi



Şekil 3. 24 %SK- Agregalar Arası Boşluk (VMA) ilişkisi

Bu grafikler incelendiğinde, geliştirilen bulanık mantık modelinin, eğitim için kullanılan veriler ile karşılaştırıldığından kabul edilebilir korelasyon katsayıları verdiği görülmektedir. Bulanık dizayn sonuçları ve Marshall dizayn sonuçları arasındaki en yüksek  $R^2$  değeri, Marshall stabilitesi için gözlemlenmiştir ve bu değer 0,7988 olarak bulunmuştur. Geliştirilen model ile elde edilen  $R^2$  değerleri ile birlikte modelin hata oranlarını da belirlemek gerekmektedir. Bu model için tüm değerlerin hata oranları Denklem 2.18 kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen “yüzde hata oranları”, Çizelge 3.4’te verilmiştir. Her bir çıktı değişkeni için maksimum hata yüzdeleri de aynı çizelgede yer almaktadır.

$$\text{Yüzde Hata} = \frac{|BDV - MHV|}{MHV} \times 100 \quad (2.18)$$

BDV: Bulanık dizayn verisi

MHV: Marshall dizayn verisi

Çizelge 3. 4 Çıktı değişkenleri için maksimum hata oranları

| Marshall<br>Dizayn No.       | D <sub>p</sub><br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | VFA<br>(%)  | MS<br>(kN)  | V <sub>h</sub><br>(%) | F<br>mm      | VMA<br>(%)  |
|------------------------------|-----------------------------------------|-------------|-------------|-----------------------|--------------|-------------|
| 1                            | 0,04                                    | 1,23        | 5,17        | 4,15                  | 6,14         | 0,85        |
| 2                            | 0,08                                    | 0,42        | #SAYI/0!    | 1,12                  | 1,24         | 0           |
| 3                            | 0,42                                    | 2,36        | #SAYI/0!    | 8,41                  | 5,05         | #SAYI/0!    |
| 4                            | 0,38                                    | <b>4,06</b> | 6,41        | #SAYI/0!              | 1,94         | 2,59        |
| 5                            | <b>0,88</b>                             | #SAYI/0!    | 9,1         | #SAYI/0!              | 2,62         | 4,82        |
| 6                            | 0,29                                    | 1,82        | 4,16        | 4,76                  | 4,09         | 0,55        |
| 7                            | 0,72                                    | 2,78        | 3,35        | 10,21                 | #SAYI/0!     | 2,47        |
| 8                            | 0,17                                    | 1,11        | 1,26        | 5,33                  | 9,6          | #SAYI/0!    |
| 9                            | 0,46                                    | 1,61        | 7,71        | 5,58                  | 6,81         | 1,54        |
| 10                           | 0,21                                    | 2,03        | #SAYI/0!    | 5,02                  | #SAYI/0!     | 0,3         |
| 11                           | 0,77                                    | #SAYI/0!    | 1,55        | #SAYI/0!              | 0,39         | 1,85        |
| 12                           | 0,51                                    | 3           | 0,25        | 13,1                  | 3,33         | 1,38        |
| 13                           | 0,68                                    | 2,09        | <b>9,28</b> | <b>15,26</b>          | #SAYI/0!     | <b>4,89</b> |
| 14                           | 0,26                                    | 0           | 2,83        | 0,16                  | 1,22         | 0,33        |
| 15                           | 0,43                                    | 2,3         | 5,4         | 9,05                  | <b>11,09</b> | 2,7         |
| <b>Maksimum<br/>Hata (%)</b> | <b>0,88</b>                             | <b>4,06</b> | <b>9,28</b> | <b>15,26</b>          | <b>11,09</b> | <b>4,89</b> |

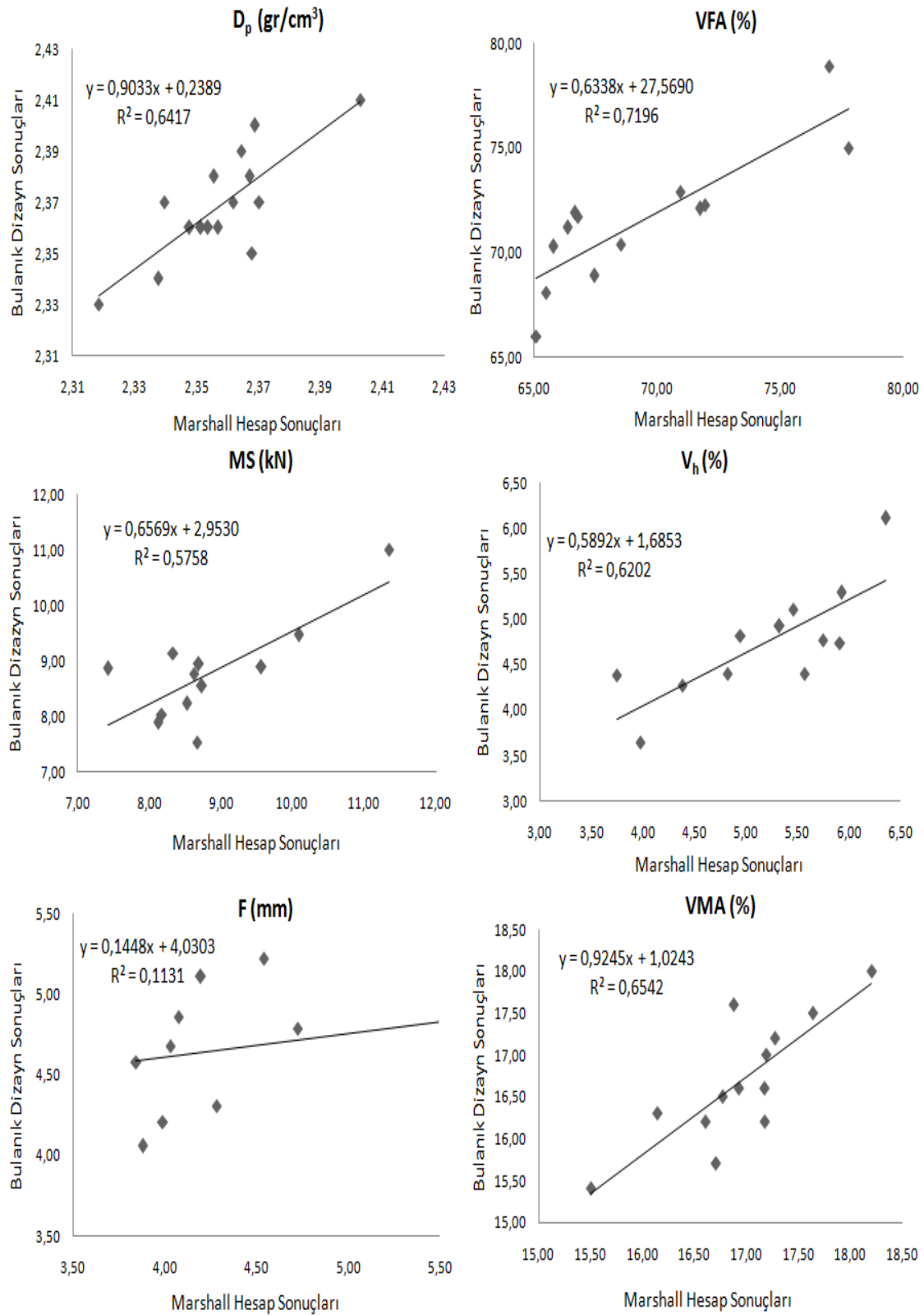
Genel eğilime aykırı bulunduğundan değerlendirmeye alınmayan verilere ait hata oranları, Çizelge 3.4'te yer alan ve koyu renk ile boyalı kısımlar ile işaretlenmiştir.

Model kullanılarak karışım parametreleri hesaplanmak istendiğinde, bu hata oranları değerlendirilmeli ve böylelikle şartname sınırları da göz önüne alınarak güvenli bölgede yer alan sonuçlar elde edilebilmektedir.

### 3.3.2 Bulanık Dizayn Sonuçları ile Marshall Hesap Sonuçları Karşılaştırması

Geliştirilen modele, Marshall dizayn yöntemi ile elde edilen optimum bitüm değerleri ve %SK içerikleri girilerek elde edilen Bulanık Dizayn Sonuçlarının, Marshall yönteminde kullanılan bağıntılarla elde edilmiş olan Marshall hesap sonuçları ile de uyumlu bir ilişki olup olmadığının kontrolü ise Şekil 3.25'te verilmektedir.

Görüldüğü gibi, genel olarak, bulanık dizayn sonuçları ve Marshall hesap sonuçları arasındaki korelasyon kabul edilebilir değerler (akma hariç) almıştır.



Şekil 3. 25 Bulanık dizayn sonuçları ile Marshall hesap sonuçları karşılaştırması

Tüm sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, Çizelge 3.5'te yer alan  $R^2$  değerleri gösteriyor ki; karışımların özelliklerini belirleyen parametreler olan pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ), boşluk oranı ( $V_h$ ), agregalar arası boşluk (VMA), asfaltla dolu boşluk (VFA), akma (F) ve stabilite (MS) değerlerinde en yüksek korelasyon katsayıları, Marshall dizayn sonuçları ve Marshall hesap sonuçları arasında bulunmuştur. Bu korelasyon katsayıları, bulanık dizayn sonuçları ve Marshall dizayn sonuçları arasında da yine kabul edilebilir değerler almaktadır. Ancak bu katsayılar, bulanık dizayn sonuçları ve Marshall hesap sonuçları arasında azalma göstermiştir. Özellikle akma değeri için, elde edilen düşük korelasyon göze çarpmaktadır.

Çizelge 3. 5 Tüm sonuçlara ait karşılaştırmaların korelasyon katsayıları

| Karşılaştırmalar          |                             | $R^2$  |        |        |        |        |        |
|---------------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           |                             | $D_p$  | $V_h$  | VMA    | VFA    | F      | MS     |
| Marshall Dizayn Sonuçları | — Marshall Hesap Sonuçları  | 0,6657 | 0,7164 | 0,7863 | 0,8502 | 0,5144 | 0,8181 |
| Bulanık Dizayn Sonuçları  | — Marshall Dizayn Sonuçları | 0,7434 | 0,7055 | 0,7608 | 0,7469 | 0,6697 | 0,7988 |
| Bulanık Dizayn Sonuçları  | — Marshall Hesap Sonuçları  | 0,6417 | 0,6202 | 0,6542 | 0,7196 | 0,1131 | 0,5758 |

Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları; kullanılan malzeme özelliklerinden, deney cihazlarından, deneyin yapıldığı koşullardan ve deneyin uygulayıcısından doğrudan etkilenmektedir. Bu gibi olumsuz nedenler sebebi ile elde edilen deney sonuçlarında da beklenmeyen durumlar meydana gelebilmektedir. Bu çalışmada, karışım özelliklerini belirleyen parametrelerden biri olan akma değerinin, beklenenden farklı sonuçlar vermesinin, bu olumsuzluklardan kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bitümlü sıcak asfalt karışımlarında kullanılan önemli katkı malzemelerinin arasında yer alan sönmüş kirecin, karışımda meydana getirdiği değişimleri gözlemlemek amacıyla yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Marshall dizayn yöntemi kullanılarak hazırlanan ve %5,2'lik optimum bitüm içeriğine sahip, SK katkısız geleneksel karışımda (kontrol karışımı); stabilite 11,60 kN, akma, 4,40 mm, karışımın pratik özgül ağırlığı  $2,409 \text{ gr/cm}^3$ , boşluk yüzdesi %4,10, agregalar arası boşluk yüzdesi %15,27, asfalt dolu boşluk yüzdesi %73,00, karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı  $2,513 \text{ gr/cm}^3$  olarak bulunmuştur. Bu değerler (akma hariç) şartname sınırları içerisinde kalmaktadır [126].
- Sönmüş kireç yoğunluğunun filler malzeme yoğunluğundan düşük olması sebebiyle, karışıma ilave edilen filler malzemesinin azaltılıp, yerine sönmüş kireç kullanılması durumunda, karışımın pratik özgül ağırlığının azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle %3,0-%3,5 SK kullanımından sonra ani düşüşler meydana gelmesi, sönmüş kireç etkisini daha belirgin hale getirmiştir.
- Sönmüş kirecin sahip olduğu boşluklu yapı sebebiyle, karışımda kullanımının arttırılması, deney yapım aşamasında da gözlemlendiği gibi, bitümün agregayı sarmasını oldukça zorlaştırmıştır. Buna bağlı olarak da karışımdaki sönmüş kireç oranı arttıkça, agregalar arası boşluk artarken, asfaltla dolu boşluk yüzdesi azalmıştır.
- Karışımdaki sönmüş kireç miktarı arttıkça, optimum bitüm içeriğinde artış gözlemlenmiştir. Bu durum sönmüş kirecin bitümü emmesi ve miktarının artışı ile

daha çok bitüm ihtiyacının ortaya çıkması ile gerçekleşmiştir.

- Bitümlü karışımdaki sönmüş kirecin belirli oranlarda (%3,0-%4,5) kullanımıyla, karışım özellikleri şartname sınırları içerisinde kalmıştır. Aynı şekilde, sönmüş kireç içeriğinin %3,0 ile %4,0 olduğu karışımlardaki akma değerleri de kabul edilebilir değerlerdir.

Elde edilen deney sonuçlarına ait grafikler incelendiğinde, akma değerinin, genel olarak, beklenen şartname sınırlarının dışında ortaya çıkması ve ikili karşılaştırma grafiklerinde, daha düşük korelasyon katsayısı elde edilmesi gibi olumsuz kabul edilebilecek sonuçlar verdiği görülmektedir. Akma değeri, deney koşullarından, deneyi yapandan, deney cihazlarından, malzeme ve karışımın iç fiziksel özelliklerinden çok büyük bir hassasiyetle etkilenmektedir. Bu faktörlerin bazılarına müdahale imkânı varken, bazılarına deneyin doğası gereği müdahale mümkün olmamaktadır. Bu çalışmada, karışım özelliklerini belirleyen parametrelerden biri olan akma değerinin, şartname sınırlarının dışında sonuçlar vermesinin, bu olumsuzluklardan da kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

Bilindiği gibi sönmüş kireç katkısı karışımların neme ve su etkilerine karşı hassasiyetini azaltmakta [23, 25, 30], karışımdaki moleküler yapıyı suya ilgi duymayan hale getirmektedir [3, 5, 6, 8]. Bu tez çalışması çerçevesinde, neme hassasiyeti ortaya koymak üzere, ayrıca, Marshall dizayn yöntemine göre tasarlanan numunelere bir koşullandırma işlemi uygulanmamıştır. Koşullandırma yapılarak, numunelerin suya doygun olarak Marshall testine tabi tutulması, özellikle stabilite ve akma değerlerindeki sönmüş kireç katkısının olumlu etkilerinin daha net bir biçimde gözlenmesi mümkün olacaktır.

Çalışma sonucunda, sönmüş kireç miktarındaki artış ile değişen optimum bitüm içeriklerine sahip numunelerin üretilmesi ve elde edilen verilerin kontrol edilebilmesi mümkün olmuştur. Yapılan Marshall dizayn sonuçları ve elde edilen Marshall hesap sonuçları arasındaki uyumluluğu gösteren korelasyonların yüksek çıkması, çalışmanın olumlu sonuçları arasında yer almaktadır. Çalışma sonucunda, bitümlü sıcak karışımlarda sönmüş kireç kullanımının, karışım parametrelerine (pratik özgül ağırlık, boşluk oranı, asfaltla dolu boşluk oranı, stabilite ve akma) etkileri belirlenmiştir.

Çalışmanın bir bölümünde de, elde edilen deneysel sonuçlara ait bulanık mantık modeli geliştirilmiştir. Karışımındaki filler miktarının azaltılarak, sönmüş kireç içeriğinin %0'dan %6,8'e yükseltilmesi ile elde edilen deneysel sonuçlar (Marshall dizayn sonuçları) bulanık mantık modelinin eğitim verileri olarak alınmıştır. Bu dizayn verilerinden elde edilen optimum bitüm içerikleri ve her bir dizaynda değişen SK içerikleri ise, modelin test edilmesinde kullanılmıştır. Model sonuçlarının, maksimum yüzde hatalar da göz önüne alınarak, kabul edilebilir tahminler yaptığı görülmüştür. Model ile Marshall hesap sonuçları arasında ise, kabul edilebilir olmak ile birlikte daha düşük korelasyon katsayıları elde edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmaların, bulanık mantık yöntemi ile modellenmesi sonucunda, bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan sönmüş kireç miktarının etkileri daha net bir şekilde ortaya koyulabilmektedir. Bu durumun, karışımlara ilave edilmesi gereken optimum miktarda sönmüş kireç değeri aralıklarının belirlenmesi açısından fikir verici etkisi bulunmaktadır.

Bu çalışma, sıcak asfalt karışımlarında sönmüş kireç etkisinin belirlenmesi için yapılması gereken araştırmaların bir ayağını oluşturmaktadır. Çalışmanın daha da geliştirilmesi için, benzer aralıklarda sönmüş kireç içeriğindeki numunelere, performans deneylerinin de yapılması gerekmektedir. Fakat, deneysel çalışmalar bitümlü sıcak karışımlardaki sönmüş kireç etkisi belirlemede oldukça fazla miktarda numune üretimini gerektirmektedir. Bu durum, performans deneylerinin uygulanabilmesi için oldukça fazla zaman ve malzeme ihtiyacı yaratmaktadır. Bulanık mantık yöntemi ile de desteklenerek elde edilen sonuçlarla, yapılacak performans deneylerinde kullanılması gereken ve sönmüş kireç etkilerini gözlemlemek için yeterli olacak %SK değerleri aralıklarının belirlenmesi sağlanmaktadır.

Literatürde SK ve diğer katkıların beraberce kullanıldığı çalışmaların varlığı bilinmektedir. Özellikle polimer katkı ve sönmüş kirecin beraber kullanıldığı durumlarda ve farklı sıcaklıklarda SK'nın küçük aralıklarla değişiminin incelenmesi yararlı olacaktır. Bu nedenle, bitümlü karışımlarda katkı malzemesi olarak sönmüş kireç kullanımı, daha geniş kapsamda incelenmek üzere, gelecekteki çalışmalarımız arasında yer alacaktır.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., (2001). Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT A. Ş., Yayın No:1, İstanbul.
- [2] Orhan, F., (2012). "Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları", Karayolları Genel Müdürlüğü, <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Baskanliklar/BaskanliklarTeknikArastirma/Yayinlar.aspx>, 06 Mart 2014.
- [3] NLA (National Lime Association), (2006). "Hydrated Lime: A Solution For High Performance Hot Mix Asphalt", Fact Sheet on Lime's Multifunctional Benefits in Asphalt, [http://www.lime.org/documents/publications/free\\_downloads/fact-asphalt.pdf](http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/fact-asphalt.pdf), 12 Ocak 2014.
- [4] Witczak, M.W. ve Bari, J., (2004). "Development of a Master Curve (E\*) Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures", Arizona State University Research Project, [http://www.lime.org/documents/publications/free\\_downloads/master-curve.pdf](http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/master-curve.pdf), 05 Aralık 2013.
- [5] EuLA (European Lime Association), (2011). "Hydrated Lime a Proven Additive for Durable Asphalt Pavements, Critical Literature Review", Report to the European Lime Association, December.
- [6] Petersen, J.C., Plancher H. ve Harnsbergen P.M., (1987). "Lime Treatment of Asphalt to Reduce Age Hardening and Improve Flow Properties", AAPT Proceedings, 56:632-653.
- [7] Epps, J. A., (1992), "Hydrated Lime Hot Mix" Presentation Manual, FHWA, AASHTO, NLA.
- [8] Aksoy, A. ve Ağar, E., (2002). "Yüksek Performanslı Bitümlü Sıcak Karışımlar İçin Sönmüş Kirecin Kullanımı", Balıkesir Üniversitesi IV. Mühendislik-Mimarlık Sempozyumu, 11-13 Eylül 2002, Balıkesir.
- [9] Little, D.N. ve Epps, J. A., (2001). "The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt", Draft report prepared for National Lime Association, Arlington.
- [10] Little, D. N., (1995), "Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime", National Lime Association, Bulletin 333.

- [11] Tebaldi, G., (2011). "Lime Mixing Techniques", Asfaltta Kireç Semineri, İsfalt, 20 April 2011, İstanbul.
- [12] Kavak, A., (2011). "Lime Stabilization in Turkey", Asfaltta Kireç Semineri, İsfalt, 20 April 2011, İstanbul.
- [13] Denayer, C., (2011). "Lime Stabilization", Asfaltta Kireç Semineri, İsfalt, 20 April 2011, İstanbul.
- [14] Izzo, R.P. ve Tahmoressi, M., (2007). "Use of the Hamburg Wheel-Tracking Device for Evaluating Moisture Susceptibility of Hot-Mix Asphalt", Transportation Research Record, 76-85.
- [15] Maldonado, R. ve Fee, D., (2008). "Bitumen modification with polyphosphoric acid", 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 21-23 May 2008, Denmark.
- [16] Sebaaly, P.E., Little, D.N., Hajj, E.Y. ve Bhasin, A., (2007). "Impact of lime and liquid antistrip agents on properties of Idaho hot-mix asphalt mixture", Transportation Research Record, 1998:65-67.
- [17] Huang, S., Robertson, R. E., Branthaver, J. F., ve Petersen, J. C., (2005). "Impact of lime modification of asphalt and freeze-thaw cycling on the asphalt-aggregate interaction and moisture resistance damage", Journal of Materials in Civil Engineering, 17(6):711-718.
- [18] Kennedy, T.W., (1984). Use of Hydrated Lime in Asphalt Paving Mixtures, Bulletin 325, National Lime Association, Virginia.
- [19] Kennedy, T.W., Turnham, N., Epps, J. A., Smoot, C.W., Young, F.M., Button, J.W. ve Zeigler, C. D., (1983). "Evaluation of methods for field applications of lime to asphalt concrete mixtures", AAPT Proceedings, 52:508-534.
- [20] Kennedy, T.W., Roberts, F.L. ve Lee, K.W., (1982). "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas freeze-thaw pedestal test", AAPT Proceedings, 51:327-341.
- [21] Jaskula, P. ve Judycki, J., (2005). "Evaluation of effectiveness of hydrated lime additive in protecting asphalt concrete against water and frost", The 6th International Conference on Environmental Engineering, 26-27 May 2005, Vilnius.
- [22] Sebaaly, P.E., Tohme, P., Hitti, E., Stansburry, K., ve Epps, J., (2003). "Asphalt Concrete Antistripping Techniques", South Dakota DOT Study Final Report, SD99-10, Pierre.
- [23] Berger, E. ve Huege, F., (2006). "The Use of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt" International Lime Association 11 th International Lime Congress, 17-18 May 2006, Prague.
- [24] Aschenbrener, T. ve N. Far., (1994). " Influence of Compaction Temperature and Anti-Stripping Treatment on the Results from the Hamburg Wheel-

- Tracking Device”, Report CDOT-DTDR-94-9, Colorado Department of Transportation, Colorado.
- [25] Görkem, Ç. ve Şengöz, B., (2009). “Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime”, *Construction and Building Materials*, 23(6):2227–2236.
  - [26] Abo-Qudais S. ve Al-Shweily H., (2007). “Effect of antistripping additives on environmental damage of bituminous mixtures”, *Building and Environment*, 42(8):2929–2938.
  - [27] Maupin G.W., (1995). “Effectiveness of antistripping additives in the field”, Virginia Department of Transportation, Report no. VTRC 96-R5, Richmond.
  - [28] Aschenbrener, T.B., (2002). “Results of Survey on Moisture Damage of Hot-Mix Asphalt Pavements”, Colorado Department of Transportation, Denver.
  - [29] Brûlé, B., Le Boulrot F. ve Simaillaud B., (1993). “Enrobés drainants: Optimisation de la composition des liants et des mastics”, 5th Eurobitume Congress, 16-18 June 1993, Stockholm.
  - [30] Johansson, L., (1995). “Influence of Hydrated Lime On Bitumen Hardening”, Licentiate Thesis, TRITA-IP FR 95-8, Royal Institute of Technology, Highway Engineering, Stockholm.
  - [31] Roberts, F. L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y. ve Kennedy, T.W., (1991). “Hot Mix Asphalt Materials, Mixture and Construction”, National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, Lanham.
  - [32] Arnold, T.S., Ranasinghe, M.R. ve Youtcheff J., (2006). “Determination of Lime in Hot-Mix Asphalt”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1962:113-120.
  - [33] Kim, Y., Lutif, J.S., Bhasin, A. ve Little, D.N., (2008). “Evaluation of Moisture Damage Mechanisms and Effects of Hydrated Lime in Asphalt Mixtures through Measurements of Mixture Component Properties and Performance Testing”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(10): 659-667.
  - [34] Prowell, B.D. ve Youtcheff, J., (2000). “Effect of Lime on Ignition Furnace Calibration”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1712:74-78.
  - [35] Cramer, P., Herz, G. ve Radenberg, M., (2001). “Kalhydrat: Eine Alternative zur Modifizierung des Bindemittels”, *TRB Asphalt Institute*, 36(6):17-25.
  - [36] McCann, M., ve Sebaaly, P.E., (2006). “Evaluating the performance of lime in hot mix asphalt mixtures”, *Airfield and Highway Pavements Specialty Conference*, 30 April-3 May 2006, New York.
  - [37] Hicks, R.G., (1991). “Moisture Damage in Asphalt Concrete”, *Synthesis of Highway Practice 175*, NCHRP Transportation Research Board, Washington.
  - [38] Cowsey, D.C. ve Wong, C.S., (1991). “Improvement of Bitumen Aggregate Adhesion by the Use of Additives”, *International Symposium Chemistry of Bitumen*, 5-8 June 1991, Rome.

- [39] Hanson, D.I., Graves, R.E. ve Brown, E.R., (1994). "Laboratory Evaluation of the Addition of Lime Treated Sand to Hot-Mix Asphalt", In Transportation Research Record, National Research Council, 1469:34–42.
- [40] Khattak, M.J. ve Kyatham, V., (2008). "Viscoelastic Behavior of Hydrated Lime-Modified Asphalt Matrix and Hot-Mix Asphalt Under Moisture Damage Conditions", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2057:64-74.
- [41] Tunnicliff, D.G., ve Root, R., (1982). "Antistripping additives in asphalt concrete: State-of-the-art", Asphalt Paving Technology, 51:265-297.
- [42] Youtcheff, J. ve Aurilio, V., (1997). "Moisture sensitivity of asphalt binders: Evaluation and modeling of the pneumatic adhesion test results", 42nd Annual Conf. of Canadian Technical Asphalt Association, Ottawa.
- [43] Cooley, L.A. Jr., Kandhal, P.S., Buchanan, M.S., Fee, F., ve Epps, A., (2000). "Loaded wheel testers in the United States: State of the practice" Transportation Research E-Circular No. EC016, National Research Council, Washington.
- [44] Shuler, S. ve Douglas, I., (1990). "Improving Durability Of Open-Graded Friction Courses", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1259, pp. 35-41.
- [45] Airey, G. D., Collop, A. C., Zoorob, S. E. ve Elliott, R. C., (2008), "The Influence of Aggregate, Filler and Bitumen on Asphalt Mixture Moisture Damage", Construction and Building Material, Vol. 22, pp. 2015-2022.
- [46] Radenberg, M., (1998), "Effect of Hydrated Lime Addition on the Deformation of Hot Mix Asphalt in the Wheel Tracking Test", paper presented at Lhoist HMA Symposium, Dusseldorf.
- [47] Lu, Q. ve Harvey, J.T., (2006). "Long-term effectiveness of antistripping additives: Laboratory evaluation", Transportation Research Record, 1970:14-24.
- [48] Çolak, K., (2006). Asfalt Kaplamalarda Sinerjetik Fayda Konusunun Anlaşılmasında Marshall Oranı Yaklaşımının Kullanılması, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- [49] Kök, B.V. ve Yılmaz, M., (2006). "The effects of using lime and styrene–butadiene–styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt", Construction and Building Materials, 23:1999-2006.
- [50] Al-Suhaibani, A.R., Al-Mudaiheem, J. ve Al-Fozan, F., (1992). "Effect of Filler Type and Content on Properties of Asphalt Concrete Mixes" In Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixtures Performance, SPT 1147: 107-130.
- [51] Dallas, N.L. ve Epps J.A., (2006). "The Benefits of Hydrated Lime In Hot Mix Asphalt", 2001 Updated By: Peter E. Sebaaly, Prepared for the National Lime Association.

- [52] Vanelstraete, A. ve Verhasselt, A., (1998). "Effects of Hydrated Lime on the Rheological Properties of Mastics Before and After Aging and on the Behavior and Construction Aging of Mastics", paper presented at Lhoist HMA Symposium, Dusseldorf.
- [53] Terrel, R.L. ve Wang, CK., (1971). "Early curing behaviour of cement modified asphalt emulsion mixtures", Proc. Association of Asphalt Paving Technologists, 40:108-125.
- [54] Schmidt, R.J., Santucci, L.E. ve Coyne, L.D., (1973). "Performance Characteristics of Cement-Modified Asphalt Emulsion Mixes", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 42:300-319.
- [55] Niazi, Y. Ve Jalili, M., (2009). "Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion", Construction and Building Materials, 23(3):1338-1343.
- [56] Lee, S., Seo, Y. ve Kim, Y.R., (2010). "Effect of Hydrated Lime on Dynamic Modulus of Asphalt-Aggregate Mixtures in the State of North Carolina", KSCE Journal of Civil Engineering, 16(6):829-837.
- [57] Rogge, D. F., Leahy, R. B. ve Blair, R., (1995). "Cold-In-Place (CIP) Recycling with Lime", Transportation Research Report 95-17, Transportation Research Institute, OR State University, Corvallis.
- [58] Cross, S. A., (1999). "Experimental Cold In-Place Recycling with Hydrated Lime", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1684, pp. 186-193.
- [59] Johannson, L., (1998). "Bitumen Aging and Hydrated Lime" Ph.D., Dissertation, Kungl Tekniska Högskolan, Royal Institute of Technology.
- [60] Sebaaly, P.E., Hitti, E. ve Weitzel, D., (2003). "Effectiveness of Lime in Hot-Mix Asphalt Pavements", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1832, pp.34-41.
- [61] Denayer, C., (2011). "Lime in the USA and Europe", Asfaltta Kireç Semineri, İsfalt, 20 April 2011, İstanbul.
- [62] Lesueur, D., ve Little, D.N., (1999). "Effect of Hydrated Lime on Rheology, Fracture, and Aging of Bitumen", In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1661:93-105.
- [63] Mohammad, L.N., Abadie, C., Gokmen, R. ve Pauppala, A.J., (2000). "Mechanistic Evaluation of Hydrated Lime in Hot-Mix Asphalts", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1723:26-36.
- [64] Aragão, F. T. S., Lee, L., Kim, Y. ve Karki, P., (2010). "Material-Specific Effects of Hydrated Lime on the Properties and Performance Behavior of Asphalt Mixtures and Asphaltic Pavements", Construction and Building Materials, 24(4):538-544.
- [65] Kennedy, T.W. ve Ping, W.V., (1991). "An evaluation of effectiveness of antistripping additives in protecting asphalt mixtures from moisture damage", Association of Asphalt Paving Technologist, 60(91):230.

- [66] Si, Z., Little, D.N. ve Lytton, R.L., (2002). "Effects of Inorganic and Polymer Filler on Tertiary Damage Development in Asphalt Mixtures", Journal of Materials in Civil Engineering, 14(2):164-172.
- [67] Huang, S.C., Petersen, J.C., Robertson, R.E. ve Branthaver, J.F., (2002). "The effect of hydrated lime on the long-term oxidative aging characteristics of asphalt", Transportation Research Record, 1810:17-24.
- [68] Shahrour, M.A. ve Saloukeh, B.G., (1992). "Effect of Quality and Quantity of Locally Produced Filler (Passing Sieve No. 200) on Asphaltic Mixtures in Dubai", In Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixtures Performance, SPT 1147:187-208.
- [69] Şengül, C. E., (2006). Asphalt Kaplamalarda Tekerlek İzinde Oturma ve Su Hasarı Problemlerinin Azaltılması İçin Sönmüş Kireç Kullanımı, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- [70] Tahmoressi, M., (2002). "Effects of Hydrated Lime on Hamburg Properties of Limestone Mixtures", Research Report, PaveTex Engineering and Testing.
- [71] Collins, R., Johnson, A., Yiping, W. ve Lai, J., (1997). "Evaluation of Moisture Susceptibility of Compacted Asphalt Mixtures", 76th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 12-16 January 1997, Washington.
- [72] Verhasselt, A. ve F. S. Choquet, (1993). "Comparing Field and Laboratory Aging of Bitumens on a Kinetic Basis", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1391, pp. 30-38.
- [73] Jones, G. M., (1997). "The Effect of Hydrated Lime on Asphalt in Bituminous Pavements", NLA Meeting, Utah DOT, May 22.
- [74] Kim, Y. R., Little, D. N. ve Song, I., (2003). "Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics" Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1832, pp. 1-8.
- [75] Recasens, R. M., Martinez, A., Jimenez, F. P. ve Bianchetto, H., (2005). "Effect of Filler on the Aging Potential of Asphalt Mixtures", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1901, pp. 10-17.
- [76] Martin, K. L., Davison, R.R. ve Glover, C.J., (1990). "Aging in Texas Roads and Test Sections", In Transportation Research Record 1269: 9-19.
- [77] Oliver, J. W. H., (1995). "Results of Road Trials of Two Asphalt Antioxidants", In Transportation Research Record, 1488: 96-102.
- [78] Wisneski, M.L., Chaffin, J.M., Davison, R.R., Bullin, J.A. ve Glover, C.J., (1996). "Use of Lime in Recycling Asphalt", In Transportation Research Record, 1535:117-123.
- [79] Bullin, J.A., Davison, R.R., Glover, C.J., Chaffin, J., Meng, L. ve Madrid, R., (1997), Development of Superior Asphalt Recycling Agents, <http://infohouse.p2ric.org/ref/15/14148.pdf>, 05 Aralık 2013.

- [80] Johansson, L.S., ve Isacsson, U., (1996). "Influence of Testing Conditions on the Capacity of Hydrated Lime to Inhibit Bitumen Aging", Division of Highway Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [81] Elder, A.C., Hatting, M.M., Servas, V.P. ve Marais C.P., (1985). "Use of Aging Tests to Determine the Efficiency of Hydrated Lime Additions to Asphalt in Retarding Its Oxidative Hardening", Association of Asphalt Paving Technologists, 54:118-139.
- [82] Branthaver, J.R., Petersen, J.C., Robertson, R.E., Duvall, J.J., Kim, S.S., Harnsberger, P.M., Mill, T., Ensley, E.K., Barbour, F.A. ve Schabron, J.R., (1993), Binder Characterization and Evaluation, <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-368.pdf>, 05 Aralık 2013.
- [83] Traxler, R.N. ve Scrivner, H., (1971). "Hardening of Asphalts by Actinic Light. American Chemical Society", Division of Petroleum Chemistry, 16(1):102-110.
- [84] Rodriguez, M.G., Morrison, G.R., Van Loon, J.R. ve Hesp, S.A.M., (1995). "Low-Temperature Failure in Particulate-Filled Asphalt Binders and Asphalt Concrete Mixes", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 69:159-187.
- [85] Lesueur, D., Dekker, D.L. ve Planche J.P., (1995). "Comparison of Carbon Black from Pyrolyzed Tires to Other Fillers as Asphalt Rheology Modifiers", In Transportation Research Record, 1515:47-55.
- [86] Anderson, D.A., Christiansen, D.W., Bahia, H.U., Dongre, R., Sharma, M.G., Antle, C.E. ve Button J., (1993). "Binder Characterization and Evaluation", SHRP Project A-002A Final Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington.
- [87] Craus, J., Ishai, I. ve Sides, A., (1978). "Some Physico-Chemical Aspects of the Effect and the Role of the Filler in Bituminous Paving Mixtures", Association of Asphalt Paving Technologists, 47:558-588.
- [88] Bahia, H.U., Anderson, D.A. ve Christensen, D.W., (1992). "The Bending Beam Rheometer: A Simple Device for Measuring Low-Temperature Rheology of Asphalt Binders" Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 61:117-148.
- [89] Plancher, H., Green, E.L. ve Petersen, J.C., (1976). "Reduction of Oxidative Hardening of Asphalts by Treatment with Hydrated Lime—A Mechanic Study", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 45:1-24.
- [90] Johansson, L., Branthaver, J.F. ve Robertson, R.E., (1995). "A Study of Rheological Properties of Lime Treated Paving Asphalts Aged at 60°C in a Pressure Aging Vessel" Fuel Science and Technology, 13(10):1317-1343.
- [91] Sebaaly, P. E., Hajj, E., Little, D., Shivakolunthar, S., Sathanathan, T. ve Vasconcelos, K., (2010). "Evaluating The Impact of Lime on Pavement Performance", Final report, National Lime Association, [www.nationallime.org/publications/Asphalt-Report.pdf](http://www.nationallime.org/publications/Asphalt-Report.pdf), 07 Aralık 2013.

- [92] Cheng, D.X., Little, D.N., Lytton, R.L. ve Holste, J.C., (2003). "Moisture Damage Evaluation of Asphalt Mixture by Considering Both Moisture Diffusion and Repeated Load Conditions", Transportation Research Board: National Research Council, 1832:42-49.
- [93] Hicks, R.G. ve Todd, V.S., (2001), Life Cycle Costs for Lime in Hot Mix Asphalt, [http://www.lime.org/documents/publications/free\\_downloads/lcca\\_vol-2.pdf](http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/lcca_vol-2.pdf), 05 Aralık 2013.
- [94] Dallas, N.L., Bryan, T., Robin, E.G., Henderson, N. ve Fred, R.H., (2000). "Hydrated lime added directly to asphalt cement as a multi-functional modifier for asphalt mixtures", Chemical Lime Company, Fort Worth, Colleyville.
- [95] NLA (National Lime Association), (2003). "How to Add Hydrated Lime to Hot Mix Asphalt", [http://www.lime.org/documents/publications/free\\_downloads/how-to-add-lime.pdf](http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/how-to-add-lime.pdf), 13 Mart 2014.
- [96] Little, D. N., (1996). "Hydrated Lime as a Multi-Functional Modifier for Asphalt Mixtures", Presented at the HMA in Europe Lhoist Symposium, Brussels, Belgium.
- [97] Diab, A., You, Z., Othman, A. ve Ahmed, H., (2012). "Effect of Hydrated Lime Application Method on Mechanical and Fatigue Properties of HMA", ASCE, CICTP 2012, 3-6 August 2012, Beijing.
- [98] Kim, Y.R. ve Little D.N., (2004). "Linear Viscoelastic Analysis of Asphalt mastics", J. Materials in Civil Engineering, 16(2):122-132.
- [99] Bari, J. ve Witczak, M.W., (2005). "Evaluation of the Effect of Lime Modification on the Dynamic Modulus Stiffness of Hot-Mix Asphalt Use with the New Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide," Transportation Research Record No. 1929, pp. 10-19.
- [100] Mohammad, L.N, Saadeh, S., Kabir, M., Othman, A. ve Cooper, S., (2008). "Mechanistic Properties of Hot-Mix Asphalt Mixtures Containing Hydrated Lime", Transportation Research Record:2051, 49-63.
- [101] Hafeez, I., Kamal M.A., Ahadi M.R. ve Msawil M.J., (2011). "Effects of Hydrated Lime on Fatigue and Rutting Behavior of HMA Mixtures in Dynamic Modulus Testing", Transportation Research Journal 1(1): 23-34.
- [102] Do, H.S., Mun P.H. ve Keun R.S., (2008). "A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime", Waste Management 28:191-199.
- [103] Huang, S.C., Miknis, F.P., Schuster W., Salmans S., Farrar M. ve Boysen R., (2011). "Rheological and Chemical Properties of Hydrated Lime and Polyphosphoric Acid-Modified Asphalts with Long-Term Aging", Journal Of Materials In Civil Engineering, 23:628-637.

- [104] Cheng, J., Shen, J. ve Xiao, F., (2011). "Moisture Susceptibility of Warm-Mix Asphalt Mixtures Containing Nanosized Hydrated Lime", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 23:1552-1559.
- [105] Nejad, F.M., Hamed H. ve Azarhoosh A.R., (2013). "Use of Surface Free Energy Method to Evaluate Effect of Hydrate Lime on Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 25(5):1119-1126.
- [106] Lee, S., Mun, S. ve Kim, Y.R., (2011). "Fatigue and rutting performance of lime-modified hot-mix asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 25:4202-4209.
- [107] Punith, V.S., Xiao, F. ve Amirkhanian S.N., (2012). "Effects of Lime Content on Moisture Susceptibility of Rubberized Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Warm Mix Additives in Terms of Statistical Analysis", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 24(12):1431-1440.
- [108] Hajj, E.Y., Sebaaly, P.E., Sathanathan, T. ve Shivakolunthar, S., (2013). "Impact of Antistrip Additives on Pavement Performance Using Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 25(3):308-317.
- [109] Özen, H., (2010). "Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples", *Construction and Building Materials*, 25:756-765.
- [110] Shidhore, A.V., (2005). "Use of Lime as Anti-Strip Additive for Mitigating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes Containing Baghouse Fines", Degree of Master of Science, North Carolina State University, North Carolina.
- [111] Little, D.L. ve Petersen J.C., (2005). "Unique Effects of Hydrated Lime Filler on the Performance- Related Properties of Asphalt Cements: Physical and Chemical Interactions Revisited", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 17(2):207-218.
- [112] Xiao, F., Zhao, W., Gandhi, T. Ve Amirkhanian S.N., (2010). "Influence of Antistripping Additives on Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt Mixtures", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 22(10):1047-1055.
- [113] Şengül, C.E., Aksoy, A., İskender, E. ve Özen, H., (2011). "Hydrated lime treatment of asphalt concrete to increase permanent deformation resistance", *Construction and Building Materials*, 30:139-148.
- [114] Yardım, M.S. ve Balcı, U., (2011). "The Effect Of Hydrated Lime On The Marshall Stability For A Specific Amount Of Asphalt Content In The Hot Mix Asphalt, 9th International Fracture Conference, 19-21 October 2011, İstanbul.
- [115] ASTM 1559-089, (1989). Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, ASTM, Pennsylvania.
- [116] TS 3720, (2010). Bitümlü Karışımlar - Asfalt Betonu - Karışım Tasarımı Hesap Esasları - Marshall Yöntemi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

- [117] Çobanoğlu, B., (2000). "Bulanık Mantık ve Bulanık Küme Teorisi", Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Niksar Meslek Yüksek Okulu, <http://cobanoglu.wikispaces.com/file/view/bulanikmantik.pdf/34074869/bulanikmantik.pdf>, 15 Şubat 2014.
- [118] Özgan, E. vd., (2009). "Asfalt Betonunda Marshall Stabilitesinin Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Mantık Yaklaşımı ile Tahmini". 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), 13- 15 May 2009, Karabük.
- [119] Morova, N. Vd., (2011). "Bitüm Miktarının Asfalt Betonu Dayanımına Etkisinin Bulanık Mantık Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi". 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ.
- [120] Serin, S. vd., (2013). "The Fuzzy Logic Model for the Prediction of Marshall Stability of Lightweight Asphalt Concretes Fabricated using Expanded Clay Aggregate", Suleyman Demirel University, Journal of Natural and Applied Science, 17(1):163-172.
- [121] Zarif, İ.H., Tuğrul, A. ve Dursun, G., (2003). "İstanbul'daki Kireçtaşlarının Agrega Kalitesi Yönünden Değerlendirilmesi", İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, 16(2):61-70.
- [122] ASTM C136, (2006). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM, Pennsylvania.
- [123] ASTM C117, (2013). Standard Test Method for Materials Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, ASTM, Pennsylvania.
- [124] Özen, H., (2005). "Ulaştırma Laboratuvar Deneyleri", Yıldız Teknik Üniversitesi Basım- Yayın Merkezi, İN.İNİM-05.002, İstanbul.
- [125] TS EN 933-2, (1996). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler kısım 2: Tane boyutu dağılım tayini-Deney elekleri, elek göz açıklıklarını anma büyüklükleri, TSE, Ankara.
- [126] KGM, (2006). Karayolu Teknik Şartnamesi-2006, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yayın No:267, Ankara.
- [127] ASTM C 127-07, (2007). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM, United States.
- [128] TS EN 1097-6, (2006). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğuve su emme oranının tayini, TSE, Ankara.
- [129] ASTM C 128-07a, (2007). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM, Pennsylvania.
- [130] ASTM D 854-06, (2006). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania.
- [131] Arslan, F. (2014). "Taş Mastik Asfalt Karışımlarda İstanbul Çevresindeki Cebeci-Dolamitli Kireçtaşı, Gölcük-Kumtaşı ve Karatepe-Bazaltı Kullanımının İncelenmesi", YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- [132] ASTM D 70, (2009). Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method), ASTM, Pennsylvania.
- [133] ASTM D 92/12b, (2012). Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester, ASTM, Pennsylvania.
- [134] ASTM D 5/ D5M-13, (2013). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, ASTM, Pennsylvania.
- [135] ASTM D 113-07, (2007). Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials, ASTM, Pennsylvania.
- [136] ASTM D 1754, (2009). Standard Test Method for Effects of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test), ASTM, Pennsylvania.
- [137] ASTM D 36-09, (2009). Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)
- [138] TS EN 459-1, (2005), Yapı Kireci - Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- [139] Kılıç, O., ve Anıl, M., (2006), "Kireç Söndürme Şartlarının Söndürülmüş Kireç Kalitesine Etkisi", Madencilik TMMOB Maden Müh. Odası Dergisi, 45(1):15-22.
- [140] TS 32 EN 459-2, (2005), Yapı Kireci - Bölüm 2: Deney Metotları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- [141] Rigden, P.J., (1947). "The use of fillers in bituminous road surfacings. A study of filler binder systems in relation to filler characteristics", J. Soc. Chem. Industry, 66:299-309.
- [142] Grabowski, W., Wilanowicz, J. ve Sobol, T., (2009). "Structural and functional properties of mineral fillers modified with hydrated lime", Proc. 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6), 08-10 July 2009, Torino.
- [143] Voskuilen, J.L.M. ve Molenaar, J.M.M., (1996). "Adsorption and desorption of bitumen in toluene on mineral aggregate", Proc. 1st Eurasphalt & Eurobitume Congress, 07-10 May 1996, Strasbourg.
- [144] Vansteenkiste, S. ve Vanelstraete, A., (2008). "Properties of fillers: relationship with laboratory performance in hot mix asphalt", J. Association Asphalt Paving Technologists, 77:361-398.
- [145] Lackner, R., Spiegl, M., Blab, R. ve Eberhardsteiner, J., (2005). "Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? Arguments from multiscale analysis", J. Materials in Civil Engineering, 17(5):485-491.
- [146] Tunç, A., (2004). Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı, Asil Yayın ve Dağıtım Ltd. Şti, Ankara.

- [147] TS EN 12697-30, (2012). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor, TSE, Ankara.
- [148] TS EN 12697-34, (2012). Marshall Deneyi (Stabilite, akma, boşluk, bitümle dolu boşluk, agregalar arası boşluk tayini), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- [149] ASTM D 2041, (2011). Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures, ASTM, Pennsylvania.
- [150] Anonim, [http://www.armatmuhendislik.com/izolasyon ve yalitim/Bitumlu kaplamalar uygulama kitabi Yazan Necdet Tosun.pdf](http://www.armatmuhendislik.com/izolasyon%20ve%20yalitim/Bitumlu%20kaplamalar%20uygulama%20kitab%20Yazan%20Necd%20et%20Tosun.pdf), 13 Nisan 2014.
- [151] Şen, Z., (2001). Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, Bilge Kültür Sanat, Mühendislik Dizisi, 3, İstanbul.
- [152] Doğan, O., (2006). Esnek Üstyapılı Devlet Yollarındaki Bozulmaların Bulanık Mantık ile Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [153] Yardım, M.S., Değer, B. ve Aydın, G. (2014). "Modelling of the Effects of Hydrated Lime Additives on Hot Mix Pavements Using a Fuzzy Logic Approach", International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians, 17-20 May 2014, Antalya (sunulmak üzere kabul edilmiştir).
- [154] Anonim, <http://www.mathworks.com/help/fuzzy/anfis.html>, 25 Şubat 2014.

### **DİZAYN NUMUNELERİNE AİT DENEY FORMLARI**

Bu çalışma kapsamında hazırlanmış sönmüş kireç oranı %0'dan başlayarak %6,8'e kadar arttırılan ve filler oranı da benzer şekilde azaltılarak elde edilmiş 15 adet Marshall Dizaynına (270 briket) ait numune bilgilerini içeren briket formları aşağıda sunulmuştur.

### A-1 Marshall Deney Formu (Dizayn No 1)

| SK Oranı                 |       |                            |      | %0       |                                  |             |               |                                     |           |             |        |           |          |       |             |           |         | FORMÜLLER                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------|-------|----------------------------|------|----------|----------------------------------|-------------|---------------|-------------------------------------|-----------|-------------|--------|-----------|----------|-------|-------------|-----------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bir. No                  | Bitüm |                            |      | Bri. Yük | Havadaki                         | Sudaki      | Doy. Yüz.     | Hacim                               | Hac. Özg. | Max. Teo.   | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma  | Düzeltilmiş | Stabilite | Düzelme |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                          | %     | %                          |      | mm       | Ağırl. (gr)                      | Ağırl. (gr) | K.Ağırl. (gr) | (cm3)                               | Ağırlık   | Öz. Ağırlık | %      | Boşluk %  | Boşluk % | (mm)  | (kN)        | giriş     | Faktörü |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                          | Wa    | Wb                         | (gr) | Ort.     | A                                | C           | B             | V                                   | DP        | DT          | Vh     | VMA       | Vf       |       |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 1                        | 4,0   | 3,85                       | 46,0 | 64,2     | 1181,7                           | 696,0       | 1193,8        | 497,8                               | 2,374     | 2,557       | 7,12   | 15,52     | 54,13    | 2,89  | 15,22       | 15,5      | 2,89    | $V = B - C$ $D_p = \frac{A}{V}$ $D_T = \frac{(100+W_a)}{100 + \frac{W_a}{G_{ef} + G_b}}$ $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$ $G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ $VMA = 100 - \frac{D_p \times (100 - W_b)}{G_{sb}}$ $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$ $P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} \times G_{sb})} \times G_b$ |
| 2                        | 4,0   | 3,85                       | 46,0 | 63,8     | 1183,3                           | 698,6       | 1197,1        | 498,5                               | 2,374     |             |        |           |          | 3,28  | 14,21       | 14,3      | 3,28    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 3                        | 4,0   | 3,85                       | 46,0 | 65,7     | 1189,4                           | 700,8       | 1201,1        | 500,3                               | 2,377     |             |        |           |          | 2,70  | 11,29       | 11,9      | 2,70    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |          |                                  |             |               |                                     | 2,375     |             |        |           | 2,96     | 13,57 |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 5                        | 4,5   | 4,31                       | 51,8 | 64,5     | 1196,7                           | 703,5       | 1201,1        | 497,6                               | 2,405     | 2,538       | 5,56   | 15,14     | 63,25    | 3,44  | 12,97       | 13,3      | 3,44    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 6                        | 4,5   | 4,31                       | 51,8 | 64,6     | 1194,5                           | 701,8       | 1200,4        | 498,6                               | 2,396     |             |        |           |          | 2,88  | 12,11       | 12,5      | 2,88    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 7                        | 4,5   | 4,31                       | 51,8 | 64,8     | 1191,9                           | 700,0       | 1198,5        | 498,5                               | 2,391     |             |        |           |          | 2,81  | 13,22       | 13,7      | 2,81    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |          |                                  |             |               |                                     | 2,397     |             |        |           | 3,04     | 12,77 |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 9                        | 5,0   | 4,76                       | 57,5 | 64,0     | 1190,3                           | 697,0       | 1194,1        | 497,1                               | 2,394     | 2,520       | 4,94   | 15,59     | 68,32    | 5,24  | 11,51       | 11,7      | 5,24    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 10                       | 5,0   | 4,76                       | 57,5 | 64,0     | 1200,5                           | 703,4       | 1204,2        | 500,8                               | 2,397     |             |        |           |          | 4,75  | 12,01       | 12,2      | 4,75    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 11                       | 5,0   | 4,76                       | 57,5 | 64,3     | 1204,3                           | 705,2       | 1207,9        | 502,7                               | 2,396     |             |        |           |          | 3,53  | 10,54       | 10,8      | 3,53    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |          |                                  |             |               |                                     | 2,396     |             |        |           | 4,51     | 11,35 |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 13                       | 5,5   | 5,21                       | 63,3 | 64,0     | 1205,4                           | 708,0       | 1207,4        | 499,4                               | 2,414     | 2,503       | 3,45   | 15,28     | 77,39    | 3,43  | 10,82       | 11,0      | 3,43    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 14                       | 5,5   | 5,21                       | 63,3 | 63,4     | 1202,0                           | 705,5       | 1202,9        | 497,4                               | 2,417     |             |        |           |          | 4,89  | 12,41       | 12,4      | 4,89    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 15                       | 5,5   | 5,21                       | 63,3 | 63,2     | 1196,2                           | 702,5       | 1197,2        | 494,7                               | 2,418     |             |        |           |          | 5,71  | 10,92       | 10,8      | 5,71    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |          |                                  |             |               |                                     | 2,416     |             |        |           | 4,68     | 11,38 |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 17                       | 6,0   | 5,66                       | 69,0 | 63,7     | 1210,0                           | 712,5       | 1211,7        | 499,2                               | 2,424     | 2,485       | 2,09   | 15,08     | 86,14    | 4,99  | 10,53       | 10,6      | 4,99    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 18                       | 6,0   | 5,66                       | 69,0 | 63,5     | 1213,9                           | 716,7       | 1214,7        | 498,0                               | 2,438     |             |        |           |          | 2,14  | 10,24       | 10,2      | 2,14    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 19                       | 6,0   | 5,66                       | 69,0 | 62,7     | 1204,3                           | 711,2       | 1205,1        | 493,9                               | 2,438     |             |        |           |          | 5,82  | 10,66       | 10,4      | 5,82    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |          |                                  |             |               |                                     | 2,433     |             |        |           | 4,32     | 10,48 |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 21                       | 6,5   | 6,10                       | 74,8 | 62,9     | 1207,4                           | 710,7       | 1207,9        | 497,2                               | 2,428     | 2,468       | 1,53   | 15,57     | 90,19    | 3,89  | 10,18       | 10,0      | 3,89    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 22                       | 6,5   | 6,10                       | 74,8 | 63,4     | 1213,2                           | 714,2       | 1213,6        | 499,4                               | 2,429     |             |        |           |          | 2,91  | 8,61        | 8,6       | 2,91    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 23                       | 6,5   | 6,10                       | 74,8 | 63,5     | 1216,5                           | 717,1       | 1216,9        | 499,8                               | 2,434     |             |        |           |          | 4,34  | 8,86        | 8,9       | 4,34    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |          |                                  |             |               |                                     | 2,431     |             |        |           | 3,71     | 9,22  |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| DENEY SONUÇLARI          |       |                            |      |          |                                  |             |               |                                     |           |             |        |           |          |       |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     | 1,010 | Kaba Agrega % si           |      | 51,3     | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |             | 2,698         | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                  |           | 5,20        | ± 0,3  |           |          |       |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Bitümün Penetrasyonu     | 50-70 | İnce Agrega % si           |      | 41,9     | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |             | 2,729         | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |           | 2,409       |        |           |          |       |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     | 0,28  | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |      | 6,8      | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |             | 2,693         | STABİLİTE ( " " )                   |           | 11,60       |        |           |          |       |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) | 2,724 | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ. (Gsb)   |      | 2,703    | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |             | 2,754         | AKMA ( " " )                        |           | 4,40        |        |           |          |       |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                          |       | Filler % si                |      | 6,8      | (Filler+SK) Zahirî Öz. Ağ. (Gfa) |             | 2,806         | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |           | 73,00       |        |           |          |       |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                          |       | Sönmüş Kireç % si          |      | 0        | Birikteteki Agrega Miktarı       |             | 1150          | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |           | 4,10        |        |           |          |       |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                          |       |                            |      |          |                                  |             |               | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |           | 15,27       |        |           |          |       |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                          |       |                            |      |          |                                  |             |               | MARSHALL ORANI                      |           | 2,64        |        |           |          |       |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                          |       |                            |      |          |                                  |             |               | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |           | 2,513       |        |           |          |       |             |           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

## A-2 Marshall Deney Formu (Dizayn No 2)

| SK Oranı                 |       |      |      | %0,5      |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
|--------------------------|-------|------|------|-----------|----------------------------|-------------|--------------|-------|----------------------------------|-------------|--------|-----------|----------|-------------------------------------|-------------|-----------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Bir.                     | Bitüm |      |      | Bri. Yük. | Havadaki                   | Sudaki      | Doy. Yüz.    | Hacim | Hac. Özg.                        | Max. Teo.   | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma                                | Düzeltilmiş | Stabilite | Düzeltilme | FORMÜLLER                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |       |
| No                       | %     | %    |      | mm        | Ağırl. (gr)                | Ağırl. (gr) | K.Ağırl.(gr) | (cm3) | Ağırlık                          | Öz. Ağırlık | %      | Boşluk %  | Boşluk % | (mm)                                | Stabilite   | giriş     | Faktörü    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.      | A                          | C           | B            | V     | DP                               | DT          | Vh     | VMA       | Vf       | (mm)                                | (kN)        |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 65,0      | 1182,8                     | 690,2       | 1189,8       | 499,6 | 2,367                            | 2,555       | 7,49   | 15,85     | 52,74    | 2,71                                | 14,62       | 15,2      | 0,962      | $V = B - C$<br>$D_p = \frac{A}{V}$<br>$D_T = \frac{(100+W_a)}{\frac{100}{G_{ef}} + G_b}$<br>$V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$<br>$G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$<br>$VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$<br>$V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$<br>$P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_b$ |       |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 65,4      | 1186,9                     | 695,3       | 1197,4       | 502,1 | 2,364                            |             |        |           |          | 2,69                                | 13,95       | 14,6      | 0,953      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 65,4      | 1181,6                     | 689,7       | 1190,3       | 500,6 | 2,360                            |             |        |           |          | 3,05                                | 13,96       | 14,7      | 0,953      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,364                            |             |        |           |          | 2,82                                | 14,18       |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 64,9      | 1193,7                     | 697,4       | 1200,7       | 503,3 | 2,372                            | 2,537       | 6,41   | 15,89     | 59,66    | 2,62                                | 12,96       | 13,4      | 0,965      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 65,2      | 1195,2                     | 700,3       | 1202,5       | 502,2 | 2,380                            |             |        |           |          | 4,31                                | 13,17       | 13,8      | 0,957      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 64,9      | 1193,9                     | 699,0       | 1202,6       | 503,6 | 2,371                            |             |        |           |          | 2,92                                | 13,37       | 13,9      | 0,965      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,374                            |             |        |           |          | 3,28                                | 13,17       |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 64,9      | 1198,8                     | 700,6       | 1203,0       | 502,4 | 2,386                            | 2,519       | 5,05   | 15,68     | 67,80    | 5,11                                | 11,99       | 12,4      | 0,965      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 63,9      | 1202,2                     | 704,0       | 1205,3       | 501,3 | 2,398                            |             |        |           |          | 4,99                                | 12,49       | 12,6      | 0,990      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 64,5      | 1201,5                     | 703,4       | 1206,1       | 502,7 | 2,390                            |             |        |           |          | 3,64                                | 13,20       | 13,5      | 0,975      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,391                            |             |        |           |          | 4,58                                | 12,56       |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 63,5      | 1186,8                     | 694,4       | 1188,0       | 493,6 | 2,404                            | 2,501       | 3,99   | 15,74     | 74,65    | 5,24                                | 11,37       | 11,4      | 1,000      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 64,4      | 1199,7                     | 700,8       | 1201,0       | 500,2 | 2,398                            |             |        |           |          | 4,85                                | 10,47       | 10,7      | 0,978      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 64,2      | 1204,1                     | 703,6       | 1205,2       | 501,6 | 2,401                            |             |        |           |          | 5,00                                | 10,86       | 11,1      | 0,982      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,401                            |             |        |           |          | 5,03                                | 10,90       |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 64,1      | 1211,0                     | 711,2       | 1211,9       | 500,7 | 2,419                            | 2,484       | 2,64   | 15,55     | 83,03    | 6,22                                | 9,78        | 10,0      | 0,975      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 63,7      | 1210,8                     | 709,3       | 1211,8       | 502,5 | 2,410                            |             |        |           |          | 4,75                                | 9,52        | 9,6       | 0,995      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 63,6      | 1210,9                     | 712,4       | 1211,5       | 499,1 | 2,426                            |             |        |           |          | 6,70                                | 11,46       | 11,5      | 0,998      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,418                            |             |        |           |          | 5,89                                | 10,25       |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 63,3      | 1212,3                     | 713,8       | 1212,8       | 499,0 | 2,429                            | 2,467       | 1,74   | 15,74     | 88,95    | 5,70                                | 9,81        | 9,8       | 1,006      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 63,4      | 1214,9                     | 714,2       | 1215,2       | 501,0 | 2,425                            |             |        |           |          | 7,04                                | 8,68        | 8,7       | 1,003      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 63,6      | 1214,1                     | 712,2       | 1214,5       | 502,3 | 2,417                            |             |        |           |          | 4,50                                | 9,51        | 9,5       | 0,998      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,424                            |             |        |           |          | 5,75                                | 9,33        |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010     | Kaba Agrega % si           |             |              | 51,3  | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |             |        |           | 2,698    | OPTİMUM BİTÜM % Si                  |             |           |            | 5,28                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ± 0,3 |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70     | İnce Agrega % si           |             |              | 41,9  | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |             |        |           | 2,729    | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |             |           |            | 2,398                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28      | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |             |              | 6,8   | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |             |        |           | 2,693    | STABİLİTE ( " " )                   |             |           |            | 11,64                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,722     | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ. (Gsb)   |             |              | 2,701 | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |             |        |           | 2,754    | AKMA ( " " )                        |             |           |            | 4,85                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |       |
|                          |       |      |      |           | Filler % si                |             |              | 6,3   | (Filler+SK) Zahiri Öz. Ağ. (Gfa) |             |        |           | 2,776    | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |             |           |            | 71,60                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |
|                          |       |      |      |           | Sönmüş Kireç % si          |             |              | 0,5   | Biriketteki Agrega Miktarı       |             |        |           | 1150     | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |             |           |            | 4,45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |             |           |            | 15,70                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MARSHALL ORANI                      |             |           |            | 2,40                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |             |           |            | 2,509                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |

### A-3 Marshall Deney Formu (Dizayn No 3)

| SK Oranı                 |       |      |      | %1        |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                            | FORMÜLLER |
|--------------------------|-------|------|------|-----------|----------------------------|-------------|--------------|-------|----------------------------------|-------------|--------|-----------|----------|-------------------------------------|-------------|-----------|------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Bir.                     | Bitüm |      |      | Bri. Yük. | Havadaki                   | Sudaki      | Doy. Yüz.    | Hacim | Hac. Özg.                        | Max. Teo.   | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma                                | Düzeltilmiş | Stabilite | Düzeltilme |                                                                            |           |
| No                       | %     | %    |      | mm        | Ağırl. (gr)                | Ağırl. (gr) | K.Ağırl.(gr) | (cm3) | Ağırlık                          | Öz. Ağırlık | %      | Boşluk %  | Boşluk % |                                     | Stabilite   | giriş     | Faktörü    |                                                                            |           |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.      | A                          | C           | B            | V     | DP                               | DT          | Vh     | VMA       | Vf       | (mm)                                | (kN)        |           |            |                                                                            |           |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 65,6      | 1185,4                     | 690,1       | 1194,0       | 503,9 | 2,352                            | 2,554       | 7,52   | 15,87     | 52,64    | 2,68                                | 15,21       | 16,0      | 0,949      | $V = B - C$<br>$D_p = \frac{A}{V}$                                         |           |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 65,4      | 1190,3                     | 695,9       | 1199,9       | 504,0 | 2,362                            |             |        |           |          | 3,79                                | 16,08       | 16,9      | 0,953      |                                                                            |           |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,1      | 1182,8                     | 693,6       | 1192,0       | 498,4 | 2,373                            |             |        |           |          | 3,04                                | 13,34       | 14,2      | 0,938      |                                                                            |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,362                            |             |        |           |          | 3,17                                | 14,88       |           |            |                                                                            |           |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 65,7      | 1192,2                     | 696,8       | 1198,8       | 502,0 | 2,375                            | 2,536       | 6,19   | 15,69     | 60,56    | 5,85                                | 13,40       | 14,2      | 0,947      | $D_T = \frac{(100+W_a)}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}}$             |           |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 65,1      | 1190,5                     | 696,3       | 1197,9       | 501,6 | 2,373                            |             |        |           |          | 3,06                                | 12,71       | 13,2      | 0,960      |                                                                            |           |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 64,8      | 1194,3                     | 700,3       | 1200,3       | 500,0 | 2,389                            |             |        |           |          | 2,96                                | 13,81       | 14,3      | 0,967      |                                                                            |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,379                            |             |        |           |          | 3,96                                | 13,31       |           |            |                                                                            |           |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 63,8      | 1201,5                     | 702,4       | 1203,6       | 501,2 | 2,397                            | 2,518       | 4,89   | 15,54     | 68,51    | 4,15                                | 12,10       | 12,2      | 0,992      | $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$                                   |           |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 63,7      | 1195,6                     | 698,3       | 1197,6       | 499,3 | 2,395                            |             |        |           |          | 3,86                                | 12,71       | 12,8      | 0,995      |                                                                            |           |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 64,2      | 1200,3                     | 701,0       | 1202,8       | 501,8 | 2,392                            |             |        |           |          | 4,51                                | 13,09       | 13,3      | 0,982      |                                                                            |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,395                            |             |        |           |          | 4,17                                | 12,63       |           |            |                                                                            |           |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 63,5      | 1206,0                     | 705,7       | 1207,1       | 501,4 | 2,405                            | 2,500       | 3,74   | 15,52     | 75,89    | 5,45                                | 12,62       | 12,6      | 1,000      | $G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ |           |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 64,0      | 1200,1                     | 701,7       | 1201,6       | 499,9 | 2,401                            |             |        |           |          | 4,11                                | 10,17       | 10,3      | 0,988      |                                                                            |           |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 63,7      | 1205,2                     | 707,3       | 1206,6       | 499,3 | 2,414                            |             |        |           |          | 4,31                                | 9,84        | 9,9       | 0,995      |                                                                            |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,407                            |             |        |           |          | 4,62                                | 10,88       |           |            |                                                                            |           |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 63,3      | 1199,8                     | 703,0       | 1200,7       | 497,7 | 2,411                            | 2,483       | 2,73   | 15,62     | 82,55    | 5,18                                | 10,21       | 10,2      | 1,006      | $VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$                             |           |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 63,2      | 1188,4                     | 696,1       | 1189,2       | 493,1 | 2,410                            |             |        |           |          | 6,39                                | 10,43       | 10,4      | 1,008      |                                                                            |           |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 63,1      | 1202,2                     | 707,0       | 1202,8       | 495,8 | 2,425                            |             |        |           |          | 7,17                                | 9,94        | 9,8       | 1,011      |                                                                            |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,415                            |             |        |           |          | 6,25                                | 10,19       |           |            |                                                                            |           |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 62,9      | 1201,3                     | 708,9       | 1201,5       | 492,6 | 2,439                            | 2,466       | 1,57   | 15,60     | 89,91    | 5,32                                | 10,77       | 10,6      | 1,016      | $P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_b$    |           |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 62,8      | 1201,0                     | 705,6       | 1201,4       | 495,8 | 2,422                            |             |        |           |          | 5,04                                | 10,07       | 9,9       | 1,018      |                                                                            |           |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 63,4      | 1208,5                     | 709,7       | 1209,0       | 499,3 | 2,420                            |             |        |           |          | 4,77                                | 9,75        | 9,7       | 1,003      |                                                                            |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,427                            |             |        |           |          | 5,04                                | 10,20       |           |            |                                                                            |           |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                            |           |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010     | Kaba Agrega % si           |             |              | 51,3  | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |             |        |           | 2,698    | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                  |             |           |            | 5,25 ± 0,3                                                                 |           |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70     | İnce Agrega % si           |             |              | 41,9  | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |             |        |           | 2,729    | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |             |           |            | 2,4                                                                        |           |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28      | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |             |              | 6,8   | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |             |        |           | 2,693    | STABİLİTE ( " " )                   |             |           |            | 11,60                                                                      |           |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,721     | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ.(Gsb)    |             |              | 2,700 | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |             |        |           | 2,754    | AKMA ( " " )                        |             |           |            | 4,75                                                                       |           |
|                          |       |      |      |           | Filler % si                |             |              | 5,8   | (Filler+SK) Zahirî Öz. Ağ. (Gfa) |             |        |           | 2,760    | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |             |           |            | 72,00                                                                      |           |
|                          |       |      |      |           | Sönmüş Kireç % si          |             |              | 1     | Biriketteki Agrega Miktarı       |             |        |           | 1150     | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |             |           |            | 4,40                                                                       |           |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |             |           |            | 15,58                                                                      |           |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MARSHALL ORANI                      |             |           |            | 2,44                                                                       |           |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |             |           |            | 2,509                                                                      |           |

### A-4 Marshall Deney Formu (Dizayn No 4)

| SK Oranı                 |       |      | %1,5 |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |           |                                                                            |
|--------------------------|-------|------|------|-----------|----------------------------|-------------|--------------|-------|----------------------------------|-------------|--------|-----------|----------|-------------------------------------|-------------|-----------|-----------|----------------------------------------------------------------------------|
| Bir.                     | Bitüm |      |      | Bri. Yük. | Havadaki                   | Sudaki      | Doy. Yüz.    | Hacim | Hac. Özg.                        | Max. Teo.   | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma                                | Düzeltilmiş | Stabilite | Düzel tme | FORMÜLLER                                                                  |
| No                       | %     | %    |      | mm        | Ağırl. (gr)                | Ağırl. (gr) | K.Ağırl.(gr) | (cm3) | Ağırlık                          | Öz. Ağırlık | %      | Boşluk %  | Boşluk % |                                     | Stabilite   | giriş     | Faktörü   |                                                                            |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.      | A                          | C           | B            | V     | DP                               | DT          | Vh     | VMA       | Vf       | (mm)                                | (kN)        |           |           |                                                                            |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,6      | 1175,0                     | 677,8       | 1184,0       | 506,2 | 2,321                            | 2,551       | 8,71   | 16,95     | 48,59    | 2,67                                | 10,20       | 11,0      | 0,927     | $V = B - C$ $D_p = \frac{A}{V}$                                            |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,5      | 1183,9                     | 686,7       | 1197,4       | 510,7 | 2,318                            |             |        |           |          | 3,03                                | 9,80        | 10,5      | 0,930     |                                                                            |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,5      | 1186,9                     | 693,9       | 1199,6       | 505,7 | 2,347                            |             |        |           |          | 3,62                                | 8,21        | 8,8       | 0,930     |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,329                            |             |        |           |          | 3,11                                | 9,40        |           |           | $D_T = \frac{(100+W_a)}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}}$             |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 65,7      | 1191,9                     | 695,9       | 1202,4       | 506,5 | 2,353                            | 2,533       | 7,22   | 16,61     | 56,50    | 3,53                                | 9,71        | 10,3      | 0,947     |                                                                            |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 66,0      | 1190,8                     | 698,6       | 1206,2       | 507,6 | 2,346                            |             |        |           |          | 2,51                                | 8,83        | 9,4       | 0,940     |                                                                            |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 65,9      | 1191,4                     | 695,9       | 1202,9       | 507,0 | 2,350                            |             |        |           |          | 3,47                                | 8,98        | 9,5       | 0,943     |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,350                            |             |        |           |          | 3,17                                | 9,17        |           |           | $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$                                   |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,6      | 1198,0                     | 696,2       | 1205,8       | 509,6 | 2,351                            | 2,515       | 6,40   | 16,87     | 62,04    | 4,98                                | 8,55        | 9,0       | 0,949     |                                                                            |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,6      | 1197,2                     | 698,2       | 1205,6       | 507,4 | 2,359                            |             |        |           |          | 4,15                                | 9,50        | 10,0      | 0,949     |                                                                            |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,1      | 1198,7                     | 696,4       | 1206,4       | 510,0 | 2,350                            |             |        |           |          | 3,26                                | 8,88        | 9,3       | 0,960     |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,354                            |             |        |           |          | 4,13                                | 8,98        |           |           | $G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 65,2      | 1204,6                     | 697,4       | 1208,3       | 510,9 | 2,358                            | 2,497       | 5,23   | 16,81     | 68,89    | 3,15                                | 8,17        | 8,5       | 0,957     |                                                                            |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 65,2      | 1204,3                     | 697,8       | 1206,8       | 509,0 | 2,366                            |             |        |           |          | 5,50                                | 8,11        | 8,5       | 0,957     |                                                                            |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 64,5      | 1203,3                     | 700,0       | 1206,6       | 506,6 | 2,375                            |             |        |           |          | 4,74                                | 9,00        | 9,2       | 0,975     |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,366                            |             |        |           |          | 4,46                                | 8,43        |           |           | $VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$                             |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 64,3      | 1210,0                     | 704,4       | 1210,7       | 506,3 | 2,390                            | 2,480       | 3,35   | 16,14     | 79,27    | 3,79                                | 8,40        | 8,6       | 0,980     |                                                                            |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 64,0      | 1207,9                     | 703,9       | 1208,5       | 504,6 | 2,394                            |             |        |           |          | 4,12                                | 8,83        | 8,9       | 0,988     |                                                                            |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 64,2      | 1212,7                     | 709,5       | 1213,4       | 503,9 | 2,407                            |             |        |           |          | 4,14                                | 8,45        | 8,6       | 0,982     |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,397                            |             |        |           |          | 4,02                                | 8,56        |           |           | $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$                                   |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 64,4      | 1209,3                     | 708,0       | 1210,1       | 502,1 | 2,408                            | 2,463       | 2,01   | 15,95     | 87,41    | 7,35                                | 9,21        | 9,4       | 0,978     |                                                                            |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 63,7      | 1214,4                     | 711,9       | 1215,0       | 503,1 | 2,414                            |             |        |           |          | 3,50                                | 9,08        | 9,1       | 0,995     |                                                                            |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 63,2      | 1203,2                     | 706,1       | 1203,7       | 497,6 | 2,418                            |             |        |           |          | 5,04                                | 9,93        | 9,9       | 1,008     |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,413                            |             |        |           |          | 5,30                                | 9,41        |           |           | $P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_b$    |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |           |                                                                            |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010     | Kaba Agrega % si           |             |              | 51,3  | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |             |        |           | 2,698    | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                  |             |           |           | 5,47 ± 0,3                                                                 |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70     | İnce Agrega % si           |             |              | 41,9  | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |             |        |           | 2,729    | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |             |           |           | 2,371                                                                      |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28      | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |             |              | 6,8   | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gib)         |             |        |           | 2,693    | STABİLİTE ( " " )                   |             |           |           | 8,58                                                                       |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,717     | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ.(Gsb)    |             |              | 2,696 | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gia)         |             |        |           | 2,754    | AKMA ( " " )                        |             |           |           | 4,13                                                                       |
|                          |       |      |      |           | Filler % si                |             |              | 5,3   | (Filler+SK) Zahiri Öz. Ağ. (Gfa) |             |        |           | 2,702    | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |             |           |           | 68,90                                                                      |
|                          |       |      |      |           | Sönmüş Kireç % si          |             |              | 1,5   | Birikteteki Agrega Miktarı       |             |        |           | 1150     | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |             |           |           | 5,18                                                                       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |             |           |           | 16,63                                                                      |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MARSHALL ORANI                      |             |           |           | 2,08                                                                       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |             |           |           | 2,498                                                                      |

### A-5 Marshall Deney Formu (Dizayn No 5)

| SK Oranı                 |       |      |      | %2        |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                                                                     |       |
|--------------------------|-------|------|------|-----------|----------------------------|-------------|--------------|-------|----------------------------------|-------------|--------|-----------|----------|-------------------------------------|-------------|-----------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Bir.                     | Bitüm |      |      | Bri. Yük. | Havadaki                   | Sudaki      | Doy. Yüz.    | Hacim | Hac. Özğ.                        | Max. Teo.   | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma                                | Düzeltilmiş | Stabilite | Düzeltilme | FORMÜLLER                                                                                                           |       |
| No                       | %     | %    |      | mm        | Ağırl. (gr)                | Ağırl. (gr) | K.Ağırl.(gr) | (cm3) | Ağırlık                          | Öz. Ağırlık | %      | Boşluk %  | Boşluk % | (mm)                                | (kN)        | giriş     | Faktörü    |                                                                                                                     |       |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.      | A                          | C           | B            | V     | DP                               | DT          | Vh     | VMA       | Vf       |                                     |             |           |            |                                                                                                                     |       |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,6      | 1180,6                     | 683,6       | 1192,2       | 508,6 | 2,321                            | 2,540       | 8,16   | 16,41     | 50,28    | 2,93                                | 10,93       | 11,8      | 0,927      | $V = B - C$<br>$D_p = \frac{A}{V}$                                                                                  |       |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 65,5      | 1180,3                     | 685,6       | 1191,1       | 505,5 | 2,335                            |             |        |           |          | 2,71                                | 9,14        | 9,6       | 0,951      |                                                                                                                     |       |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,3      | 1185,6                     | 690,1       | 1196,5       | 506,4 | 2,341                            |             |        |           |          | 3,07                                | 9,82        | 10,5      | 0,934      |                                                                                                                     |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,332                            |             |        |           |          | 2,90                                | 9,96        |           |            |                                                                                                                     |       |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 65,8      | 1186,3                     | 692,9       | 1197,8       | 504,9 | 2,350                            | 2,521       | 6,60   | 16,01     | 58,76    | 2,76                                | 8,68        | 9,2       | 0,945      | $D_T = \frac{(100+W_a)}{100 + \frac{W_a}{G_{ef}} + \frac{G_b}{G_b}}$                                                |       |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 65,5      | 1195,4                     | 696,5       | 1205,8       | 509,3 | 2,347                            |             |        |           |          | 3,41                                | 9,55        | 10,0      | 0,951      |                                                                                                                     |       |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 64,8      | 1191,6                     | 695,3       | 1198,5       | 503,2 | 2,368                            |             |        |           |          | 3,88                                | 9,45        | 9,8       | 0,967      |                                                                                                                     |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,355                            |             |        |           |          | 3,35                                | 9,23        |           |            |                                                                                                                     |       |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,1      | 1198,1                     | 699,0       | 1203,5       | 504,5 | 2,375                            | 2,504       | 5,35   | 15,88     | 66,34    | 2,90                                | 9,72        | 10,1      | 0,960      | $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$                                                                            |       |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,4      | 1197,3                     | 696,3       | 1202,1       | 505,8 | 2,367                            |             |        |           |          | 4,90                                | 11,13       | 11,7      | 0,953      |                                                                                                                     |       |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 64,8      | 1193,7                     | 695,2       | 1199,5       | 504,3 | 2,367                            |             |        |           |          | 3,48                                | 10,02       | 10,4      | 0,967      |                                                                                                                     |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,370                            |             |        |           |          | 3,76                                | 10,29       |           |            |                                                                                                                     |       |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 64,5      | 1209,2                     | 705,8       | 1210,3       | 504,5 | 2,397                            | 2,486       | 3,68   | 15,40     | 76,08    | 4,81                                | 9,38        | 9,6       | 0,975      | $G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$                                          |       |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 64,2      | 1204,6                     | 703,1       | 1206,2       | 503,1 | 2,394                            |             |        |           |          | 4,46                                | 10,08       | 10,3      | 0,982      |                                                                                                                     |       |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 64,2      | 1203,1                     | 701,9       | 1204,8       | 502,9 | 2,392                            |             |        |           |          | 4,64                                | 9,80        | 10,0      | 0,982      |                                                                                                                     |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,395                            |             |        |           |          | 4,64                                | 9,75        |           |            |                                                                                                                     |       |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 63,8      | 1202,3                     | 703,5       | 1203,3       | 499,8 | 2,406                            | 2,469       | 2,45   | 15,31     | 84,01    | 3,94                                | 9,55        | 9,6       | 0,992      | $VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$                                                                      |       |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 63,8      | 1200,0                     | 701,3       | 1201,0       | 499,7 | 2,401                            |             |        |           |          | 3,28                                | 8,48        | 8,6       | 0,992      |                                                                                                                     |       |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 63,4      | 1211,2                     | 711,0       | 1211,7       | 500,7 | 2,419                            |             |        |           |          | 5,73                                | 10,49       | 10,5      | 1,003      |                                                                                                                     |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,409                            |             |        |           |          | 4,32                                | 9,51        |           |            |                                                                                                                     |       |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 63,5      | 1212,6                     | 710,2       | 1213,1       | 502,9 | 2,411                            | 2,452       | 1,39   | 15,36     | 90,94    | 3,65                                | 8,51        | 8,5       | 1,000      | $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$<br>$P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_b$ |       |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 63,4      | 1212,7                     | 711,5       | 1213,2       | 501,7 | 2,417                            |             |        |           |          | 4,63                                | 9,76        | 9,7       | 1,003      |                                                                                                                     |       |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 63,3      | 1216,2                     | 715,5       | 1216,7       | 501,2 | 2,427                            |             |        |           |          | 6,57                                | 9,04        | 9,0       | 1,006      |                                                                                                                     |       |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,418                            |             |        |           |          | 4,95                                | 9,10        |           |            |                                                                                                                     |       |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                                                                     |       |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010     | Kaba Agrega % si           |             |              | 51,3  | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |             |        |           | 2,698    | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                  |             |           |            | 5,35                                                                                                                | ± 0,3 |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70     | İnce Agrega % si           |             |              | 41,9  | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |             |        |           | 2,729    | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |             |           |            | 2,387                                                                                                               |       |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28      | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |             |              | 6,8   | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |             |        |           | 2,693    | STABİLİTE ( " " )                   |             |           |            | 9,81                                                                                                                |       |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,703     | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ.(Gsb)    |             |              | 2,683 | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |             |        |           | 2,754    | AKMA ( " " )                        |             |           |            | 4,20                                                                                                                |       |
|                          |       |      |      |           | Filler % si                |             |              | 4,8   | (Filler+SK) Zahirî Öz. Ağ. (Gfa) |             |        |           | 2,519    | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |             |           |            | 72,90                                                                                                               |       |
|                          |       |      |      |           | Sönmüş Kireç % si          |             |              | 2     | Birikteteki Agrega Miktarı       |             |        |           | 1150     | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |             |           |            | 4,09                                                                                                                |       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |             |           |            | 15,55                                                                                                               |       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MARSHALL ORANI                      |             |           |            | 2,34                                                                                                                |       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |             |           |            | 2,491                                                                                                               |       |

### A-6 Marshall Deney Formu (Dizayn No 6)

| SK Oranı                 |       |      |      | %2,5      |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                            |                                                          |     |       |                     |
|--------------------------|-------|------|------|-----------|----------------------------|-------------|--------------|-------|----------------------------------|-------------|--------|-----------|----------|-------------------------------------|-------------|-----------|------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----|-------|---------------------|
| Bir.                     | Bitüm |      |      | Bri. Yük. | Havadaki                   | Sudaki      | Doy. Yüz.    | Hacim | Hac. Özg.                        | Max. Teo.   | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma                                | Düzeltilmiş | Stabilite | Düzeltilme | FORMÜLLER                                                                  |                                                          |     |       |                     |
| No                       | %     | %    |      | mm        | Ağırl. (gr)                | Ağırl. (gr) | K.Ağırl.(gr) | (cm3) | Ağırlık                          | Öz. Ağırlık | %      | Boşluk %  | Boşluk % |                                     | Stabilite   | giriş     | Faktörü    |                                                                            |                                                          |     |       |                     |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.      | A                          | C           | B            | V     | DP                               | DT          | Vh     | VMA       | Vf       | (mm)                                | (kN)        |           |            |                                                                            |                                                          |     |       |                     |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 67,5      | 1179,4                     | 678,6       | 1190,2       | 511,6 | 2,305                            | 2,544       | 8,76   | 16,97     | 48,39    | 2,38                                | 8,40        | 9,3       | 0,906      | $V = B - C$                                                                |                                                          |     |       |                     |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,3      | 1170,5                     | 678,4       | 1180,1       | 501,7 | 2,333                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 3,33                                                                       | 8,97                                                     | 9,6 | 0,934 | $D_p = \frac{A}{V}$ |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,0      | 1182,2                     | 684,6       | 1192,9       | 508,3 | 2,326                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 2,85                                                                       | 7,86                                                     | 8,8 | 0,894 |                     |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,321                            | 2,526       | 7,62   | 16,94     | 55,02    | 2,85                                | 8,41        |           |            |                                                                            | $D_T = \frac{(100+W_a)}{100 + \frac{W_a}{G_{ef} + G_b}}$ |     |       |                     |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 67,0      | 1184,2                     | 686,3       | 1195,6       | 509,3 | 2,325                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 3,00                                                                       | 7,46                                                     | 8,1 | 0,918 |                     |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 66,7      | 1182,7                     | 686,6       | 1194,5       | 507,9 | 2,329                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 4,56                                                                       | 8,49                                                     | 9,2 | 0,925 |                     |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 66,3      | 1187,0                     | 694,2       | 1200,1       | 505,9 | 2,346                            | 2,508       | 5,88   | 16,37     | 64,11    | 3,21                                | 9,35        | 10,0      | 0,934      | $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$                                   |                                                          |     |       |                     |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,333                            |             |        |           |          | 3,59                                | 8,43        |           |            |                                                                            |                                                          |     |       |                     |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,7      | 1196,8                     | 697,7       | 1206,6       | 508,9 | 2,352                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 3,64                                                                       | 8,93                                                     | 9,4 | 0,947 |                     |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 64,9      | 1206,3                     | 701,4       | 1208,1       | 506,7 | 2,381                            | 2,490       | 4,54   | 16,17     | 71,95    | 4,63                                | 8,54        | 8,9       | 0,965      | $G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ |                                                          |     |       |                     |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,9      | 1197,8                     | 696,7       | 1206,6       | 509,9 | 2,349                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 3,34                                                                       | 8,49                                                     | 9,0 | 0,943 |                     |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,361                            |             |        |           |          | 3,87                                | 8,65        |           |            |                                                                            |                                                          |     |       |                     |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 64,7      | 1203,9                     | 700,4       | 1205,9       | 505,5 | 2,382                            | 2,473       | 3,85   | 16,55     | 76,72    | 4,59                                | 8,87        | 9,1       | 0,970      | $VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$                             |                                                          |     |       |                     |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 64,2      | 1203,0                     | 702,2       | 1205,6       | 503,4 | 2,390                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 4,11                                                                       | 9,25                                                     | 9,4 | 0,982 |                     |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 65,7      | 1199,5                     | 694,9       | 1203,0       | 508,1 | 2,361                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 4,92                                                                       | 7,93                                                     | 8,4 | 0,947 |                     |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,377                            | 2,457       | 1,81   | 15,74     | 88,53    | 4,54                                | 8,68        |           |            |                                                                            | $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$                 |     |       |                     |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 64,8      | 1204,7                     | 698,7       | 1205,7       | 507,0 | 2,376                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 3,93                                                                       | 8,33                                                     | 8,6 | 0,967 |                     |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 64,7      | 1206,4                     | 702,3       | 1207,5       | 505,2 | 2,388                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 6,51                                                                       | 7,71                                                     | 8,0 | 0,970 |                     |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 65,0      | 1207,7                     | 699,2       | 1208,8       | 509,6 | 2,370                            | 2,412       |        |           |          | 2,59                                | 7,50        | 7,8       | 0,962      | $P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_b$    |                                                          |     |       |                     |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,378                            |             |        |           |          | 4,34                                | 7,85        |           |            |                                                                            |                                                          |     |       |                     |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 64,1      | 1214,0                     | 711,2       | 1214,6       | 503,4 | 2,412                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 5,75                                                                       | 9,38                                                     | 9,6 | 0,975 |                     |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 63,8      | 1207,0                     | 707,8       | 1207,3       | 499,5 | 2,416                            | 2,457       | 1,81   | 15,74     | 88,53    | 5,05                                | 8,48        | 8,6       | 0,992      |                                                                            |                                                          |     |       |                     |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 64,0      | 1206,2                     | 706,0       | 1206,8       | 500,8 | 2,409                            |             |        |           |          |                                     |             |           |            | 3,65                                                                       | 7,63                                                     | 7,7 | 0,988 |                     |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,412                            |             |        |           |          | 4,82                                | 8,50        |           |            |                                                                            |                                                          |     |       |                     |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                            |                                                          |     |       |                     |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010     | Kaba Agrega % si           |             |              | 51,3  | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |             |        |           | 2,698    | OPTİMUM BİTÜM % Si                  |             |           |            | 5,59                                                                       | ± 0,3                                                    |     |       |                     |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70     | İnce Agrega % si           |             |              | 41,9  | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |             |        |           | 2,729    | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |             |           |            | 2,372                                                                      |                                                          |     |       |                     |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28      | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |             |              | 6,8   | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |             |        |           | 2,693    | STABİLİTE ( " " )                   |             |           |            | 8,41                                                                       |                                                          |     |       |                     |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,709     | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ. (Gsb)   |             |              | 2,688 | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |             |        |           | 2,754    | AKMA ( " " )                        |             |           |            | 4,40                                                                       |                                                          |     |       |                     |
|                          |       |      |      |           | Filler % si                |             |              | 4,3   | (Filler+SK) Zahiri Öz. Ağ. (Gfa) |             |        |           | 2,588    | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |             |           |            | 71,60                                                                      |                                                          |     |       |                     |
|                          |       |      |      |           | Sönmüş Kireç % si          |             |              | 2,5   | Biriketteki Agrega Miktarı       |             |        |           | 1150     | BOŞLUK %' Si ( " " )                |             |           |            | 4,62                                                                       |                                                          |     |       |                     |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | AGR. ARASI BOŞ. %' Si (VMA) ( " " ) |             |           |            | 16,29                                                                      |                                                          |     |       |                     |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MARSHALL ORANI                      |             |           |            | 1,91                                                                       |                                                          |     |       |                     |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |             |           |            | 2,487                                                                      |                                                          |     |       |                     |

### A-7 Marshall Deney Formu (Dizayn No 7)

| SK Oranı                 |       |      |      | %3           |                            |                    |                        |             |                                  |                       |          |                    |                   |                                     |                            |                 |                    | FORMÜLLER                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------|-------|------|------|--------------|----------------------------|--------------------|------------------------|-------------|----------------------------------|-----------------------|----------|--------------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bir. No                  | Bitüm |      |      | Bir. Yük. mm | Havadaki Ağırl. (gr)       | Sudaki Ağırl. (gr) | Doy. Yüz. K.Ağırl.(gr) | Hacim (cm3) | Hac. Öz. Ağırlık                 | Max. Teo. Öz. Ağırlık | Boşluk % | Agr.Arasi Boşluk % | Asf.Dolu Boşluk % | Akma (mm)                           | Düzeltilmiş Stabilite (kN) | Stabilite giriş | Düzeltilme Faktörü |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.         | A                          | C                  | B                      | V           | DP                               | DT                    | Vh       | VMA                | Vf                |                                     |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          | %     | %    |      |              |                            |                    |                        |             |                                  |                       |          |                    |                   |                                     |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,7         | 1195,4                     | 695,1              | 1206,2                 | 511,1       | 2,339                            | 2,545                 | 8,19     | 16,46              | 50,22             | 3,41                                | 9,49                       | 10,3            | 0,925              | $V = B - C$ $D_p = \frac{A}{V}$ $D_T = \frac{(100+W_a)}{100 + \frac{W_a}{G_{ef}} + \frac{W_b}{G_b}}$ $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \cdot 100$ $G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ $VMA = 100 - \frac{D_p \cdot (100 - W_b)}{G_{sb}}$ $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \cdot 100$ $P_{ba} = 100 \cdot x \cdot \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} \cdot G_{sb})} \cdot G_b$ |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,6         | 1189,2                     | 688,2              | 1199,8                 | 511,6       | 2,324                            |                       |          |                    |                   | 3,39                                | 8,90                       | 9,6             | 0,927              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,3         | 1192,2                     | 692,2              | 1200,1                 | 507,9       | 2,347                            |                       |          |                    |                   | 2,96                                | 8,49                       | 9,1             | 0,934              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                        |             | 2,337                            |                       |          |                    | 3,25              | 8,96                                |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 66,7         | 1195,4                     | 695,1              | 1206,2                 | 511,1       | 2,339                            | 2,527                 | 7,53     | 16,86              | 55,36             | 3,58                                | 9,84                       | 10,6            | 0,925              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 66,6         | 1189,2                     | 688,2              | 1199,8                 | 511,6       | 2,324                            |                       |          |                    |                   | 4,37                                | 10,05                      | 10,8            | 0,927              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 66,3         | 1192,2                     | 692,2              | 1200,1                 | 507,9       | 2,347                            |                       |          |                    |                   | 3,23                                | 10,04                      | 10,8            | 0,934              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                        |             | 2,337                            |                       |          |                    | 3,73              | 9,98                                |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,8         | 1200,0                     | 695,1              | 1207,2                 | 512,1       | 2,343                            | 2,509                 | 6,51     | 16,94              | 61,56             | 3,63                                | 10,52                      | 11,1            | 0,945              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,8         | 1195,3                     | 694,9              | 1202,5                 | 507,6       | 2,355                            |                       |          |                    |                   | 2,39                                | 8,33                       | 8,8             | 0,945              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 66,2         | 1197,6                     | 692,9              | 1204,9                 | 512,0       | 2,339                            |                       |          |                    |                   | 2,98                                | 9,14                       | 9,8             | 0,936              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                        |             | 2,346                            |                       |          |                    | 3,00              | 9,33                                |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 65,9         | 1204,1                     | 695,8              | 1208,6                 | 512,8       | 2,348                            | 2,492                 | 5,38     | 16,92              | 68,18             | 4,72                                | 8,74                       | 9,3             | 0,943              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,1         | 1206,4                     | 697,8              | 1210,5                 | 512,7       | 2,353                            |                       |          |                    |                   | 5,02                                | 8,79                       | 9,4             | 0,938              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 64,8         | 1203,4                     | 698,8              | 1206,3                 | 507,5       | 2,371                            |                       |          |                    |                   | 3,51                                | 9,87                       | 10,2            | 0,967              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                        |             | 2,357                            |                       |          |                    | 4,42              | 9,13                                |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 65,6         | 1213,9                     | 707,6              | 1214,7                 | 507,1       | 2,394                            | 2,474                 | 3,92     | 16,61              | 76,42             | 3,60                                | 9,41                       | 9,9             | 0,949              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 65,5         | 1207,3                     | 701,5              | 1209,5                 | 508,0       | 2,377                            |                       |          |                    |                   | 6,01                                | 8,31                       | 8,7             | 0,951              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 65,9         | 1210,0                     | 700,6              | 1212,8                 | 512,2       | 2,362                            |                       |          |                    |                   | 7,08                                | 8,63                       | 9,2             | 0,943              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                        |             | 2,378                            |                       |          |                    | 5,56              | 8,78                                |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 65,1         | 1213,4                     | 709,0              | 1214,2                 | 505,2       | 2,402                            | 2,458                 | 2,18     | 16,07              | 86,43             | 7,34                                | 9,76                       | 10,2            | 0,960              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 64,9         | 1219,2                     | 712,3              | 1220,4                 | 508,1       | 2,400                            |                       |          |                    |                   | 4,93                                | 9,99                       | 10,4            | 0,965              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 64,3         | 1214,7                     | 711,7              | 1215,5                 | 503,8       | 2,411                            |                       |          |                    |                   | 5,66                                | 10,14                      | 10,4            | 0,980              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                        |             | 2,404                            |                       |          |                    | 5,98              | 9,96                                |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |              |                            |                    |                        |             |                                  |                       |          |                    |                   |                                     |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010        | Kaba Agrega % si           |                    |                        | 51,3        | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |                       |          |                    | 2,698             | OPTİMUM BİTÜM % Si                  |                            |                 | 6,06 ± 0,3         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70        | İnce Agrega % si           |                    |                        | 41,9        | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |                       |          |                    | 2,729             | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |                            |                 | 2,368              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28         | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |                    |                        | 6,8         | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |                       |          |                    | 2,693             | STABİLİTE ( " " )                   |                            |                 | 9,31               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,710        | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ.(Gsb)    |                    |                        | 2,690       | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |                       |          |                    | 2,754             | AKMA ( " " )                        |                            |                 | 5,10               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          |       |      |      |              | Filler % si                |                    |                        | 3,8         | (Filler+SK) Zahiri Öz. Ağ. (Gfa) |                       |          |                    | 2,609             | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |                            |                 | 76,40              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          |       |      |      |              | Sönmüş Kireç % si          |                    |                        | 3           | Birikteteki Agrega Miktarı       |                       |          |                    | 1150              | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |                            |                 | 3,91               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          |       |      |      |              |                            |                    |                        |             |                                  |                       |          |                    |                   | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |                            |                 | 16,58              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          |       |      |      |              |                            |                    |                        |             |                                  |                       |          |                    |                   | MARSHALL ORANI                      |                            |                 | 1,83               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          |       |      |      |              |                            |                    |                        |             |                                  |                       |          |                    |                   | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |                            |                 | 2,472              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

### A-8 Marshall Deney Formu (Dizayn No 8)

| SK Oranı                 |       |                            |      | %3,5         |                                  |                    |                         |                                     |                   |                       |          |                    |                   |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------|-------|----------------------------|------|--------------|----------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|----------|--------------------|-------------------|-----------|----------------------------|-----------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bir. No                  | Bitüm |                            |      | Bir. Yük. mm | Havadaki Ağırl. (gr)             | Sudaki Ağırl. (gr) | Doy. Yüz. K.Ağırl. (gr) | Hacim (cm3)                         | Hac. Özg. Ağırlık | Max. Teo. Öz. Ağırlık | Boşluk % | Agr.Arası Boşluk % | Asf.Dolu Boşluk % | Akma (mm) | Düzeltilmiş Stabilite (kN) | Stabilite giriş | Düzeltilme Faktörü | FORMÜLLER                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          | Wa    | Wb                         | (gr) | Ort.         | A                                | C                  | B                       | V                                   | DP                | DT                    | Vh       | VMA                | Vf                |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 1                        | 4,0   | 3,85                       | 46,0 | 66,6         | 1176,9                           | 677,8              | 1184,6                  | 506,8                               | 2,322             | 2,544                 | 8,65     | 16,87              | 48,71             | 2,77      | 8,94                       | 9,6             | 0,927              | $V = B - C$ $D_p = \frac{A}{V}$ $D_T = \frac{(100+W_a)}{100 + \frac{W_a}{G_{ef}} + \frac{G_b}{G_b}}$ $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$ $G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ $VMA = 100 - \frac{D_p \times (100 - W_b)}{G_{sb}}$ $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$ $P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} \times G_{sb})} \times G_b$ |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 2                        | 4,0   | 3,85                       | 46,0 | 67,0         | 1177,9                           | 681,3              | 1186,9                  | 505,6                               | 2,330             |                       |          |                    |                   | 3,11      | 9,01                       | 9,8             | 0,918              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 3                        | 4,0   | 3,85                       | 46,0 | 68,0         | 1178,4                           | 681,8              | 1189,8                  | 508,0                               | 2,320             |                       |          |                    |                   | 3,43      | 7,87                       | 8,8             | 0,894              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |              |                                  |                    |                         |                                     | 2,324             |                       |          |                    | 3,10              | 8,61      |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 5                        | 4,5   | 4,31                       | 51,8 | 66,4         | 1186,0                           | 688,9              | 1194,4                  | 505,5                               | 2,346             | 2,526                 | 7,21     | 16,57              | 56,49             | 3,08      | 8,22                       | 8,8             | 0,932              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 6                        | 4,5   | 4,31                       | 51,8 | 66,6         | 1190,0                           | 693,1              | 1201,8                  | 508,7                               | 2,339             |                       |          |                    |                   | 4,23      | 9,45                       | 10,2            | 0,927              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 7                        | 4,5   | 4,31                       | 51,8 | 66,5         | 1187,7                           | 691,1              | 1197,5                  | 506,4                               | 2,345             |                       |          |                    |                   | 3,72      | 9,49                       | 10,2            | 0,930              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |              |                                  |                    |                         |                                     | 2,344             |                       |          |                    | 3,68              | 9,05      |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 9                        | 5,0   | 4,76                       | 57,5 | 66,6         | 1195,0                           | 693,8              | 1201,7                  | 507,9                               | 2,353             | 2,508                 | 5,94     | 16,43              | 63,82             | 4,87      | 8,83                       | 9,5             | 0,927              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ $VMA = 100 - \frac{D_p \times (100 - W_b)}{G_{sb}}$ $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$ $P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} \times G_{sb})} \times G_b$ |
| 10                       | 5,0   | 4,76                       | 57,5 | 66,8         | 1198,6                           | 696,8              | 1204,7                  | 507,9                               | 2,360             |                       |          |                    |                   | 4,22      | 9,30                       | 10,1            | 0,922              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 11                       | 5,0   | 4,76                       | 57,5 | 65,8         | 1198,0                           | 697,5              | 1204,4                  | 506,9                               | 2,363             |                       |          |                    |                   | 4,47      | 8,65                       | 9,2             | 0,945              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |              |                                  |                    |                         |                                     | 2,359             |                       |          |                    | 4,52              | 8,93      |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 13                       | 5,5   | 5,21                       | 63,3 | 65,4         | 1206,0                           | 700,5              | 1209,3                  | 508,8                               | 2,370             | 2,490                 | 4,71     | 16,33              | 71,14             | 4,22      | 8,98                       | 9,4             | 0,953              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 14                       | 5,5   | 5,21                       | 63,3 | 65,3         | 1206,1                           | 701,8              | 1208,5                  | 506,7                               | 2,380             |                       |          |                    |                   | 4,33      | 9,59                       | 10,0            | 0,955              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 15                       | 5,5   | 5,21                       | 63,3 | 65,6         | 1208,3                           | 700,6              | 1210,8                  | 510,2                               | 2,368             |                       |          |                    |                   | 3,05      | 8,46                       | 8,9             | 0,949              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |              |                                  |                    |                         |                                     | 2,373             |                       |          |                    | 3,87              | 9,01      |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 17                       | 6,0   | 5,66                       | 69,0 | 65,6         | 1209,1                           | 703,3              | 1210,2                  | 506,9                               | 2,385             | 2,473                 | 3,61     | 16,34              | 77,90             | 3,56      | 7,39                       | 7,8             | 0,949              | $G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ $VMA = 100 - \frac{D_p \times (100 - W_b)}{G_{sb}}$ $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$ $P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} \times G_{sb})} \times G_b$                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 18                       | 6,0   | 5,66                       | 69,0 | 65,6         | 1213,6                           | 703,4              | 1214,6                  | 511,2                               | 2,374             |                       |          |                    |                   | 4,88      | 8,86                       | 9,3             | 0,949              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 19                       | 6,0   | 5,66                       | 69,0 | 65,5         | 1212,9                           | 707,2              | 1214,2                  | 507,0                               | 2,392             |                       |          |                    |                   | 4,20      | 8,09                       | 8,5             | 0,951              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |              |                                  |                    |                         |                                     | 2,384             |                       |          |                    | 4,21              | 8,11      |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 21                       | 6,5   | 6,10                       | 74,8 | 65,4         | 1218,4                           | 709,5              | 1218,3                  | 508,8                               | 2,395             | 2,456                 | 2,22     | 16,10              | 86,21             | 4,38      | 8,06                       | 8,5             | 0,953              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 22                       | 6,5   | 6,10                       | 74,8 | 65,1         | 1220,2                           | 712,1              | 1219,8                  | 507,7                               | 2,403             |                       |          |                    |                   | 4,60      | 9,25                       | 9,6             | 0,960              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 23                       | 6,5   | 6,10                       | 74,8 | 64,5         | 1217,4                           | 711,7              | 1217,3                  | 505,6                               | 2,408             |                       |          |                    |                   | 4,95      | 9,00                       | 9,2             | 0,975              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ORTALAMA                 |       |                            |      |              |                                  |                    |                         |                                     | 2,402             |                       |          |                    | 4,64              | 8,77      |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| DENEY SONUÇLARI          |       |                            |      |              |                                  |                    |                         |                                     |                   |                       |          |                    |                   |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     | 1,010 | Kaba Agrega % si           |      | 51,3         | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |                    | 2,698                   | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                  |                   | 5,60                  | ± 0,3    |                    |                   |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Bitümün Penetrasyonu     | 50-70 | İnce Agrega % si           |      | 41,9         | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |                    | 2,729                   | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |                   | 2,374                 |          |                    |                   |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     | 0,28  | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |      | 6,8          | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |                    | 2,693                   | STABİLİTE ( " " )                   |                   | 8,75                  |          |                    |                   |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) | 2,709 | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ. (Gsb)   |      | 2,688        | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |                    | 2,754                   | AKMA ( " " )                        |                   | 4,27                  |          |                    |                   |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          |       | Filler % si                |      | 3,3          | (Filler+SK) Zahiri Öz. Ağ. (Gfa) |                    | 2,586                   | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |                   | 72,00                 |          |                    |                   |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          |       | Sönmüş Kireç % si          |      | 3,5          | Biriketteki Agrega Miktarı       |                    | 1150                    | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |                   | 4,50                  |          |                    |                   |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          |       |                            |      |              |                                  |                    |                         | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |                   | 16,26                 |          |                    |                   |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          |       |                            |      |              |                                  |                    |                         | MARSHALL ORANI                      |                   | 2,05                  |          |                    |                   |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                          |       |                            |      |              |                                  |                    |                         | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |                   | 2,487                 |          |                    |                   |           |                            |                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                           |

### A-9 Marshall Deney Formu (Dizayn No 9)

| SK Oranı                 |       |      |      | %4       |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                    | FORMÜLLER |             |           |                                                                                  |                                                                   |
|--------------------------|-------|------|------|----------|----------------------------|-------------|--------------|-------|----------------------------------|-------------|--------|-----------|----------|------------------------------------|-----------|-------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Bir.                     | Bitüm |      |      | Bir.Yük. | Havadaki                   | Sudaki      | Doy. Yüz.    | Hacim | Hac. Özg.                        | Max. Teo.   | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma                               |           | Düzeltilmiş | Stabilite | Düzel tme                                                                        |                                                                   |
| No                       | %     | %    |      | mm       | Ağırl. (gr)                | Ağırl. (gr) | K.Ağırl.(gr) | (cm3) | Ağırlık                          | Öz. Ağırlık | %      | Boşluk %  | Boşluk % | (mm)                               |           | Stabilite   | giriş     | Faktörü                                                                          |                                                                   |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.     | A                          | C           | B            | V     | DP                               | DT          | Vh     | VMA       | Vf       |                                    |           | (kN)        |           |                                                                                  |                                                                   |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,5     | 1157,4                     | 660,2       | 1160,9       | 500,7 | 2,312                            | 2,543       | 9,13   | 17,30     | 47,25    | 2,95                               | 11,40     | 12,3        | 0,930     | $V = B - C$                                                                      |                                                                   |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 67,9     | 1156,0                     | 659,4       | 1160,5       | 501,1 | 2,307                            |             |        |           |          | 4,47                               | 9,68      | 10,8        | 0,897     |                                                                                  |                                                                   |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,4     | 1177,6                     | 672,5       | 1181,3       | 508,8 | 2,314                            |             |        |           |          | 3,15                               | 12,64     | 13,6        | 0,932     |                                                                                  |                                                                   |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,311                            | 2,525       | 7,54   | 16,86     | 55,30    | 3,52                               | 11,24     |             |           | $D_p = \frac{A}{V}$                                                              |                                                                   |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 67,1     | 1187,6                     | 687,3       | 1193,2       | 505,9 | 2,347                            |             |        |           |          | 2,34                               | 11,41     | 12,5        | 0,915     |                                                                                  |                                                                   |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 67,1     | 1169,3                     | 672,1       | 1176,0       | 503,9 | 2,321                            |             |        |           |          | 4,83                               | 9,60      | 10,5        | 0,915     |                                                                                  |                                                                   |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 66,6     | 1187,1                     | 684,5       | 1192,8       | 508,3 | 2,335                            |             |        |           |          | 3,15                               | 11,87     | 12,8        | 0,927     |                                                                                  |                                                                   |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,334                            | 2,507       | 6,26   | 16,70     | 62,55    | 3,44                               | 10,96     |             |           | $D_T = \frac{(100+W_a)}{100 + \frac{W_a}{G_{ef} + G_b}}$                         |                                                                   |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,8     | 1197,2                     | 693,1       | 1202,2       | 509,1 | 2,352                            |             |        |           |          | 2,91                               | 10,67     | 11,3        | 0,945     |                                                                                  |                                                                   |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 66,1     | 1195,2                     | 693,1       | 1201,2       | 508,1 | 2,352                            |             |        |           |          | 3,96                               | 10,84     | 11,6        | 0,938     |                                                                                  |                                                                   |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,9     | 1188,8                     | 688,9       | 1195,6       | 506,7 | 2,346                            |             |        |           |          | 5,08                               | 9,62      | 10,2        | 0,943     |                                                                                  |                                                                   |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,350                            | 2,489       | 4,76   | 16,36     | 70,92    | 3,98                               | 10,38     |             |           | $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$                                         |                                                                   |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 65,2     | 1201,8                     | 700,5       | 1205,9       | 505,4 | 2,378                            |             |        |           |          | 4,38                               | 10,39     | 10,9        | 0,957     |                                                                                  |                                                                   |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 65,2     | 1195,2                     | 693,6       | 1199,3       | 505,7 | 2,363                            |             |        |           |          | 5,02                               | 9,75      | 10,2        | 0,957     |                                                                                  |                                                                   |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,1     | 1205,6                     | 701,8       | 1210,2       | 508,4 | 2,371                            |             |        |           |          | 6,72                               | 9,27      | 9,9         | 0,938     |                                                                                  |                                                                   |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,371                            | 2,472       | 2,88   | 15,70     | 81,64    | 5,37                               | 9,80      |             |           | $G_{sb} = \frac{100}{K\% + \frac{I\%}{G_k} + \frac{F\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ |                                                                   |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 63,6     | 1210,9                     | 710,7       | 1211,3       | 500,6 | 2,419                            |             |        |           |          | 4,16                               | 11,91     | 11,9        | 0,998     |                                                                                  |                                                                   |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 64,7     | 1211,4                     | 706,7       | 1212,4       | 505,7 | 2,395                            |             |        |           |          | 4,13                               | 10,06     | 10,4        | 0,970     |                                                                                  |                                                                   |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 65,2     | 1211,7                     | 706,4       | 1213,7       | 507,3 | 2,389                            |             |        |           |          | 5,45                               | 9,41      | 9,8         | 0,957     |                                                                                  |                                                                   |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,401                            | 2,456       | 2,46   | 16,30     | 84,91    | 4,58                               | 10,46     |             |           | $VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$                                   |                                                                   |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 65,2     | 1214,5                     | 706,9       | 1215,3       | 508,4 | 2,389                            |             |        |           |          | 4,17                               | 9,05      | 9,5         | 0,957     |                                                                                  |                                                                   |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 64,5     | 1216,7                     | 710,0       | 1217,2       | 507,2 | 2,399                            |             |        |           |          | 6,59                               | 9,77      | 10,0        | 0,975     |                                                                                  |                                                                   |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 64,7     | 1215,2                     | 708,9       | 1215,7       | 506,8 | 2,398                            |             |        |           |          | 5,21                               | 8,98      | 9,3         | 0,970     |                                                                                  |                                                                   |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,395                            |             |        |           |          |                                    |           |             |           | $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$                                         | $P_{ba} = 100x \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_b$ |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |          |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                    |           |             |           |                                                                                  |                                                                   |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010    | Kaba Agrega % si           |             |              | 51,3  | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |             |        |           | 2,698    | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                 |           |             |           | 5,39 ± 0,3                                                                       |                                                                   |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70    | İnce Agrega % si           |             |              | 41,9  | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |             |        |           | 2,729    | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )        |           |             |           | 2,371                                                                            |                                                                   |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28     | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |             |              | 6,8   | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |             |        |           | 2,693    | STABİLİTE ( " " )                  |           |             |           | 10,24                                                                            |                                                                   |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,707    | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ.(Gsb)    |             |              | 2,687 | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |             |        |           | 2,754    | AKMA ( " " )                       |           |             |           | 4,55                                                                             |                                                                   |
|                          |       |      |      |          | Filler % si                |             |              | 2,8   | (Filler+SK) Zahiri Öz. Ağ. (Gfa) |             |        |           | 2,571    | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )         |           |             |           | 70,03                                                                            |                                                                   |
|                          |       |      |      |          | Sönmüş Kireç % si          |             |              | 4     | Biriketteki Agrega Miktarı       |             |        |           | 1150     | BOŞLUK % Sİ ( " " )                |           |             |           | 4,84                                                                             |                                                                   |
|                          |       |      |      |          |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | AGR. ARASI BOŞ. % Sİ (VMA) ( " " ) |           |             |           | 16,25                                                                            |                                                                   |
|                          |       |      |      |          |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MARSHALL ORANI                     |           |             |           | 2,25                                                                             |                                                                   |
|                          |       |      |      |          |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )          |           |             |           | 2,493                                                                            |                                                                   |

### A-10 Marshall Deney Formu (Dizayn No 10)

| SK Oranı                 |       |      |      | %4,5         |                            |                    |                         |             |                                  |                       |          |                    |                   |                                     |                            |                 |                    |                                                                            |
|--------------------------|-------|------|------|--------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|-------------|----------------------------------|-----------------------|----------|--------------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Bir. No                  | Bitüm |      |      | Bir. Yük. mm | Havadaki Ağırl. (gr)       | Sudaki Ağırl. (gr) | Doy. Yüz. K.Ağırl. (gr) | Hacim (cm3) | Hac. Özğ. Ağırlık                | Max. Teo. Öz. Ağırlık | Boşluk % | Agr.Arası Boşluk % | Asf.Dolu Boşluk % | Akma (mm)                           | Düzeltilmiş Stabilité (kN) | Stabilite giriş | Düzeltilme Faktörü | FORMÜLLER                                                                  |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.         | A                          | C                  | B                       | V           | DP                               | DT                    | Vh       | VMA                | Vf                |                                     |                            |                 |                    |                                                                            |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 66,5         | 1150,3                     | 657,6              | 1156,4                  | 498,8       | 2,306                            | 2,539                 | 9,39     | 17,52              | 46,43             | 2,90                                | 10,18                      | 11,0            | 0,930              | $V = B - C$ $D_p = \frac{A}{V}$                                            |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,0         | 1170,4                     | 670,7              | 1181,1                  | 510,4       | 2,293                            |                       |          |                    |                   | 4,80                                | 8,61                       | 9,6             | 0,894              |                                                                            |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 67,1         | 1132,6                     | 648,1              | 1140,1                  | 492,0       | 2,302                            |                       |          |                    |                   | 2,58                                | 8,93                       | 9,8             | 0,915              |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                         |             | 2,300                            |                       |          |                    |                   | 3,43                                | 9,24                       |                 |                    |                                                                            |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 67,0         | 1180,5                     | 685,2              | 1192,7                  | 507,5       | 2,326                            | 2,520                 | 7,64     | 16,93              | 54,90             | 2,76                                | 9,67                       | 10,5            | 0,918              | $D_T = \frac{(100+W_a)}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}}$             |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 68,0         | 1183,9                     | 686,5              | 1196,0                  | 509,5       | 2,324                            |                       |          |                    |                   | 3,83                                | 9,29                       | 10,4            | 0,894              |                                                                            |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 67,1         | 1183,2                     | 686,5              | 1193,4                  | 506,9       | 2,334                            |                       |          |                    |                   | 3,47                                | 9,07                       | 9,9             | 0,915              |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                         |             | 2,328                            |                       |          |                    |                   | 3,35                                | 9,34                       |                 |                    |                                                                            |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 65,9         | 1196,1                     | 696,7              | 1208,1                  | 511,4       | 2,339                            | 2,503                 | 6,56     | 16,96              | 61,30             | 3,08                                | 10,10                      | 10,7            | 0,943              | $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$                                   |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 66,4         | 1188,7                     | 690,8              | 1198,5                  | 507,7       | 2,341                            |                       |          |                    |                   | 2,76                                | 9,50                       | 10,2            | 0,932              |                                                                            |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 66,5         | 1192,9                     | 691,3              | 1202,2                  | 510,9       | 2,335                            |                       |          |                    |                   | 3,45                                | 8,98                       | 9,7             | 0,930              |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                         |             | 2,338                            |                       |          |                    |                   | 3,10                                | 9,53                       |                 |                    |                                                                            |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 65,0         | 1204,9                     | 698,8              | 1206,9                  | 508,1       | 2,371                            | 2,485                 | 4,92     | 16,48              | 70,16             | 5,12                                | 9,80                       | 10,2            | 0,962              | $G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,0         | 1205,1                     | 698,3              | 1210,2                  | 511,9       | 2,354                            |                       |          |                    |                   | 4,04                                | 9,05                       | 9,6             | 0,940              |                                                                            |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 65,8         | 1201,8                     | 698,0              | 1206,5                  | 508,5       | 2,363                            |                       |          |                    |                   | 5,34                                | 9,58                       | 10,1            | 0,945              |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                         |             | 2,363                            |                       |          |                    |                   | 4,83                                | 9,48                       |                 |                    |                                                                            |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 65,8         | 1212,2                     | 702,4              | 1214,9                  | 512,5       | 2,365                            | 2,468                 | 4,27     | 16,88              | 74,73             | 4,67                                | 9,37                       | 9,9             | 0,945              | $VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$                             |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 65,8         | 1206,1                     | 698,5              | 1209,6                  | 511,1       | 2,360                            |                       |          |                    |                   | 4,85                                | 8,77                       | 9,3             | 0,945              |                                                                            |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,1         | 1212,8                     | 702,0              | 1215,1                  | 513,1       | 2,364                            |                       |          |                    |                   | 3,32                                | 2,51                       | 2,7             | 0,940              |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                         |             | 2,363                            |                       |          |                    |                   | 4,28                                | 6,88                       |                 |                    |                                                                            |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 65,1         | 1219,2                     | 710,6              | 1220,3                  | 509,7       | 2,392                            | 2,452                 | 2,09     | 15,96              | 86,93             | 5,96                                | 9,61                       | 10,0            | 0,960              | $P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_b$    |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 64,6         | 1218,9                     | 712,8              | 1220,3                  | 507,5       | 2,402                            |                       |          |                    |                   | 4,29                                | 9,16                       | 9,4             | 0,972              |                                                                            |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 63,9         | 1216,1                     | 711,5              | 1216,6                  | 505,1       | 2,408                            |                       |          |                    |                   | 4,98                                | 10,28                      | 10,4            | 0,990              |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                    |                         |             | 2,400                            |                       |          |                    |                   | 5,08                                | 9,68                       |                 |                    |                                                                            |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |              |                            |                    |                         |             |                                  |                       |          |                    |                   |                                     |                            |                 |                    |                                                                            |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010        | Kaba Agrega % si           |                    |                         | 51,3        | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |                       |          |                    | 2,698             | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                  |                            |                 | 5,54               | ± 0,3                                                                      |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70        | İnce Agrega % si           |                    |                         | 41,9        | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |                       |          |                    | 2,729             | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |                            |                 | 2,355              |                                                                            |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28         | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |                    |                         | 6,8         | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |                       |          |                    | 2,693             | STABİLİTE ( " " )                   |                            |                 | 8,70               |                                                                            |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,702        | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ.(Gsb)    |                    |                         | 2,682       | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |                       |          |                    | 2,754             | AKMA ( " " )                        |                            |                 | 4,10               |                                                                            |
|                          |       |      |      |              | Filler % si                |                    |                         | 2,3         | (Filler+SK) Zahirî Öz. Ağ. (Gfa) |                       |          |                    | 2,505             | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |                            |                 | 69,00              |                                                                            |
|                          |       |      |      |              | Sönmüş Kireç % si          |                    |                         | 4,5         | Birikteteki Agrega Miktarı       |                       |          |                    | 1150              | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |                            |                 | 5,18               |                                                                            |
|                          |       |      |      |              |                            |                    |                         |             |                                  |                       |          |                    |                   | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |                            |                 | 16,65              |                                                                            |
|                          |       |      |      |              |                            |                    |                         |             |                                  |                       |          |                    |                   | MARSHALL ORANI                      |                            |                 | 2,12               |                                                                            |
|                          |       |      |      |              |                            |                    |                         |             |                                  |                       |          |                    |                   | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |                            |                 | 2,484              |                                                                            |

### A-11 Marshall Deney Formu (Dizayn No 11)

| SK Oranı                 |       |      |      | %5        |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           | FORMÜLLER  |                                                                            |
|--------------------------|-------|------|------|-----------|----------------------------|-------------|--------------|-------|----------------------------------|-------------|--------|-----------|----------|-------------------------------------|-------------|-----------|------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Bir.                     | Bitüm |      |      | Bir. Yük. | Havadaki                   | Sudaki      | Doy. Yüz.    | Hacim | Hac. Özg.                        | Max. Teo.   | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma                                | Düzeltilmiş | Stabilite | Düzeltilme |                                                                            |
| No                       | %     | %    |      | mm        | Ağırl. (gr)                | Ağırl. (gr) | K.Ağırl.(gr) | (cm3) | Ağırlık                          | Öz. Ağırlık | %      | Boşluk %  | Boşluk % |                                     | Stabilite   | giriş     | Faktörü    |                                                                            |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.      | A                          | C           | B            | V     | DP                               | DT          | Vh     | VMA       | Vf       | (mm)                                | (kN)        |           |            |                                                                            |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,2      | 1129,8                     | 645,3       | 1136,2       | 490,9 | 2,301                            | 2,535       | 9,12   | 17,27     | 47,17    | 2,33                                | 6,85        | 7,7       | 0,890      | $V = B - C$                                                                |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,5      | 1073,9                     | 615,5       | 1083,4       | 467,9 | 2,295                            |             |        |           |          | 2,10                                | 6,35        | 7,2       | 0,885      | $D_p = \frac{A}{V}$                                                        |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,9      | 1157,6                     | 667,6       | 1167,9       | 500,3 | 2,314                            |             |        |           |          | 3,64                                | 7,55        | 8,6       | 0,877      |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,303                            |             |        |           |          | 2,69                                | 6,92        |           |            |                                                                            |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 68,5      | 1179,5                     | 680,8       | 1187,9       | 507,1 | 2,326                            | 2,517       | 7,34   | 16,65     | 55,93    | 3,21                                | 8,25        | 9,3       | 0,885      | $D_T = \frac{(100+W_a)}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}}$             |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 67,2      | 1192,9                     | 700,6       | 1209,7       | 509,1 | 2,343                            |             |        |           |          | 4,29                                | 8,37        | 9,2       | 0,913      |                                                                            |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 68,2      | 1182,9                     | 689,4       | 1197,8       | 508,4 | 2,327                            |             |        |           |          | 3,25                                | 7,39        | 8,3       | 0,890      |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,332                            |             |        |           |          | 3,58                                | 8,00        |           |            |                                                                            |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 67,9      | 1201,6                     | 697,4       | 1211,2       | 513,8 | 2,339                            | 2,499       | 6,55   | 16,93     | 61,32    | 4,33                                | 8,64        | 9,6       | 0,897      | $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$                                   |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 67,2      | 1197,9                     | 693,7       | 1207,6       | 513,9 | 2,331                            |             |        |           |          | 3,69                                | 8,55        | 9,4       | 0,913      |                                                                            |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 67,6      | 1200,7                     | 697,9       | 1211,9       | 514,0 | 2,336                            |             |        |           |          | 3,87                                | 8,43        | 9,3       | 0,904      |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,335                            |             |        |           |          | 3,96                                | 8,54        |           |            |                                                                            |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,2      | 1203,5                     | 690,0       | 1209,0       | 519,0 | 2,319                            | 2,482       | 6,30   | 17,68     | 64,37    | 4,41                                | 8,45        | 9,0       | 0,936      | $G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,2      | 1200,2                     | 690,2       | 1208,3       | 518,1 | 2,317                            |             |        |           |          | 4,64                                | 7,85        | 8,4       | 0,936      |                                                                            |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,5      | 1204,5                     | 697,6       | 1212,3       | 514,7 | 2,340                            |             |        |           |          | 4,60                                | 8,05        | 8,7       | 0,930      |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,325                            |             |        |           |          | 4,55                                | 8,12        |           |            | $VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$                             |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,5      | 1210,4                     | 697,5       | 1213,6       | 516,1 | 2,345                            | 2,465       | 4,92   | 17,43     | 71,77    | 4,02                                | 8,13        | 8,7       | 0,930      | $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$                                   |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,5      | 1208,3                     | 697,0       | 1213,0       | 516,0 | 2,342                            |             |        |           |          | 6,35                                | 7,62        | 8,2       | 0,930      |                                                                            |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,6      | 1213,2                     | 699,9       | 1217,7       | 517,8 | 2,343                            |             |        |           |          | 3,72                                | 8,75        | 9,4       | 0,927      |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,343                            |             |        |           |          | 4,70                                | 8,17        |           |            |                                                                            |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 66,0      | 1218,0                     | 702,2       | 1219,7       | 517,5 | 2,354                            | 2,448       | 3,62   | 17,25     | 79,03    | 6,60                                | 8,81        | 9,4       | 0,940      | $P_{ba} = 100x \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_b$          |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 65,8      | 1212,6                     | 700,9       | 1213,0       | 512,1 | 2,368                            |             |        |           |          | 5,10                                | 8,09        | 8,6       | 0,945      |                                                                            |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 66,5      | 1217,8                     | 702,2       | 1218,9       | 516,7 | 2,357                            |             |        |           |          | 4,83                                | 8,57        | 9,2       | 0,930      |                                                                            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,359                            |             |        |           |          | 5,51                                | 8,49        |           |            |                                                                            |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                            |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010     | Kaba Agrega % si           |             |              | 51,3  | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |             |        |           | 2,698    | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                  |             |           |            | 6,16 ± 0,3                                                                 |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70     | İnce Agrega % si           |             |              | 41,9  | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |             |        |           | 2,729    | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |             |           |            | 2,342                                                                      |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28      | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |             |              | 6,8   | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |             |        |           | 2,693    | STABİLİTE ( " " )                   |             |           |            | 8,41                                                                       |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,698     | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ.(Gsb)    |             |              | 2,677 | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |             |        |           | 2,754    | AKMA ( " " )                        |             |           |            | 5,02                                                                       |
|                          |       |      |      |           | Filler % si                |             |              | 1,8   | (Filler+SK) Zahiri Öz. Ağ. (Gfa) |             |        |           | 2,448    | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |             |           |            | 72,00                                                                      |
|                          |       |      |      |           | Sönmüş Kireç % si          |             |              | 5     | Birikteteki Agrega Miktarı       |             |        |           | 1150     | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |             |           |            | 4,80                                                                       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |             |           |            | 17,32                                                                      |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MARSHALL ORANI                      |             |           |            | 1,68                                                                       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |             |           |            | 2,459                                                                      |

### A-12 Marshall Deney Formu (Dizayn No 12)

| SK Oranı                 |       |      |      | %5,5      |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            | FORMÜLLER                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------|-------|------|------|-----------|----------------------------|-------------|--------------|-------|----------------------------------|-------------|--------|-----------|----------|-------------------------------------|-------------|-----------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bir.                     | Bitüm |      |      | Bir. Yük. | Havadaki                   | Sudaki      | Doy. Yüz.    | Hacim | Hac. Özg.                        | Max. Teo.   | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma                                | Düzeltilmiş | Stabilite | Düzeltilme |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| No                       | %     | %    |      | mm        | Ağırl. (gr)                | Ağırl. (gr) | K.Ağırl.(gr) | (cm3) | Ağırlık                          | Öz. Ağırlık | %      | Boşluk %  | Boşluk % |                                     | Stabilite   | giriş     | Faktörü    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.      | A                          | C           | B            | V     | DP                               | DT          | Vh     | VMA       | Vf       | (mm)                                | (kN)        |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,3      | 1168,5                     | 658,2       | 1172,1       | 513,9 | 2,274                            | 2,541       | 10,28  | 18,34     | 43,96    | 4,09                                | 7,94        | 8,9       | 0,888      | $V = B - C$<br>$D_p = \frac{A}{V}$<br>$D_T = \frac{(100+W_a)}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}}$<br>$V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$<br>$G_{sb} = \frac{100}{\frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$<br>$VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$<br>$V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$<br>$P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_b$ |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,1      | 1166,4                     | 660,7       | 1172,5       | 511,8 | 2,279                            |             |        |           |          | 3,03                                | 7,64        | 8,6       | 0,892      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 69,3      | 1155,6                     | 659,0       | 1164,2       | 505,2 | 2,287                            |             |        |           |          | 2,48                                | 6,15        | 7,1       | 0,870      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,280                            |             |        |           |          | 3,20                                | 7,24        |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 67,7      | 1182,6                     | 680,4       | 1192,2       | 511,8 | 2,311                            | 2,523       | 8,66   | 17,87     | 51,51    | 2,92                                | 7,71        | 8,6       | 0,901      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 68,5      | 1180,8                     | 679,7       | 1194,3       | 514,6 | 2,295                            |             |        |           |          | 3,73                                | 6,98        | 7,9       | 0,885      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 68,4      | 1175,9                     | 677,2       | 1186,7       | 509,5 | 2,308                            |             |        |           |          | 3,83                                | 6,52        | 7,4       | 0,886      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,304                            |             |        |           |          | 3,49                                | 7,07        |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 68,1      | 1193,0                     | 691,4       | 1202,7       | 511,3 | 2,333                            | 2,505       | 7,15   | 17,49     | 59,13    | 3,88                                | 7,58        | 8,5       | 0,892      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 66,8      | 1191,5                     | 694,2       | 1204,1       | 509,9 | 2,337                            |             |        |           |          | 5,17                                | 8,50        | 9,2       | 0,922      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 68,3      | 1185,5                     | 684,4       | 1198,0       | 513,6 | 2,308                            |             |        |           |          | 6,08                                | 6,41        | 7,2       | 0,888      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,326                            |             |        |           |          | 5,04                                | 7,50        |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,9      | 1189,0                     | 687,2       | 1198,9       | 511,7 | 2,324                            | 2,488       | 6,09   | 17,52     | 65,26    | 4,56                                | 6,75        | 7,3       | 0,920      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,2      | 1194,4                     | 691,2       | 1200,6       | 509,4 | 2,345                            |             |        |           |          | 5,06                                | 7,29        | 7,8       | 0,936      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,4      | 1197,4                     | 694,5       | 1206,1       | 511,6 | 2,341                            |             |        |           |          | 4,18                                | 7,62        | 8,2       | 0,932      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,336                            |             |        |           |          | 4,60                                | 7,22        |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 65,7      | 1199,2                     | 693,3       | 1206,6       | 513,3 | 2,336                            | 2,471       | 5,18   | 17,68     | 70,73    | 5,36                                | 7,27        | 7,7       | 0,947      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,2      | 1204,4                     | 693,8       | 1208,1       | 514,3 | 2,342                            |             |        |           |          | 4,38                                | 7,92        | 8,5       | 0,936      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,2      | 1204,7                     | 694,6       | 1207,2       | 512,6 | 2,350                            |             |        |           |          | 4,61                                | 8,76        | 9,4       | 0,936      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,343                            |             |        |           |          | 4,78                                | 7,98        |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 65,4      | 1213,2                     | 698,8       | 1212,4       | 513,6 | 2,362                            | 2,454       | 3,59   | 17,26     | 79,18    | 4,75                                | 7,26        | 7,6       | 0,953      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 65,1      | 1211,3                     | 701,8       | 1212,2       | 510,4 | 2,373                            |             |        |           |          | 6,44                                | 8,53        | 8,9       | 0,960      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 64,5      | 1211,0                     | 701,5       | 1214,2       | 512,7 | 2,362                            |             |        |           |          | 5,38                                | 8,62        | 8,8       | 0,975      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,366                            |             |        |           |          | 5,52                                | 8,14        |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010     | Kaba Agrega % si           |             |              | 51,3  | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |             |        |           | 2,698    | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                  |             |           |            | 6,33 ± 0,3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70     | İnce Agrega % si           |             |              | 41,9  | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |             |        |           | 2,729    | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |             |           |            | 2,358                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28      | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |             |              | 6,8   | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |             |        |           | 2,693    | STABİLİTE ( " " )                   |             |           |            | 8,03                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,705     | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ.(Gsb)    |             |              | 2,685 | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |             |        |           | 2,754    | AKMA ( " " )                        |             |           |            | 5,40                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                          |       |      |      |           | Filler % si                |             |              | 1,3   | (Filler+SK) Zahiri Öz. Ağ. (Gfa) |             |        |           | 2,544    | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |             |           |            | 76,20                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                          |       |      |      |           | Sönmüş Kireç % si          |             |              | 5,5   | Biriketteki Agrega Miktarı       |             |        |           | 1150     | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |             |           |            | 4,20                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |             |           |            | 17,44                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MARSHALL ORANI                      |             |           |            | 1,49                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |             |           |            | 2,460                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

### A-13 Marshall Deney Formu (Dizayn No 13)

| SK Oranı                 |       |      |      | %6        |                            |             |              |       |           |                                  |        |           |          |       |                                     |           |           |                                                                                  | FORMÜLLER  |
|--------------------------|-------|------|------|-----------|----------------------------|-------------|--------------|-------|-----------|----------------------------------|--------|-----------|----------|-------|-------------------------------------|-----------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Bir.                     | Bitüm |      |      | Bir. Yük. | Havadaki                   | Sudaki      | Doy. Yüz.    | Hacim | Hac. Özg. | Max. Teo.                        | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma  | Düzeltilmiş                         | Stabilite | Düzel tme |                                                                                  |            |
| No                       | %     | %    |      | mm        | Ağırl. (gr)                | Ağırl. (gr) | K.Ağırl.(gr) | (cm3) | Ağırlık   | Öz. Ağırlık                      | %      | Boşluk %  | Boşluk % |       | Stabilite                           | giriş     | Faktörü   |                                                                                  |            |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.      | A                          | C           | B            | V     | DP        | DT                               | Vh     | VMA       | Vf       | (mm)  | (kN)                                |           |           |                                                                                  |            |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 67,6      | 1172,5                     | 656,8       | 1175,8       | 519,0 | 2,259     | 2,538                            | 10,89  | 18,89     | 42,34    | 3,60  | 9,86                                | 10,9      | 0,904     | $V = B - C$<br>$D_p = \frac{A}{V}$                                               |            |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,5      | 1150,0                     | 645,4       | 1153,0       | 507,6 | 2,266     |                                  |        |           |          | 2,97  | 7,96                                | 9,0       | 0,885     |                                                                                  |            |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,7      | 1161,3                     | 650,2       | 1163,8       | 513,6 | 2,261     |                                  |        |           |          | 3,02  | 6,89                                | 7,8       | 0,881     |                                                                                  |            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,262     |                                  |        |           |          | 3,20  | 8,24                                |           |           |                                                                                  |            |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 69,3      | 1183,8                     | 686,3       | 1195,5       | 509,2 | 2,325     | 2,520                            | 8,84   | 18,01     | 50,94    | 2,85  | 7,16                                | 8,2       | 0,870     | $D_T = \frac{(100+W_a)}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}}$                   |            |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 69,0      | 1160,5                     | 669,9       | 1182,9       | 513,0 | 2,262     |                                  |        |           |          | 4,55  | 8,09                                | 9,2       | 0,875     |                                                                                  |            |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 67,6      | 1176,5                     | 668,7       | 1179,0       | 510,3 | 2,306     |                                  |        |           |          | 3,06  | 8,74                                | 9,7       | 0,904     |                                                                                  |            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,298     |                                  |        |           |          | 3,49  | 8,00                                |           |           |                                                                                  |            |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 67,2      | 1183,7                     | 682,1       | 1191,4       | 509,3 | 2,324     | 2,502                            | 7,08   | 17,42     | 59,36    | 5,57  | 7,98                                | 8,7       | 0,913     | $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$                                         |            |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 68,3      | 1187,6                     | 685,0       | 1197,6       | 512,6 | 2,317     |                                  |        |           |          | 7,32  | 6,78                                | 7,6       | 0,888     |                                                                                  |            |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 66,8      | 1188,4                     | 686,0       | 1195,0       | 509,0 | 2,335     |                                  |        |           |          | 4,81  | 8,31                                | 9,0       | 0,922     |                                                                                  |            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,325     |                                  |        |           |          | 5,90  | 7,69                                |           |           |                                                                                  |            |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,5      | 1201,6                     | 697,6       | 1205,4       | 507,8 | 2,366     | 2,485                            | 5,33   | 16,84     | 68,37    | 6,07  | 8,94                                | 9,6       | 0,930     | $G_{sb} = \frac{100}{K\% + \frac{I\%}{G_k} + \frac{F\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ |            |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 65,9      | 1199,4                     | 694,7       | 1206,5       | 511,8 | 2,343     |                                  |        |           |          | 6,80  | 8,52                                | 9,0       | 0,943     |                                                                                  |            |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,3      | 1202,5                     | 696,8       | 1208,9       | 512,1 | 2,348     |                                  |        |           |          | 5,75  | 7,92                                | 8,5       | 0,934     |                                                                                  |            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,353     |                                  |        |           |          | 6,21  | 8,46                                |           |           |                                                                                  |            |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,3      | 1204,1                     | 695,2       | 1206,9       | 511,7 | 2,353     | 2,468                            | 4,90   | 17,43     | 71,90    | 5,64  | 7,96                                | 8,5       | 0,934     | $VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$                                   |            |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,6      | 1208,9                     | 699,4       | 1215,8       | 516,4 | 2,341     |                                  |        |           |          | 6,69  | 8,42                                | 9,1       | 0,927     |                                                                                  |            |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,5      | 1211,9                     | 701,5       | 1217,8       | 516,3 | 2,347     |                                  |        |           |          | 5,51  | 7,97                                | 8,6       | 0,930     |                                                                                  |            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,347     |                                  |        |           |          | 5,95  | 8,12                                |           |           |                                                                                  |            |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 65,4      | 1220,8                     | 710,3       | 1222,2       | 511,9 | 2,385     | 2,451                            | 2,80   | 16,57     | 83,08    | 6,58  | 8,60                                | 9,0       | 0,953     | $P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_b$          |            |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 65,4      | 1214,8                     | 704,5       | 1216,3       | 511,8 | 2,374     |                                  |        |           |          | 6,43  | 8,62                                | 9,0       | 0,953     |                                                                                  |            |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 65,5      | 1221,5                     | 710,9       | 1222,1       | 511,2 | 2,389     |                                  |        |           |          | 7,04  | 8,03                                | 8,4       | 0,951     |                                                                                  |            |
| ORTALAMA                 |       |      |      |           |                            |             |              |       | 2,383     |                                  |        |           |          | 6,68  | 8,42                                |           |           |                                                                                  |            |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |           |                            |             |              |       |           |                                  |        |           |          |       |                                     |           |           |                                                                                  |            |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010     | Kaba Agrega % si           |             |              |       | 51,3      | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |        |           |          | 2,698 | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                  |           |           |                                                                                  | 6,23 ± 0,3 |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70     | İnce Agrega % si           |             |              |       | 41,9      | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |        |           |          | 2,729 | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |           |           |                                                                                  | 3,366      |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28      | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |             |              |       | 6,8       | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |        |           |          | 2,693 | STABİLİTE ( " " )                   |           |           |                                                                                  | 8,30       |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,702     | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ. (Gsb)   |             |              |       | 2,682     | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |        |           |          | 2,754 | AKMA ( " " )                        |           |           |                                                                                  | 6,52       |
|                          |       |      |      |           | Filler % si                |             |              |       | 0,8       | (Filler+SK) Zahirî Öz. Ağ. (Gfa) |        |           |          | 2,501 | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |           |           |                                                                                  | 77,00      |
|                          |       |      |      |           | Sönmüş Kireç % si          |             |              |       | 6         | Biriktetki Agrega Miktarı        |        |           |          | 1150  | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |           |           |                                                                                  | 3,90       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |           |                                  |        |           |          |       | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |           |           |                                                                                  | 16,78      |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |           |                                  |        |           |          |       | MARSHALL ORANI                      |           |           |                                                                                  | 1,27       |
|                          |       |      |      |           |                            |             |              |       |           |                                  |        |           |          |       | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |           |           |                                                                                  | 2,460      |

### A-14 Marshall Deney Formu (Dizayn No 14)

| SK Oranı                 |       |      |      | %6,5         |                            |                   |                        |             |                                  |                       |          |                    |                   |                                     |                            |                 |                    |                                                                                  |
|--------------------------|-------|------|------|--------------|----------------------------|-------------------|------------------------|-------------|----------------------------------|-----------------------|----------|--------------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Bir. No                  | Bitüm |      |      | Bir. Yük. mm | Havadaki Ağrl. (gr)        | Sudaki Ağrl. (gr) | Doy. Yüz. K.Ağrl. (gr) | Hacim (cm3) | Hac. Özğ. Ağırlık                | Max. Teo. Öz. Ağırlık | Boşluk % | Agr.Arası Boşluk % | Asf.Dolu Boşluk % | Akma (mm)                           | Düzeltilmiş Stabilite (kN) | Stabilite giriş | Düzeltilme Faktörü | FORMÜLLER                                                                        |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.         | A                          | C                 | B                      | V           | DP                               | DT                    | Vh       | VMA                | Vf                |                                     |                            |                 |                    |                                                                                  |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,7         | 1161,6                     | 652,9             | 1163,5                 | 510,6       | 2,275                            | 2,538                 | 10,62    | 18,64              | 43,04             | 2,98                                | 9,99                       | 11,3            | 0,881              | $V = B - C$                                                                      |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 69,1         | 1170,9                     | 657,5             | 1173,7                 | 516,2       | 2,268                            |                       |          |                    |                   | 3,96                                | 8,15                       | 9,3             | 0,874              |                                                                                  |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,6         | 1168,3                     | 656,4             | 1173,1                 | 516,7       | 2,261                            |                       |          |                    |                   | 2,32                                | 7,73                       | 8,8             | 0,883              |                                                                                  |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                   |                        |             | 2,268                            |                       |          |                    |                   | 3,09                                | 8,62                       |                 |                    | $D_p = \frac{A}{V}$                                                              |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 68,7         | 1186,5                     | 669,3             | 1192,3                 | 523,0       | 2,269                            | 2,519                 | 9,44     | 18,55              | 49,12             | 3,17                                | 8,48                       | 9,6             | 0,881              |                                                                                  |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 68,6         | 1188,1                     | 673,9             | 1194,0                 | 520,1       | 2,284                            |                       |          |                    |                   | 4,50                                | 8,68                       | 9,8             | 0,883              |                                                                                  |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 69,0         | 1187,1                     | 676,7             | 1194,7                 | 518,0       | 2,292                            |                       |          |                    |                   | 2,63                                | 8,62                       | 9,9             | 0,875              |                                                                                  |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                   |                        |             | 2,282                            |                       |          |                    |                   | 3,43                                | 8,59                       |                 |                    | $D_T = \frac{(100+W_a)}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}}$                   |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 68,1         | 1198,2                     | 692,9             | 1210,3                 | 517,4       | 2,316                            | 2,502                 | 7,53     | 17,82              | 57,72             | 4,88                                | 8,39                       | 9,4             | 0,892              |                                                                                  |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 67,8         | 1194,4                     | 690,5             | 1205,3                 | 514,8       | 2,320                            |                       |          |                    |                   | 3,81                                | 9,27                       | 10,3            | 0,899              |                                                                                  |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 68,4         | 1195,4                     | 689,3             | 1208,3                 | 519,0       | 2,303                            |                       |          |                    |                   | 3,11                                | 8,74                       | 9,9             | 0,886              |                                                                                  |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                   |                        |             | 2,313                            |                       |          |                    |                   | 3,93                                | 8,80                       |                 |                    | $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$                                         |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 67,8         | 1204,2                     | 693,5             | 1213,2                 | 519,7       | 2,317                            | 2,484                 | 6,68     | 18,03              | 62,94             | 4,88                                | 8,14                       | 9,1             | 0,899              |                                                                                  |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 67,5         | 1203,5                     | 693,4             | 1213,6                 | 520,2       | 2,314                            |                       |          |                    |                   | 3,81                                | 7,95                       | 8,8             | 0,906              |                                                                                  |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 66,5         | 1191,0                     | 688,1             | 1200,6                 | 512,5       | 2,324                            |                       |          |                    |                   | 3,11                                | 7,87                       | 8,5             | 0,930              |                                                                                  |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                   |                        |             | 2,318                            |                       |          |                    |                   | 3,93                                | 7,99                       |                 |                    | $G_{sb} = \frac{100}{K\% + \frac{I\%}{G_k} + \frac{F\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}$ |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,7         | 1207,6                     | 695,6             | 1212,8                 | 517,2       | 2,335                            | 2,467                 | 5,50     | 17,94              | 69,36             | 4,26                                | 8,27                       | 8,9             | 0,925              |                                                                                  |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 67,4         | 1210,7                     | 697,4             | 1218,5                 | 521,1       | 2,323                            |                       |          |                    |                   | 4,60                                | 7,55                       | 8,3             | 0,908              |                                                                                  |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,3         | 1206,9                     | 696,2             | 1212,8                 | 516,6       | 2,336                            |                       |          |                    |                   | 3,64                                | 7,56                       | 8,1             | 0,934              |                                                                                  |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                   |                        |             | 2,331                            |                       |          |                    |                   | 4,17                                | 7,79                       |                 |                    | $VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$                                   |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 66,1         | 1218,1                     | 705,6             | 1219,2                 | 513,6       | 2,372                            | 2,451                 | 3,19     | 16,89              | 81,14             | 4,47                                | 8,34                       | 8,9             | 0,938              |                                                                                  |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 65,8         | 1217,3                     | 703,9             | 1218,3                 | 514,4       | 2,366                            |                       |          |                    |                   | 3,38                                | 8,42                       | 8,9             | 0,945              |                                                                                  |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 65,3         | 1216,8                     | 706,8             | 1218,2                 | 511,4       | 2,379                            |                       |          |                    |                   | 4,74                                | 8,50                       | 8,9             | 0,955              |                                                                                  |
| ORTALAMA                 |       |      |      |              |                            |                   |                        |             | 2,372                            |                       |          |                    |                   | 4,20                                | 8,42                       |                 |                    | $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$                                         |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |              |                            |                   |                        |             |                                  |                       |          |                    |                   |                                     |                            |                 |                    |                                                                                  |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010        | Kaba Agrega % si           |                   |                        | 51,3        | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |                       |          |                    | 2,698             | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                  |                            |                 |                    | 5,74 ± 0,3                                                                       |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70        | İnce Agrega % si           |                   |                        | 41,9        | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |                       |          |                    | 2,729             | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |                            |                 |                    | 2,324                                                                            |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28         | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |                   |                        | 6,8         | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |                       |          |                    | 2,693             | STABİLİTE ( " " )                   |                            |                 |                    | 8,12                                                                             |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,701        | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ.(Gsb)    |                   |                        | 2,681       | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |                       |          |                    | 2,754             | AKMA ( " " )                        |                            |                 |                    | 4,11                                                                             |
|                          |       |      |      |              | Filler % si                |                   |                        | 0,3         | (Filler+SK) Zahirî Öz. Ağ. (Gfa) |                       |          |                    | 2,488             | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |                            |                 |                    | 66,00                                                                            |
|                          |       |      |      |              | Sönmüş Kireç % si          |                   |                        | 6,5         | Biriketteki Agrega Miktarı       |                       |          |                    | 1150              | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |                            |                 |                    | 6,10                                                                             |
|                          |       |      |      |              |                            |                   |                        |             |                                  |                       |          |                    |                   | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |                            |                 |                    | 17,94                                                                            |
|                          |       |      |      |              |                            |                   |                        |             |                                  |                       |          |                    |                   | MARSHALL ORANI                      |                            |                 |                    | 1,98                                                                             |
|                          |       |      |      |              |                            |                   |                        |             |                                  |                       |          |                    |                   | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |                            |                 |                    | 2,476                                                                            |

### A-15 Marshall Deney Formu (Dizayn No 15)

| SK Oranı                 |       |      |      | %6,8     |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                |       |  | FORMÜLLER |
|--------------------------|-------|------|------|----------|----------------------------|-------------|--------------|-------|----------------------------------|-------------|--------|-----------|----------|-------------------------------------|-------------|-----------|------------|----------------------------------------------------------------|-------|--|-----------|
| Bir.                     | Bitüm |      |      | Bir.Yük. | Havadaki                   | Sudaki      | Doy. Yüz.    | Hacim | Hac. Özg.                        | Max. Teo.   | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma                                | Düzeltilmiş | Stabilite | Düzeltilme |                                                                |       |  |           |
| No                       | %     | %    |      | mm       | Ağırl. (gr)                | Ağırl. (gr) | K.Ağırl.(gr) | (cm3) | Ağırlık                          | Öz. Ağırlık | %      | Boşluk %  | Boşluk % | (mm)                                | Stabilite   | giriş     | Faktörü    |                                                                |       |  |           |
|                          | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.     | A                          | C           | B            | V     | DP                               | DT          | Vh     | VMA       | Vf       | (mm)                                | (kN)        |           |            |                                                                |       |  |           |
| 1                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,0     | 1161,4                     | 653,4       | 1163,0       | 509,6 | 2,279                            | 2,533       | 10,01  | 18,07     | 44,62    | 2,22                                | 8,03        | 9,0       | 0,894      | $V = B - C$                                                    |       |  |           |
| 2                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 69,4     | 1159,8                     | 655,6       | 1162,7       | 507,1 | 2,287                            |             |        |           |          | 1,98                                | 7,38        | 8,5       | 0,868      | $D_p = \frac{A}{V}$                                            |       |  |           |
| 3                        | 4,0   | 3,85 | 46,0 | 68,7     | 1161,7                     | 653,4       | 1164,8       | 511,4 | 2,272                            |             |        |           |          | 1,94                                | 7,62        | 8,7       | 0,881      |                                                                |       |  |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,279                            |             |        |           |          | 2,05                                | 7,68        |           |            |                                                                |       |  |           |
| 5                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 69,7     | 1186,1                     | 674,5       | 1191,4       | 516,9 | 2,295                            | 2,515       | 8,94   | 18,09     | 50,56    | 2,91                                | 8,96        | 10,4      | 0,862      | $D_T = \frac{(100+W_a)}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{a}{G_b}}$   |       |  |           |
| 6                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 69,0     | 1182,7                     | 668,5       | 1187,3       | 518,8 | 2,280                            |             |        |           |          | 2,81                                | 9,21        | 10,5      | 0,875      |                                                                |       |  |           |
| 7                        | 4,5   | 4,31 | 51,8 | 69,1     | 1188,5                     | 677,6       | 1195,5       | 517,9 | 2,295                            |             |        |           |          | 2,82                                | 8,56        | 9,8       | 0,874      |                                                                |       |  |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,290                            |             |        |           |          | 2,85                                | 8,91        |           |            |                                                                |       |  |           |
| 9                        | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 68,5     | 1197,4                     | 689,4       | 1206,4       | 517,0 | 2,316                            | 2,497       | 7,44   | 17,72     | 57,99    | 6,34                                | 8,53        | 9,6       | 0,885      | $V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$                       |       |  |           |
| 10                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 67,6     | 1188,0                     | 687,0       | 1199,2       | 512,2 | 2,319                            |             |        |           |          | 3,47                                | 9,38        | 10,4      | 0,904      |                                                                |       |  |           |
| 11                       | 5,0   | 4,76 | 57,5 | 68,3     | 1196,8                     | 684,8       | 1205,7       | 520,9 | 2,298                            |             |        |           |          | 3,79                                | 8,25        | 9,3       | 0,888      |                                                                |       |  |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,311                            |             |        |           |          | 4,53                                | 8,72        |           |            |                                                                |       |  |           |
| 13                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 67,9     | 1200,8                     | 693,6       | 1211,0       | 517,4 | 2,321                            | 2,480       | 6,24   | 17,62     | 64,57    | 5,13                                | 8,61        | 9,6       | 0,897      | $G_{sb} = \frac{100}{K\% + \frac{I\%}{G_k} + \frac{F\%}{G_f}}$ |       |  |           |
| 14                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 67,8     | 1201,0                     | 693,1       | 1209,9       | 516,8 | 2,324                            |             |        |           |          | 3,66                                | 8,28        | 9,2       | 0,899      |                                                                |       |  |           |
| 15                       | 5,5   | 5,21 | 63,3 | 67,7     | 1205,3                     | 697,2       | 1214,6       | 517,4 | 2,330                            |             |        |           |          | 5,69                                | 8,51        | 9,4       | 0,901      |                                                                |       |  |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,325                            |             |        |           |          | 4,83                                | 8,47        |           |            |                                                                |       |  |           |
| 17                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 67,2     | 1212,3                     | 697,5       | 1215,6       | 518,1 | 2,340                            | 2,463       | 4,88   | 17,38     | 71,93    | 4,44                                | 8,66        | 9,5       | 0,913      | $VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$                 |       |  |           |
| 18                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 66,9     | 1210,4                     | 697,1       | 1213,8       | 516,7 | 2,343                            |             |        |           |          | 4,18                                | 8,81        | 9,6       | 0,920      |                                                                |       |  |           |
| 19                       | 6,0   | 5,66 | 69,0 | 67,5     | 1211,2                     | 698,3       | 1214,8       | 516,5 | 2,345                            |             |        |           |          | 4,02                                | 8,29        | 9,2       | 0,906      |                                                                |       |  |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,342                            |             |        |           |          | 4,21                                | 8,59        |           |            |                                                                |       |  |           |
| 21                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 66,0     | 1217,3                     | 706,7       | 1218,3       | 511,6 | 2,379                            | 2,446       | 2,96   | 16,68     | 82,23    | 5,87                                | 8,74        | 9,3       | 0,940      | $V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$                       |       |  |           |
| 22                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 66,1     | 1217,1                     | 704,8       | 1218,0       | 513,2 | 2,372                            |             |        |           |          | 3,69                                | 8,82        | 9,4       | 0,938      |                                                                |       |  |           |
| 23                       | 6,5   | 6,10 | 74,8 | 66,4     | 1217,0                     | 703,8       | 1217,3       | 513,5 | 2,370                            |             |        |           |          | 3,36                                | 8,68        | 9,3       | 0,932      |                                                                |       |  |           |
| ORTALAMA                 |       |      |      |          |                            |             |              |       | 2,374                            |             |        |           |          | 4,31                                | 8,75        |           |            |                                                                |       |  |           |
| DENEY SONUÇLARI          |       |      |      |          |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          |                                     |             |           |            |                                                                |       |  |           |
| Bitümün Öz. Ağ. (Gb)     |       |      |      | 1,010    | Kaba Agrega % si           |             |              | 51,3  | Kaba Agr.Hac.Öz.Ağ.(Gkb)         |             |        |           | 2,698    | OPTİMUM BİTÜM % Sİ                  |             |           |            | 6,10                                                           | ± 0,3 |  |           |
| Bitümün Penetrasyonu     |       |      |      | 50-70    | İnce Agrega % si           |             |              | 41,9  | Kaba Agr.Zah.Öz.Ağ.(Gka)         |             |        |           | 2,729    | PRATİK ÖZ. AĞ. ( Opt.Bit. )         |             |           |            | 2,35                                                           |       |  |           |
| Agr.Bitüm Abs. (Pba)     |       |      |      | 0,28     | (Filler+Sönmüş Kireç) % si |             |              | 6,8   | İnce Agr.Hac.Öz.Ağ. (Gib)        |             |        |           | 2,693    | STABİLİTE ( " " )                   |             |           |            | 8,70                                                           |       |  |           |
| Agr.Kar.Ef. Öz.Ağ. (Gef) |       |      |      | 2,695    | Agr.Kar.Hac.Öz.Ağ.(Gsb)    |             |              | 2,675 | İnce Agr.Zah.Öz.Ağ. (Gia)        |             |        |           | 2,754    | AKMA ( " " )                        |             |           |            | 4,60                                                           |       |  |           |
|                          |       |      |      |          | Filler % si                |             |              | 0,0   | (Filler+SK) Zahiri Öz. Ağ. (Gfa) |             |        |           | 2,419    | ASFALTLA DOLU BOŞ. ( " " )          |             |           |            | 74,00                                                          |       |  |           |
|                          |       |      |      |          | Sönmüş Kireç % si          |             |              | 6,8   | Biriketteki Agrega Miktarı       |             |        |           | 1150     | BOŞLUK %' Sİ ( " " )                |             |           |            | 4,42                                                           |       |  |           |
|                          |       |      |      |          |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | AGR. ARASI BOŞ. %' Sİ (VMA) ( " " ) |             |           |            | 17,04                                                          |       |  |           |
|                          |       |      |      |          |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MARSHALL ORANI                      |             |           |            | 1,89                                                           |       |  |           |
|                          |       |      |      |          |                            |             |              |       |                                  |             |        |           |          | MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. ( " " )           |             |           |            | 2,459                                                          |       |  |           |

---

## **OPTİMUM BİTÜM İÇERİĞİNDEKİ DENEY SONUÇ FORMLARI**

Bu kısımda, önceki deneylerle elde edilen optimum bitüm içerikleri kullanılarak üretilen 45 adet numuneye ait, deney ve sonuçlarını içeren formlar verilmiştir.

### B-1 Optimum Bitüm İçeriğine Göre Hesap Sonuçları (Dizayn No 1-8)

| Bir. No  | SK % | Bitüm |      |       | Bir. Yük. mm | Havadaki Ağır l. (gr) | Sudaki Ağır l. (gr) | Doy. Yüz. K.Ağır l. (gr) | Hacim (cm3) | Hac. Özg. Ağır lık | Max. Teo. Öz. Ağır lık | Boşluk % | Agr.Arası Boşluk % | Asf.Dolu Boşluk % | Akma (mm) | Düzeltilmiş Stabilitite (kN) | Stabilite giriş | Düzeltilme Faktörü |
|----------|------|-------|------|-------|--------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|-------------|--------------------|------------------------|----------|--------------------|-------------------|-----------|------------------------------|-----------------|--------------------|
|          |      | %     | %    |       |              |                       |                     |                          |             |                    |                        |          |                    |                   |           |                              |                 |                    |
|          |      | Wa    | Wb   | (gr)  |              | A                     | C                   | B                        | V           | DP                 | DT                     | Vh       | VMA                | Vf                |           |                              |                 |                    |
| 1        | 0    | 5,20  | 4,94 | 59,8  | 64,3         | 1199,2                | 716,3               | 1202,3                   | 486,0       | 2,467              | 2,513                  | 4,38     | 15,50              | 71,72             | 5,78      | 12,18                        | 12,4            | 0,980              |
| 2        | 0    | 5,20  | 4,94 | 59,8  | 64,7         | 1199,8                | 697,6               | 1204,0                   | 506,4       | 2,369              |                        |          |                    |                   | 9,45      | 10,88                        | 11,2            | 0,970              |
| 3        | 0    | 5,20  | 4,94 | 59,8  | 64,8         | 1200,1                | 700,0               | 1205,9                   | 505,9       | 2,372              |                        |          |                    |                   | 4,49      | 10,06                        | 10,4            | 0,967              |
| ORTALAMA |      |       |      |       |              |                       |                     |                          |             | 2,403              |                        |          |                    |                   | 6,57      | 11,04                        |                 |                    |
| 4        | 0,5  | 5,28  | 5,02 | 60,72 | 64,7         | 1204,2                | 698,1               | 1206,6                   | 508,5       | 2,368              | 2,509                  | 5,57     | 16,70              | 66,64             | 4,40      | 9,61                         | 9,9             | 0,970              |
| 5        | 0,5  | 5,28  | 5,02 | 60,72 | 64,7         | 1203,2                | 698,2               | 1205,4                   | 507,2       | 2,372              |                        |          |                    |                   | 4,08      | 9,16                         | 9,4             | 0,970              |
| 6        | 0,5  | 5,28  | 5,02 | 60,72 | 64,7         | 1201,9                | 698,5               | 1206,4                   | 507,9       | 2,366              |                        |          |                    |                   | 5,70      | 9,72                         | 10,0            | 0,970              |
| ORTALAMA |      |       |      |       |              |                       |                     |                          |             | 2,369              |                        |          |                    |                   | 4,73      |                              |                 |                    |
| 7        | 1    | 5,25  | 4,99 | 60,4  | 65,1         | 1203,7                | 698,3               | 1207,2                   | 508,9       | 2,365              | 2,509                  | 5,75     | 16,79              | 65,77             | 3,89      | 8,55                         | 8,9             | 0,960              |
| 8        | 1    | 5,25  | 4,99 | 60,4  | 65,3         | 1201,2                | 697,1               | 1206,5                   | 509,4       | 2,358              |                        |          |                    |                   | 4,16      | 8,26                         | 8,7             | 0,955              |
| 9        | 1    | 5,25  | 4,99 | 60,4  | 65,3         | 1204,5                | 699,5               | 1207,6                   | 508,1       | 2,371              |                        |          |                    |                   | 5,59      | 8,70                         | 9,1             | 0,955              |
| ORTALAMA |      |       |      |       |              |                       |                     |                          |             | 2,365              |                        |          |                    |                   | 4,55      | 8,50                         |                 |                    |
| 10       | 1,5  | 5,47  | 5,19 | 62,9  | 65,1         | 1206,0                | 699,5               | 1210,0                   | 510,5       | 2,362              | 2,498                  | 5,70     | 17,17              | 66,78             | 4,30      | 8,65                         | 9,0             | 0,960              |
| 11       | 1,5  | 5,47  | 5,19 | 62,9  | 65,3         | 1204,5                | 696,7               | 1209,0                   | 512,3       | 2,351              |                        |          |                    |                   | 4,14      | 7,31                         | 7,7             | 0,955              |
| 12       | 1,5  | 5,47  | 5,19 | 62,9  | 65,2         | 1199,8                | 694,7               | 1204,6                   | 509,9       | 2,353              |                        |          |                    |                   | 3,53      | 7,98                         | 8,3             | 0,957              |
| ORTALAMA |      |       |      |       |              |                       |                     |                          |             | 2,356              |                        |          |                    |                   | 3,99      | 7,98                         |                 |                    |
| 13       | 2    | 5,35  | 5,08 | 61,5  | 64,7         | 1204,1                | 698,5               | 1206,4                   | 507,9       | 2,371              | 2,491                  | 4,85     | 16,14              | 69,93             | 4,48      | 9,63                         | 9,9             | 0,970              |
| 14       | 2    | 5,35  | 5,08 | 61,5  | 64,6         | 1203,8                | 699,5               | 1206,7                   | 507,2       | 2,373              |                        |          |                    |                   | 4,18      | 8,95                         | 9,2             | 0,972              |
| 15       | 2    | 5,35  | 5,08 | 61,5  | 64,6         | 1204,1                | 698,1               | 1206,8                   | 508,7       | 2,367              |                        |          |                    |                   | 4,19      | 9,28                         | 9,6             | 0,972              |
| ORTALAMA |      |       |      |       |              |                       |                     |                          |             | 2,370              |                        |          |                    |                   | 4,28      | 9,29                         |                 |                    |
| 16       | 2,5  | 5,59  | 5,29 | 64,3  | 64,6         | 1204,5                | 696,9               | 1206,4                   | 509,5       | 2,364              | 2,487                  | 4,82     | 16,60              | 70,94             | 3,92      | 8,36                         | 8,6             | 0,972              |
| 17       | 2,5  | 5,59  | 5,29 | 64,3  | 64,6         | 1206,2                | 700,5               | 1208,1                   | 507,6       | 2,376              |                        |          |                    |                   | 3,92      | 8,64                         | 8,9             | 0,972              |
| 18       | 2,5  | 5,59  | 5,29 | 64,3  | 64,9         | 1203,4                | 696,4               | 1206,0                   | 509,6       | 2,361              |                        |          |                    |                   | 3,69      | 8,10                         | 8,4             | 0,965              |
| ORTALAMA |      |       |      |       |              |                       |                     |                          |             | 2,367              |                        |          |                    |                   | 3,84      | 8,37                         |                 |                    |
| 19       | 3    | 5,38  | 5,11 | 61,9  | 65,5         | 1199,6                | 694,7               | 1207,1                   | 512,4       | 2,341              | 2,496                  | 5,93     | 17,17              | 65,47             | 3,20      | 7,78                         | 8,2             | 0,951              |
| 20       | 3    | 5,38  | 5,11 | 61,9  | 66,0         | 1205,0                | 699,0               | 1210,4                   | 511,4       | 2,356              |                        |          |                    |                   | 3,09      | 8,23                         | 8,8             | 0,94               |
| 21       | 3    | 5,38  | 5,11 | 61,9  | 65,4         | 1201,0                | 694,7               | 1206,6                   | 511,9       | 2,346              |                        |          |                    |                   | 5,29      | 8,71                         | 9,1             | 0,953              |
| ORTALAMA |      |       |      |       |              |                       |                     |                          |             | 2,348              |                        |          |                    |                   | 3,86      | 8,24                         |                 |                    |
| 22       | 3,5  | 5,60  | 5,30 | 64,4  | 66,1         | 1207,9                | 698,9               | 1215,7                   | 516,8       | 2,337              | 2,487                  | 5,91     | 17,57              | 66,35             | 4,05      | 6,95                         | 7,4             | 0,938              |
| 23       | 3,5  | 5,60  | 5,30 | 64,4  | 65,5         | 1201,5                | 696,9               | 1210,4                   | 513,5       | 2,340              |                        |          |                    |                   | 3,78      | 6,68                         | 7,0             | 0,951              |
| 24       | 3,5  | 5,60  | 5,30 | 64,4  | 65,9         | 1208,6                | 698,5               | 1214,5                   | 516,0       | 2,342              |                        |          |                    |                   | 4,26      | 7,40                         | 7,9             | 0,943              |
| ORTALAMA |      |       |      |       |              |                       |                     |                          |             | 2,340              |                        |          |                    |                   | 4,03      | 7,01                         |                 |                    |

## B-2 Optimum Bitüm İçeriğine Göre Hesap Sonuçları (Dizayn No 9-15)

| Bir. No  | SK % | Bitüm |      |      | Bir. Yük. | Havadaki    | Sudaki      | Doy. Yüz.    | Hacim | Hac. Özg. | Max. Teo.   | Boşluk | Agr.Arası | Asf.Dolu | Akma | Düzeltilmiş Stabilite | Stabilite giriş | Düzeltilme Faktörü |
|----------|------|-------|------|------|-----------|-------------|-------------|--------------|-------|-----------|-------------|--------|-----------|----------|------|-----------------------|-----------------|--------------------|
|          |      | %     | %    |      | mm        | Ağırl. (gr) | Ağırl. (gr) | K.Ağırl.(gr) | (cm3) | Ağırlık   | Öz. Ağırlık | %      | Boşluk %  | Boşluk % |      |                       |                 |                    |
|          |      | Wa    | Wb   | (gr) | Ort.      | A           | C           | B            | V     | DP        | DT          | Vh     | VMA       | Vf       |      |                       |                 |                    |
| 25       | 4    | 5,39  | 5,11 | 62,0 | 65,3      | 1200,1      | 696,4       | 1207,0       | 510,6 | 2,350     | 2,493       | 5,46   | 16,77     | 67,43    | 4,32 | 9,65                  | 10,1            | 0,955              |
| 26       | 4    | 5,39  | 5,11 | 62,0 | 64,8      | 1202,6      | 698,2       | 1206,2       | 508,0 | 2,367     |             |        |           |          | 3,93 | 9,41                  | 9,7             | 0,967              |
| 27       | 4    | 5,39  | 5,11 | 62,0 | 65,2      | 1202,3      | 697,1       | 1208,0       | 510,9 | 2,353     |             |        |           |          | 3,98 | 9,97                  | 10,4            | 0,957              |
| ORTALAMA |      |       |      |      |           |             |             |              |       | 2,357     |             |        |           |          | 4,08 | 9,68                  |                 |                    |
| 28       | 4,5  | 5,54  | 5,25 | 63,7 | 65,0      | 1201,9      | 696,7       | 1206,5       | 509,8 | 2,358     | 2,484       | 5,33   | 16,92     | 68,51    | 5,27 | 9,72                  | 10,1            | 0,962              |
| 29       | 4,5  | 5,54  | 5,25 | 63,7 | 65,5      | 1202,3      | 696,1       | 1208,3       | 512,2 | 2,347     |             |        |           |          | 5,26 | 9,64                  | 10,1            | 0,951              |
| 30       | 4,5  | 5,54  | 5,25 | 63,7 | 65,5      | 1200,9      | 695,5       | 1206,6       | 511,1 | 2,350     |             |        |           |          | 5,30 | 8,61                  | 9,1             | 0,951              |
| ORTALAMA |      |       |      |      |           |             |             |              |       | 2,352     |             |        |           |          | 5,28 | 9,32                  |                 |                    |
| 31       | 5    | 6,16  | 5,80 | 70,8 | 65,4      | 1212,9      | 700,7       | 1214,8       | 514,1 | 2,359     | 2,459       | 4,29   | 17,18     | 75,06    | 6,42 | 8,87                  | 9,3             | 0,953              |
| 32       | 5    | 6,16  | 5,80 | 70,8 | 65,7      | 1210,6      | 697,1       | 1213,3       | 516,2 | 2,345     |             |        |           |          | 5,39 | 7,93                  | 8,4             | 0,947              |
| 33       | 5    | 6,16  | 5,80 | 70,8 | 65,2      | 1211,0      | 699,0       | 1212,8       | 513,8 | 2,357     |             |        |           |          | 5,69 | 8,15                  | 8,5             | 0,957              |
| ORTALAMA |      |       |      |      |           |             |             |              |       | 2,354     |             |        |           |          | 5,83 | 8,32                  |                 |                    |
| 34       | 5,5  | 6,33  | 5,95 | 72,8 | 65,8      | 1213,2      | 698,2       | 1215,5       | 517,3 | 2,345     | 2,460       | 3,97   | 17,27     | 76,99    | 5,36 | 7,19                  | 7,6             | 0,945              |
| 35       | 5,5  | 6,33  | 5,95 | 72,8 | 64,8      | 1214,7      | 704,6       | 1215,6       | 511,0 | 2,377     |             |        |           |          | 4,02 | 8,48                  | 8,8             | 0,967              |
| 36       | 5,5  | 6,33  | 5,95 | 72,8 | 65,6      | 1212,1      | 700,5       | 1213,4       | 512,9 | 2,363     |             |        |           |          | 4,24 | 7,72                  | 8,1             | 0,949              |
| ORTALAMA |      |       |      |      |           |             |             |              |       | 2,362     |             |        |           |          | 4,54 | 7,80                  |                 |                    |
| 37       | 6    | 6,23  | 5,86 | 71,6 | 64,8      | 1212,5      | 701,6       | 1213,3       | 511,7 | 2,370     | 2,460       | 3,75   | 16,87     | 77,77    | 4,30 | 7,95                  | 8,2             | 0,967              |
| 38       | 6    | 6,23  | 5,86 | 71,6 | 64,8      | 1212,7      | 702,5       | 1213,7       | 511,2 | 2,372     |             |        |           |          | 4,06 | 9,12                  | 9,4             | 0,967              |
| 39       | 6    | 6,23  | 5,86 | 71,6 | 65,3      | 1210,0      | 698,8       | 1211,0       | 512,2 | 2,362     |             |        |           |          | 5,46 | 7,97                  | 8,4             | 0,955              |
| ORTALAMA |      |       |      |      |           |             |             |              |       | 2,368     |             |        |           |          | 4,61 | 8,35                  |                 |                    |
| 40       | 6,5  | 5,74  | 5,43 | 66,0 | 66,5      | 1199,5      | 693,0       | 1210,0       | 517,0 | 2,320     | 2,476       | 6,36   | 18,20     | 65,08    | 3,40 | 7,25                  | 7,8             | 0,93               |
| 41       | 6,5  | 5,74  | 5,43 | 66,0 | 67,1      | 1207,0      | 697,4       | 1218,6       | 521,2 | 2,316     |             |        |           |          | 4,22 | 7,85                  | 8,6             | 0,915              |
| 42       | 6,5  | 5,74  | 5,43 | 66,0 | 67,2      | 1201,9      | 696,0       | 1214,1       | 518,1 | 2,320     |             |        |           |          | 4,02 | 7,29                  | 8,0             | 0,913              |
| ORTALAMA |      |       |      |      |           |             |             |              |       | 2,319     |             |        |           |          | 3,88 | 7,46                  |                 |                    |
| 43       | 6,8  | 6,10  | 5,75 | 70,2 | 66,6      | 1209,3      | 697,3       | 1215,1       | 517,8 | 2,335     | 2,459       | 4,95   | 17,63     | 71,94    | 4,06 | 8,23                  | 8,9             | 0,927              |
| 44       | 6,8  | 6,10  | 5,75 | 70,2 | 66,0      | 1207,3      | 694,4       | 1211,7       | 517,3 | 2,334     |             |        |           |          | 3,60 | 7,65                  | 8,1             | 0,94               |
| 45       | 6,8  | 6,10  | 5,75 | 70,2 | 65,8      | 1209,3      | 697,1       | 1213,1       | 516,0 | 2,344     |             |        |           |          | 4,93 | 8,08                  | 8,6             | 0,945              |
| ORTALAMA |      |       |      |      |           |             |             |              |       | 2,338     |             |        |           |          | 4,20 | 7,99                  |                 |                    |