

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÜRETİMİNDE YENİ BİR
KARIŞTIRMA YÖNTEMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Baha Vural KÖK

Tez Yöneticisi
Prof.Dr.Necati KULOĞLU

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ,2007

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÜRETİMİNDE YENİ BİR KARIŞTIRMA YÖNTEMİNİN ARAŞTIRILMASI

Baha Vural KÖK

Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, 08.06.2007 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof.Dr.Necati KULOĞLU

Üye: Doç.Dr.Sinan HINISLIOĞLU

Üye: Yrd.Doç.Dr.Taner ALATAŞ

Üye: Yrd.Doç.Dr.Perviz AHMEDZADE

Üye: Yrd.Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın planlanması ve yürütülmesinde benden destek ve ilgisini esirgemeyen, bilgi ve önerilerinden yararlandığım danışman hocam sayın Prof.Dr.Necati KULOĞLU'na sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Baha Vural KÖK

Elazığ, 2007

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IV
TABLOLAR LİSTESİ.....	VII
SİMGELER.....	VIII
KISALTMALAR.....	X
ÖZET.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Araştırmanın Önemi ve Konusu.....	1
1.2.Araştırmanın Amacı ve İzlenen Yol.....	2
2. ASFALT-AGREGA ADEZYONU.....	4
2.1.Adezyon Teorileri.....	5
2.1.1. Kimyasal Reaksiyon Teorisi.....	6
2.1.2. Yüzey Enerjisi ve Moleküler Uyuşma Teorisi.....	6
2.1.3. Mekanik Kenetlenme Teorisi.....	7
2.1.4. Diğer Teoriler.....	8
2.2. Asfalt ve Agregada Özelliklerinin Adezyon Üzerine Etkisi.....	8
2.3. Asfalt-Agrega Adezyonunun Artırılması.....	12
3. NEM HASSASİYETİ.....	16
3.1. Soyulma.....	16
3.1.1. Sökülme.....	18
3.1.2. Yer Değiştirme.....	18
3.1.3. Kendiliğinden Emilsiyonlaşma.....	18
3.1.4. Gözenek Basıncı.....	19
3.1.5. Hidrolik Yıkama.....	20
3.1.6. pH Kararsızlığı.....	20
3.2. Nem Hasarının Tespitindeki Deneyler.....	21
3.2.1. Sıkıştırılmamış Gevşek Karışımlara Uygulanan Deneyler.....	21
3.2.1.1. Statik Daldırma Deneyi.....	21

3.2.1.2. Film Soyulma Deneyi.....	21
3.2.1.3. Kaynama Deneyi.....	22
3.2.1.4. Net Adsorbsiyon Deneyi.....	22
3.2.1.5. Serbest Yüzey Enerjisi Deneyi.....	23
3.2.2. Sıkıştırılmış Numunelere Uygulanan Deneyler.....	23
3.2.2.1. Daldırma-Batırma Deneyi.....	23
3.2.2.2. Lottman İndirek Gerilme Deneyi.....	24
3.2.2.3. Modifiye Lottman Deneyi.....	24
3.2.2.4. Hamburg Tekerlek İzi Deneyi.....	25
3.2.2.5. Çevresel Koşullandırma Sistemi (ECS) Deneyi.....	26
 4. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ.....	 28
4.1.Rijitlik.....	28
4.2. İndirek Çekme Mukavemeti.....	33
4.3. Kalıcı Deformasyonlar ve Tekerlek İzi Oluşumu.....	33
4.3.1. Statik Sünme Deneyi.....	34
4.3.2. Dinamik Sünme Deneyi.....	34
4.3.3. Dinamik Modül Deneyi.....	36
4.3.4. Marshall Deneyi.....	37
4.3.5. Tekerlek İzi Deneyi.....	37
4.4. Yorulma Davranışı.....	37
 5.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	 42
5.1.Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	42
5.2.Optimum Bağlayıcı Oranlarının Bulunması.....	44
5.2.1. AC 100-150 Penetrasyonlu Asfalt Çimentosu İçin Optimum Bağlayıcı Oranının Bulunması	44
5.2.2. AC 75-100 Penetrasyonlu Asfalt Çimentosu İçin Optimum Bağlayıcı Oranının Bulunması	48
5.2.3. AC 50-70 Penetrasyonlu Asfalt Çimentosu İçin Optimum Bağlayıcı Oranının Bulunması	52
5.2.4. %5 SBS Katkılı AC 75-100 Penetrasyonlu Asfalt Çimentosu İçin Optimum Bağlayıcı Oranının Bulunması	56
5.2.5. Nem Hassasiyeti Deneyi İçin %7 Boşluk Oranındaki Karışımın Bulunması.....	60
5.3.Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	62

5.3.1.Kontrol Numuneleri.....	62
5.3.2.İki Aşamalı Karıştırma Sistemi ile Numunelerin Hazırlanması.....	63
5.4. Marshall Stabilite Deneyi ve Sonuçları.....	66
5.5. İndirek Çekme Mukavemeti, Nem Hassasiyeti Deneyleri ve Sonuçları.....	71
5.6.Esneklik Modülü, Sünme Rijitliği Deneyleri ve Sonuçları.....	77
5.6.1 Esneklik Modülü Deneyi ve Sonuçları.....	80
5.6.1.1 Farklı Bağlayıcılarla Hazırlanmış İki Aşamalı Numunelerin Esneklik Modülü Deneyi.....	83
5.6.2.Sünme Rijitliği Deneyi ve Sonuçları.....	87
5.7.Yorulma Deneyi ve Sonuçları.....	90
 6. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÜRETİMİ.....	 102
6.1.Harman Tipi Asfalt Plenti.....	103
6.2.Kazan Tipi Asfalt Plenti.....	104
6.3. İki Aşamalı Karıştırma Sistemi İçin Tasarlanan Asfalt Plenti.....	106
 7. SONUÇLAR.....	 109
KAYNAKLAR.....	111
ÖZGEÇMİŞ.....	116

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Rutubet ve kirlilik etkisi.....	4
Şekil 2.2 : Asfalt agrega arasındaki adezyon kohezyon davranışı.	5
Şekil 2.3 : Katı sıvı hava arasındaki yüzeysel etkileşim.	7
Şekil 2.4 : Oksidasyon etkisi.	10
Şekil 2.5 : Agregaların alkalin ve silika içerikleri.	11
Şekil 3.1 : (a) Soyulma olmamış numune, (b) Soyulma sonucu tekerlek izi oluşan numune.....	17
Şekil 3.2 : Tekrarlı yüklemelerden dolayı gelişen gözenek basıncı.	19
Şekil 3.3 : Film soyulma deney cihazı.....	22
Şekil 3.4 : Hamburg tekerlek izi deney aleti.	25
Şekil 4.1 : Yatay ve düşey diyetral düzlemlerde teorik gerilme dağılışı.....	32
Şekil 4.2 : Yük tekrar sayısı-Şekil değıştirme ilişkisi.	35
Şekil 4.3 : Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi.	35
Şekil 4.4 : Yük-zaman ve şekil değıştirme-zaman ilişkisi.	36
Şekil 5.1 : Asfalt oranı – Pratik birim ağırlık ilişkisi.	46
Şekil 5.2 : Asfalt oranı – Boşluk yüzdesi ilişkisi.	46
Şekil 5.3 : Asfalt oranı – Asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi.	46
Şekil 5.4 : Asfalt oranı – Agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi.....	47
Şekil 5.5 : Asfalt oranı – Stabilite ilişkisi.	47
Şekil.5.6 : Asfalt oranı – Akma ilişkisi.	47
Şekil 5.7 : Asfalt oranı – Pratik birim ağırlık ilişkisi.	50
Şekil 5.8 : Asfalt oranı – Boşluk yüzdesi ilişkisi.	50
Şekil 5.9 : Asfalt oranı – Asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi.	50
Şekil 5.10 : Asfalt oranı – Agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi.....	51
Şekil 5.11 : Asfalt oranı – Stabilite ilişkisi.	51
Şekil.5.12 : Asfalt oranı – Akma ilişkisi.	51
Şekil 5.13 : Asfalt oranı – Pratik birim ağırlık ilişkisi.	54
Şekil 5.14 : Asfalt oranı – Boşluk yüzdesi ilişkisi.	54
Şekil 5.15 : Asfalt oranı – Asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi.	54
Şekil 5.16 : Asfalt oranı – Agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi.....	55
Şekil 5.17 : Asfalt oranı – Stabilite ilişkisi.	55
Şekil.5.18 : Asfalt oranı – Akma ilişkisi.	55
Şekil 5.19 : Asfalt oranı – Pratik birim ağırlık ilişkisi.	58

Şekil 5.20 : Asfalt oranı – Boşluk yüzdesi ilişkisi.	58
Şekil 5.21 : Asfalt oranı – Asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi.	58
Şekil 5.22 : Asfalt oranı – Agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi.....	59
Şekil 5.23 : Asfalt oranı – Stabilite ilişkisi.	59
Şekil.5.24 : Asfalt oranı – Akma ilişkisi.	59
Şekil 5.25. Darbe sayısı – Boşluk oranı ilişkisi.....	61
Şekil 5.26 Deney numuneleri.....	62
Şekil 5.27 Bağlayıcı oranı – Kaplanma oranı ilişkisi.....	64
Şekil 5.28 Birinci aşama sonrası yüzeyi kaplanmış olan kaba agrega.....	65
Şekil 5.29. Marshall deney cihazı.....	67
Şekil 5.30 Kontrol ve iki aşamalı numunelerde Marshall stabilitesi değişimi.....	70
Şekil 5.31 Kontrol ve iki aşamalı numunelerde stabilite/akma değişimi.....	70
Şekil 5.32. İndirek çekme mukavemeti deney düzeneği.....	71
Şekil 5.33 Kontrol ve iki aşamalı kuru numunelerde indirek çekme mukavemeti değişimi.....	76
Şekil 5.34 Kontrol ve iki aşamalı koşullandırılmış numunelerde indirek çekme mukavemeti değişimi.....	76
Şekil 5.35 Kontrol ve iki aşamalı numunelerde indirek çekme mukavemeti oranı değişimi.....	76
Şekil 5.36. UMATTA deney cihazı.....	78
Şekil 5.37. Esneklik modülü deneyi aleti.....	80
Şekil 5.38 AA numuneleri birim şekil değiştirme – Zaman ilişkisi.....	81
Şekil 5.39 BB numuneleri birim şekil değiştirme – Zaman ilişkisi.	81
Şekil 5.40 CC numuneleri birim şekil değiştirme – Zaman ilişkisi.	81
Şekil 5.41 Kontrol ve iki aşamalı numunelerde esneklik modülü değişimi.....	83
Şekil 5.42 Sünme rijitliği deneyi.....	87
Şekil 5.43 “DD” numuneleri şekil değiştirme – Zaman ilişkisi.....	88
Şekil 5.44 Kontrol ve iki aşamalı numunelerde sünme rijitliği değişimi.....	90
Şekil.5.45 Yorulma deneyi.....	91
Şekil 5.46 : B ₂₀₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.	93
Şekil 5.47 : B ₁₅₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.	93
Şekil 5.48 : B ₁₂₅ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.	94
Şekil 5.49 : BB ₂₀₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.....	94
Şekil 5.50 : BB ₁₅₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.....	94
Şekil 5.51 : BB ₁₂₅ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.....	95
Şekil 5.52 : D ₂₀₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.	95
Şekil 5.53 : D ₁₅₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.	95

Şekil 5.54 : D_{125} numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.	96
Şekil 5.55 : DD_{200} numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.....	96
Şekil 5.56 : DD_{150} numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.....	96
Şekil 5.57 : DD_{125} numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.....	97
Şekil.5.58 : Yorulma deneyi sonrası kırılmış numuneler.	97
Şekil 5.59 : Bilgisayarda geçen zaman – Gerçek zaman ilişkisi.	98
Şekil 5.60 : 200 kPa gerilme seviyesinde kontrol numuneleri ile iki aşamalı numunelerin yük tekrar sayılarının karşılaştırılması.....	99
Şekil 5.61 : 150 kPa gerilme seviyesinde kontrol numuneleri ile iki aşamalı numunelerin yük tekrar sayılarının karşılaştırılması	99
Şekil 5.62 : 125 kPa gerilme seviyesinde kontrol numuneleri ile iki aşamalı numunelerin yük tekrar sayılarının karşılaştırılması	100
Şekil 5.63 : Kontrol ve iki aşamada hazırlanan numunelerin yorulma ömrü diyagramı.....	101
Şekil 6.1 : Harman tipi asfalt plenti.	103
Şekil 6.2 : Harman tipi plent akış şeması.	104
Şekil 6.3 : Kazan tipi asfalt plenti.	105
Şekil 6.4 : Kazan tipi asfalt plentlerinde tambur.	105
Şekil 6.5 : Paralel dizayn edilmiş iki aşamalı asfalt plenti.	107
Şekil 6.6 : Seri olarak dizayn edilmiş iki aşamalı asfalt plenti.	108

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1: Agreganın fiziksel özellikleri.....	43
Tablo 5.2: Bağlayıcı fiziksel özellikleri.	43
Tablo 5.3: Karışımlarda kullanılan agrega gradasyonu.	43
Tablo 5.4: AC 100-150 ile hazırlanan numunelerin Marshall metodu dizayn değerleri.....	45
Tablo 5.5: AC 75-100 ile hazırlanan numunelerin Marshall metodu dizayn değerleri.....	49
Tablo 5.6: AC 50-70 ile hazırlanan numunelerin Marshall metodu dizayn değerleri.....	53
Tablo 5.7: 75-100 + %5 SBS ile hazırlanan numunelerin Marshall metodu dizayn değerleri.....	57
Tablo 5.8: Farklı darbe sayısı uygulanarak hazırlanmış numunelerin fiziksel özellikleri.....	61
Tablo 5.9: Karıştırma işleminde ve kür sırasındaki asfalt sıcaklıkları.....	66
Tablo 5.10: Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulan numunelerin fiziksel özellikleri...	68
Tablo 5.11: Numunelerin Marshall stabilite ve akma değerleri.....	69
Tablo 5.12: İndirek çekme mukavemeti deneyi için hazırlanan kuru numunelerin fiziksel özellikleri.....	72
Tablo 5.13: İndirek çekme mukavemeti deneyi için hazırlanan koşullandırılacak numunelerin fiziksel özellikleri.....	73
Tablo 5.14: Koşullandırılmış ve kuru numunelerin indirek çekme mukavemeti ve oranları.....	75
Tablo 5.15: Esneklik modülü ve sünme rijitliği deneyi için hazırlanan numunelerin fiziksel özellikleri.....	79
Tablo 5.16: Numunelerin esneklik modülü değerleri.....	82
Tablo 5.17: Farklı bağlayıcılarla hazırlanmış numunelerde iki aşamalı karıştırma sistemi.....	85
Tablo 5.18: Farklı bağlayıcılarla hazırlanmış iki aşamalı numunelerin fiziksel özellikleri ve esneklik modülü değerleri.....	85
Tablo 5.19: Numunelerin sünme rijitliği değerleri.....	89
Tablo 5.20: Yorulma deneyinde kullanılacak numunelerin fiziksel özellikleri.....	92
Tablo 5.21: Numunelerin gerilme seviyelerine göre yük tekrar sayıları.....	98
Tablo 5.22: Numunelerin gerilme seviyelerine göre düzeltilmiş yük tekrar sayıları.....	99

SİMGELER

- γ_{kh} : Katı- hava arasındaki etkileşim kuvveti
 γ_{ks} : Katı -sıvı arasındaki etkileşim kuvveti
 γ_{sh} : Sıvı -hava arasındaki etkileşim kuvveti
 θ : Kontak açısı
 S_b : Bitümün rijitliği
 t_w : Yük etki süresi
 PI : Penetrasyon indeksi
 T_{HB} : Yumuşama noktası (halka bilye metodu)
 T : Bitümün sıcaklığı
 E : Bitümlü sıcak karışımın rijitliği
 VA : Hacimsel agregat yüzdesi
 VB : Hacimsel bitüm yüzdesi
 C'_v : Hacimsel olarak agregat konsantrasyonu
 σ_x : Çekme gerilmesi
 σ_y : Basınç gerilmesi
 t : Numune kalınlığı
 d : Numune çapı
 S_m : Rijitlik modülü
 P : Maximum yük
 ΔH : Yatay deformasyon
 ν : Poisson oranı
 E^* : Kompleks modülü
 $|E^*|$: Dinamik modülü
 ϕ : Faz açısı
 N_f : Yorulma ömrü (yük tekrar sayısı)
 ϵ_o : Başlangıç şekil değiştirmesi
 S_o : Karışımın başlangıç rijitliği
 V_b : Bağlayıcı oranı
 ϵ_t : Başlangıç çekme şekil değiştirmesi
 W_{kuru} : Marshall numunelerinin havadaki kuru ağırlıkları
 $W_{doygün}$: Marshall numunelerinin havadaki doygün ağırlıkları

W_{suda} : Marshall numunelerinin sudaki ağırlıkları
 D_p : Marshall numunelerinin pratik birim ağırlıkları
 D_t : Marshall numunelerinin teorik birim ağırlıkları
 V_h : Marshall numunelerinin hava boşluğu oranı
 V_{ma} : Marshall numunelerinin agregalar arasındaki boşluk oranı
 V_f : Marshall numunelerinin asfaltla dolu boşluk oranı
 m_1 : AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ağırlığı.
 d_1 : AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu özgül ağırlığı.
 m_2 : % 5 SBS modifiyeli AC75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ağırlığı.
 d_2 : % 5 SBS modifiyeli AC75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu özgül ağırlığı.
 q : Lastik basıncı
 a : Dairesel yükün yarıçapı
 σ_r : Kaplama altındaki yanıl çekme gerilmesi
 σ :Yorulma deneyinde uygulanan gerilme

KISALTMALAR

AASHTO : American Association of State Highway and Transportation Officials

APA : Asphalt Pavement Analyzer

ASTM : American Society for Testing and Materials

BSK : Bitümlü sıcak karışım

CB : Carbon Black

ECS : Enviromental conditioning system (çevresel koşullandırma sistemi)

ITS : Indirect tensile strength (indirek çekme gerilmesi)

KGM : Karayolları Genel Müdürlüğü

PMA : Polymer modified asphalt (polimer modifiyeli asfalt)

SBS : Styrene butadiene styrene

SHRP : Strategical Highway Research Programme

TGA : Termogravimetrik analiz

TSR : Tensile strength ratio (indirek çekme gerilmesi oranı)

USD : Universal Sorption Device

ÖZET

Doktora Tezi

BITÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÜRETİMİNDE YENİ BİR KARIŞTIRMA YÖNTEMİNİN ARAŞTIRILMASI

Baha Vural KÖK

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2007, Sayfa : 116

Bu tez çalışmasında bitümlü sıcak karışımların (BSK) üretiminde yeni bir karıştırma yöntemi olarak iki aşamalı karıştırma sistemi geliştirilmiştir. İki aşamalı karıştırma sisteminin birinci aşamasında kaba agregası, optimum bağlayıcı oranının %20'si ile karıştırılmakta ve 1 saat 135-160 °C'de bekletilmektedir. İkinci aşamada ince agregası ve filler optimum bağlayıcı oranının %80'i ile karıştırılmakta daha sonra bu karışıma kaplanmış kaba agregası da ilave edilerek beraber karıştırılmaktadır.

İki aşamalı karıştırma sistemini değerlendirebilmek için gerek bu yeni yöntemle ve gerekse geleneksel yöntemle hazırlanmış Marshall numunelerine Marshall stabilite, indirek çekme mukavemeti ve nem hassasiyeti, rijitlik modülü, sünme rijitliği ve yorulma deneyleri uygulanmıştır. Bu deneysel çalışmada öncelikle, kullanılacak malzemelerin karakteristikleri ve şartnamelere uygunluğu tespit edilmiştir. Deneylerde bağlayıcı olarak AC 100-150, AC 75-100, AC 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentoları ve ağırlıkça % 5 styrene butadiene styrene (SBS,Kraton D1011) katkılı AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentoları kullanılmıştır. Agregası olarak bazalt kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda, iki aşamalı karıştırma sistemi ile hazırlanmış numunelerin mekanik özelliklerinin geleneksel yöntemle hazırlanmış numunelerden yüksek ve birinci aşamada kullanılan bağlayıcının karışımın rijitliği üzerinde önemli derecede etkili olduğu tespit edilmiştir. Katkılı asfalt çimentosu ile hazırlanan numunelerin bütün deney yöntemlerinde en iyi sonucu verdiği, katkısız asfaltlar arasında ise en iyi sonuçların AC 75-100 asfalt çimentosu ile hazırlanan numunelerde olduğu tespit edilmiştir. İki aşamalı karıştırma sisteminin etkisinin, SBS ile modifiye edilen bağlayıcıyla hazırlanan karışımlarda normal karışımlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bitümlü sıcak karışımların iki aşamalı karıştırma sistemine uygun olarak üretilmesini sağlayacak bir asfalt plenti tasarlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Bitümlü sıcak karışım, Karıştırma yöntemi, Mekanik özellikler.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF A NEW MIXING METHOD IN PRODUCTION OF HOT MIX ASPHALT

Baha Vural KÖK

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

2007, Page : 116

A two-phase mixing method was developed in this thesis as a new mixing method in production of hot mix asphalt (HMA). Course aggregate was mixed with 20 percent of optimum binder content and kept at 135-160 °C for 1 hour in the first phase. Fine aggregate and filler were mixed with 80 percent of optimum binder content and then course aggregate was added to mix and mixed together in the second phase.

Marshall stability, indirect tensile strength and moisture susceptibility, stiffness modulus and fatigue tests were applied to Marshall samples prepared with both the new method and traditional method in order to evaluate the two phase mixing method. At first characteristics of the materials and their appropriateness to the specifications were determined in the study. AC 100-150, AC 75-100, AC 60-70 penetration asphalt cements and 5 percent styrene butadiene styrene (SBS, Kraton D1011) modified AC 75-100 penetration asphalt cement were used as binder in the experiments. Basalt was used as aggregate.

It was determined that the mechanical properties of samples prepared with two-phase mixing system were higher than the ones prepared with traditional method and the binder used in first phase have a significant effect on stiffness of mixtures. It was determined that the specimens prepared with modified asphalt gave the better results at all experiments and among the unmodified binders the best results were obtained with the specimens prepared with AC 75-100. Furthermore it was determined that the effect of two-phase mixing system on mixtures prepared with SBS modified binder was higher than those of the conventional mixtures. Moreover, an asphalt plant was designed to enable producing hot mix asphalt according to two-phase mixing method.

Keywords: Hot mix asphalt, Mixing method, Mechanical properties.

1.GİRİŞ

1.1. Araştırmanın Önemi ve Konusu

Teknolojik gelişmelere paralel olarak yaşam standartlarının yükselmesi ile insanların güvenli ve konforlu sürüş talebi artmıştır. Günümüz Türkiye'sinde ekonomik kalkınmanın ve refahın gelişmesinde büyük önemi olan karayolu taşımacılığının, ulaştırma sektörü içindeki payı giderek artan bir eğilim göstermektedir. Devlet İstatistik Enstitüsü verilerine göre Türkiye'de karayolu taşımacılığının payı 1970'de yük taşımacılığında %61, yolcu taşımacılığında %91 iken, 2003 yılında yük taşımacılığında %92, yolcu taşımacılığında %95 olmuştur. 1992'den günümüze otomobil sayısı % 154, ağır taşıt sayısı ise % 183 artmıştır [1]. Bu verilerden de anlaşılacağı üzere kentler arası yolcu ve yük taşımacılığında en büyük payı karayolu sistemi üstlenmekte ve bu pay, her geçen gün hızla artış göstermektedir.

Ulaştırma sistemi, bölge halkının çevredeki hatta daha uzak bölgelerdeki büyük yerleşme merkezlerine gidiş-gelişlerini kolaylaştırması bu yönüyle bölgeye canlılık getirmesi, sosyal bir gelişmeye ve kültür birliğine sebep olması, kolay ve ekonomik taşıma sonucu her çeşit malın ülke çapında daha geniş bir bölgeye daha ucuza intikal etmesini sağlaması, eğitim, sağlık, haberleşme gibi hizmetlerin etkin ve yaygın bir biçimde yapılmasını sağlaması, kolay ve ucuz ulaşım imkanı ile iç ve dış turizmi ve sanayideki gelişmeleri artırması yönü ile en önemli altyapı yatırımlarından biridir.

Ülkemizdeki karayolları için bütçeden ayrılan paylara bakıldığında yollarımızın çok kısıtlı imkanlarla yapılmaya çalışıldığı görülmektedir. Hem çok daha fazla uzunlukta yollara sahip olmamız gerektiği hem de bu yolların sağlam olması, trafiğin ve çevrenin aşındırıcı etkilerine uzun yıllar direnç gösterebilmesi gerektiğinden bu kısıtlı imkanların en ekonomik şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Ülkemizde, daha ucuz olduğu düşünüldüğü için kademeli inşaat ve sathi kaplama tercih edilmektedir. Ancak 20 yıllık bir periyot içerisinde yapılan bakım + onarım harcamaları dikkate alındığında sathi kaplamalı bir yolun hiçte ucuza mal olmadığı, hatta bitümlü sıcak karışımli bir yol tipinden daha fazla harcama yapıldığı görülmektedir [2].

Geçmişten bugüne daha sağlam, ön görülen süre içerisinde trafik ve çevre şartlarının aşındırıcı etkilerine direnç gösterebilecek yolların inşası için büyük bir çaba sarf edilmekte, bu amaçla üstyapıyı oluşturan her bir tabakanın deneysel ve sayısal analizleri yapılarak stabilitesi ve durabilitesi yüksek karışımlar ve tabakalar elde edilmeye çalışılmaktadır.

Araç tekerlerinin temas ettiği ve dolayısıyla konforlu ve güvenli bir sürüşten birinci derecede sorumlu olan esnek kaplama tabakası, en fazla gerilmelere maruz kaldığından

üstyapının en önemli kısmını teşkil etmektedir. Kaplama, kendisine etkiyen yüke bozulmadan direnç gösterebilecek ve yükü alt tabakalara iletebilecek, suyun altyapıya sızmasına mani olacak, olumsuz iklim koşullarında kararlılığını yitirmeyecek, pürüzsüz ve konforlu bir sürüş temin edecek nitelikte olmalıdır. Dünyada ve son zamanlarda Ülkemizde en çok kullanılan esnek kaplama tipi, Bitümlü Sıcak Karışımlardır (BSK). Bu karışımlarda ağırlıkça agrega, %94-96 bitüm %4-6 oranlarında yer almaktadır. Oranı düşük olmasına rağmen kaplamanın maliyet ve performansı üzerinde bağlayıcının büyük önemi bulunmaktadır. Bu sebeple bağlayıcı özelliklerini iyileştirmek için çeşitli katkı malzemeleri bitüme ilave edilerek kullanılmaktadır. Bu katkı malzemelerinin en önde gelenleri polimerlerdir. PMA olarak adlandırılan polimer modifiyeli asfaltlar, şantiyelere kurulan ek tesislerle sıcak karışımlara ilave edilmektedir. Polimer modifikasyonu ile, sıcak iklim koşullarının olduğu yerlerde çok ağır trafik yüklerinin altında tekerlek izinde oturmaya karşı yeterli direnç sağlamak, soğuk hava koşullarında termal çatlak oluşumu riskini azaltmak, iyi bir adezyon ve kohezyon temin ederek mekanik özellikleri iyileştirmek, iyi bir performans sağlayacak daha düşük kalınlıkta tabakalar inşa etmek amaçlanmaktadır. BSK'ların performansını iyileştirmek için kullanılan katkıların yanı sıra yolların öngörülen hizmet seviyesinden önce bozulması, laboratuvar şartlarının arazi şartlarını tam olarak temsil etmemesi, tasarım yöntemlerinin irdelenmesine yol açmıştır. Bu amaçla performansa dayalı bir üstyapı şartnamesi olan Superpave üstyapı şartnamesi geliştirilmiştir.

Gerek yeni geliştirilen şartnamelere göre ve gerek katkı kullanımında BSK'lar, asfalt ve agreganın aynı ortamda bir defa da karıştırılması ile üretilmektedir. Bu üretimlerde tek cins yada modifiye edilmiş asfalt ile tek cins yada değişik türlerin oluşturduğu agrega kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise değişik penetrasyon değerlerine sahip asfalt çimentolarının oluşturduğu kombinasyon ve agregaların önceden asfalt ile kaplanmasını, başka bir ifadeyle ön işleme tabi tutulmasını içeren bir karıştırma yöntemi araştırılmıştır.

1.2. Araştırmanın Amacı ve İzlenen Yol

Bitümlü sıcak karışımlar, bir asfalt plentinde, gradasyonu kontrollü bir şekilde ayarlanmış agrega ile, uygun miktarı tayin edilmiş bağlayıcının sıcak olarak karıştırılması ile elde edilmektedir. Yüksek standartlı karayolları, otoyolları ve havaalanlarında yapılacak esnek kaplamalar için bitümlü sıcak karışımlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. BSK'ların yüksek kalitede imal edilmeleri gerektiği için stabilite, rijitlik, dayanıklılık, yorulma, işlenebilirlik gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinin tümünü ideal olarak sağlayabilecek karışım tasarımlarının yapılması büyük önem arz etmektedir. BSK'ların performansına yani uzun süre bozulmadan hizmet etme yeteneğine etki eden faktörler, kaplamanın esnekliği, suya karşı hassasiyeti, kalıcı

deformasyonlara ve düşük ısı çatlaklarına karşı gösterdiği direnç ve yorulma ömrü, olarak tanımlanabilir.

Bu çalışmada, maliyeti fazla etkilemeden nem hassasiyeti ve kalıcı deformasyonları düşük, rijitliği, stabilitesi ve yorulma ömrü yüksek beton asfalt kaplamanın, karıştırma yöntemi irdelenerek üretilmesi amaçlanmaktadır.

BSK'lar agregası ve asfaltın bir araya gelip kompozit bir malzeme haline gelmiş durumu olduğundan, bu kompozit malzemenin davranışını anlayabilmek için asfalt ve agregası arasındaki fiziksel, kimyasal ve mekanik ilişkilerin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla, çalışmanın ikinci bölümünde asfalt-agregası adezyonu üzerinde durulmuş, kimyasal reaksiyon, yüzey enerjisi, moleküler uyuma ve mekanik kenetlenme gibi adezyon teorileri hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca asfalt ve agregasının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin adezyon üzerine etkisi ve bu konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalardan bahsedilmiş, asfalt-agregası adezyonunun artırılması ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde bitümlü sıcak karışımların nem hassasiyeti ve soyulması hakkında bilgi verilmiş, nem hasarının tespitindeki deneyler, sıkışmamış gevşek karışımlara uygulanan ve sıkışmış karışımlara uygulanan deneyler olmak üzere iki başlık altında anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde BSK'ların rijitlik, çekme dayanımı, kalıcı deformasyonlar ve tekerlek izi oluşumu, yorulma özellikleri hakkında bilgiler yer almaktadır.

Beşinci bölümde deneysel çalışma anlatılmıştır. Burada ilk olarak agregası ve bağlayıcılar üzerinde yapılan, deney sonuçları ve karışımlarda kullanılacak agregası gradasyonu verilmiştir. Daha sonra deneylerde kullanılacak bağlayıcılar için optimum bağlayıcı oranları ve %7 boşluk oranına sahip olacak numunelerin bağlayıcı oranı tespit edilmiştir. Geleneksel yöntemle kontrol numunelerinin ve iki aşamalı karıştırma sistemi ile diğer deney numunelerinin hazırlanışı ve bu numunelerin tabi tutuldukları Marshall stabilite, rijitlik modülü, sünme rijitliği indirek çekme mukavemeti ve yorulma deneylerinin uygulanışları hakkında bilgi verilmiş ve deney sonuçları yorumlanmıştır.

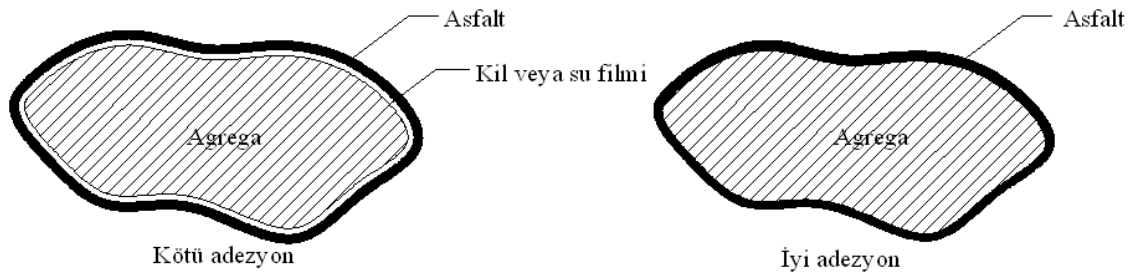
Altıncı bölümde BSK'ların harman tipi ve kazan tipi asfalt plantlerindeki üretimi hakkında bilgiler verilmiş, iki aşamalı karıştırma sistemi için gerekli ekipmanın harman tipi plante entegrasi şekillerle gösterilmiştir.

Yedinci bölümde deneyler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

2. ASFALT-AGREGA ADEZYONU

Adezyon, asfaltın agregaya yapışabilme yeteneğidir. Asfalt ve agrega arasındaki adezyon bitümlü karışımların ömrü için önemli bir faktördür. Çok sıklıkla yol yüzeylerinde meydana gelen hasarların nedeni adezyon yetersizliği yada soyulmadan kaynaklanmaktadır. Suyun olduğu durumda bitüm agregadan soyulabilmekte ve bu işlem bir defa başlayınca trafik yükleri ile birlikte hızlanmaktadır.

Bitümün agregaya yapışması bir yüzey olayıdır. İki malzemenin yakın temasına ve yüzeylerinin karşılıklı etkileşimine dayanmaktadır. Agregalar çok yada az hidrofiliktirler (suyu seven) su ile kolaylıkla kaplanabilmektedirler. Bitüm ise hidrofobik bir malzemedir su ile bir etkileşimi yoktur. Agregaya yüzeyi ince bir film halinde su ile kaplanırsa bitüm agregayı sarabilir fakat bitümle su yer değiştirmedeği sürece, bitüm agregaya yüzeyine yapışmaz (Şekil 2.1)[3].

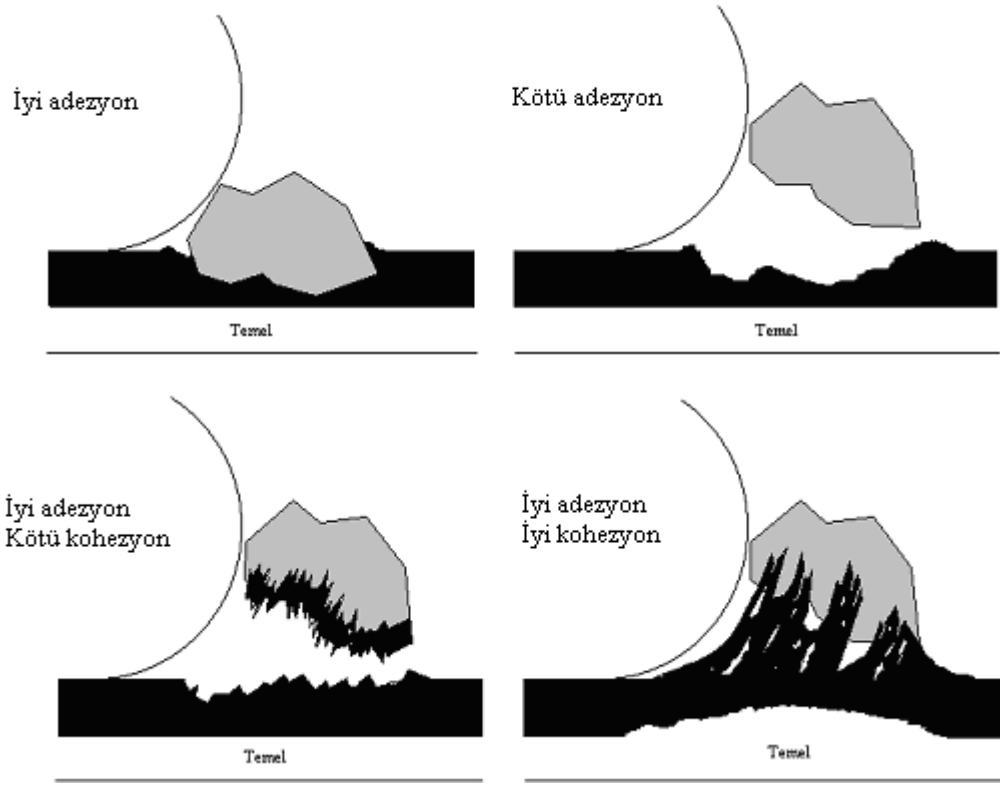


Şekil 2.1. Rutubet ve kirlilik etkisi.

Sıvı haldeki bitümün agregaya yüzeyi ile yakın temas yapabilme yeteneği ıslatma gücü olarak tanımlanır. Bitümün ıslatma yeteneği onun viskozitesi ile kontrol edilmektedir. Viskozite ne kadar düşük olursa ıslatma gücü o kadar fazla olur. Bitüm hidrokarbon yapısında olduğundan suya ve agregaya göre yüzey gerilimi yüksektir. Bunun anlamı su, agregayı bitüme göre daha kolay bir şekilde ıslatabilmekte ve kuru agreganın yüzeyini kaplayan bitümün yerine geçebilmektedir.

Asfalt kaplamaların stabilitesi karışımdaki agregaya daneleri arasındaki asfaltın bağ kuvvetine bağlıdır. Bu bağ kuvveti agregaya danelerini saran asfalt filminin agregaya yapışma yeteneğine yani asfaltın adezyonuna bağlıdır. Asfaltların adezyon özelliği, asfaltın kohezyon özelliğinden farklıdır. Ancak asfalt karışımların kohezyon özelliği, asfaltın agregaya yapışma yeteneğine yani asfaltın adezyonuna bağlıdır. Asfaltın adezyon yeteneği yüksek ise karışımın kohezyonu da yüksek olacaktır. Asfaltın adezyonu agregaya yapışabilme yeteneği iken asfaltın kohezyonu yük altında kopmadan uzayabilme yeteneğidir [4]. Şekil 2.2’de bir sathi kaplama

yüzeyinde araç tekerleğinin etkisi altında agrega ve bağlayıcı arasındaki adezyon ve kohezyon davranışları görülmektedir.



Şekil 2.2. Asfalt agregası arasındaki adezyon - kohezyon davranışları.

Asfalt karışımlardaki hasar, bağlayıcı bünyesinde yada bağlayıcı ile agrega ara yüzeyinde meydana gelebilir. Asfaltlı karışımlar, agregaları saran asfalt filminin ince olması durumunda adeziv yapışmanın kırılmasından dolayı, asfalt filminin kalın olması durumunda ise bağlayıcının kendi bünyesindeki hasardan dolayı bozulmaktadır. Diğer bir ifade ile film kalınlığı ince olduğu zaman karışımın performansını adeziv yapışma kontrol etmekte ve suyun olması gibi kritik bir durumda karışımın dayanımını adeziv yapışma dayanımı belirlemektedir. Asfalt film kalınlığının artması ile hasar dayanımını bağlayıcının kohezyon özelliği kontrol etmektedir.

2.1. Adezyon Teorileri

Terrel ve Shute, asfalt ve agrega arasındaki adezyonu açıklamak için 3 teori tanımlamışlardır. Bunlar kimyasal reaksiyon, yüzey enerjisi - moleküler uyuma ve mekanik

kenetlenmedir. Bu teorilerin her biri tek başına tam olarak adezyonu açıklamaz. Adezyonu bu teorilerin bir kombinasyonu açıklar. Terrel ve Shute'a göre bu üç teori, asfalt ve agreganın yüzey gerilmesinden, kimyasal kompozisyonundan, asfaltın viskozitesinden, agreganın yüzey pürüzlülüğü, porozitesi, temizliği ve nem muhtevassından, asfalt çimentosu ile karıştırıldığı andaki sıcaklığından etkilenmektedir [5].

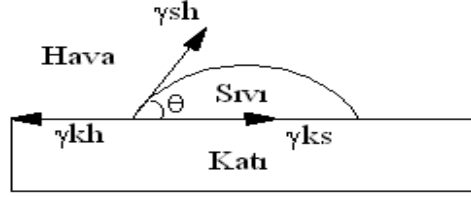
2.1.1. Kimyasal Reaksiyon Teorisi

Kimyasal reaksiyon teorisi, asfalt ve agreganın bazik ve asidik bileşenlerinin, soyulmaya karşı dayanıklı, suda çözünmeyen bileşikler olmak üzere birbiri ile etkileşmesine dayanır. Bu teoride adezyon iki malzeme arasında kimyasal reaksiyon ile oluşmaktadır. Reaksiyon malzemeler arasında hacimsel olarak zarar verilmedikçe kırılmayacak olan bir bağ oluşturur. Fakat bu her zaman bitümlü malzemeler için geçerli değildir. Çünkü bitümlü bağlayıcı agrega üzerinde reaksiyona girmez. Kimyasal bir reaksiyon oluşması için ikinci bir malzemeye, katkı malzemesine ihtiyaç vardır. Bitümlü malzeme ile agrega arasındaki kimyasal etkileşim asit-baz teorisi olarak açıklanabilir. Bronsted ve Lowry tarafından yapılan asit-baz tanımına göre proton verebilen maddelere asit, proton alabilen maddelere ise baz denir. Bu tanımda asit veya baz bir iyon olabileceği gibi bir molekülde olabilir. Lewis tanımına göre ise bir çift serbest elektronu bulunan ve bunu başka bir atom, molekül veya iyonla ortaklaşa kullanabilen maddeye baz, bazın bir çift elektronunu alarak ortaklaşa kullanabilen maddeye de asit denir. Bu teoriye göre adezyon asit ve bazların polar etkileşimi sonucu meydana gelir [6].

2.1.2. Yüzey Enerjisi ve Moleküler Uyuşma Teorisi

Yüzey enerjisi ve moleküler uyuma teorisi, sıvıların katılar üzerindeki adezyon ve absorpsiyon kavramlarının büyük bir çoğunluğu için uygulanmaktadır. Bu teori ıslanma kavramını açıklar ve bir sıvı ile katı arasındaki kontak açısının ölçüsüne dayanır. Bir damla sıvı bir yüzeye yerleştirildiğinde kontak açısı ya 90° 'den büyük olacak şekilde sabit kalır yada 90° 'den küçük olacak şekilde dağılır. Eğer sıvı dağılırsa katının yüzeyi ıslanır ve sıvı ile katı arasındaki adezyon yüksek olur. Eğer sıvı dağılmaz sabit kalırsa adezyon düşük olur. Bu sebeple ilk etapta adezyonun oluşabilmesi için adeziv sıvının yüzey üzerinde ıslatma oluşturması gerekir. Su, düşük viskozite ve düşük yüzey gerilmesine sahip olduğundan asfalta göre daha iyi bir ıslatma sağlar. Agregası, bitüm, su ve hava arasındaki yüzey gerilme adezyonu etkilemektedir. Bu teoriye göre Şekil 2.3'deki kuvvetlerin dengesi formül 2.1'deki eşitlik ile sağlanır.

$$\gamma_{kh} = \gamma_{ks} + \gamma_{sh} \cos \theta \quad (2.1)$$



Şekil 2.3. Katı – sıvı - hava arasındaki yüzeysel etkileşim.

Kontak açısı (θ), katı-sıvı (γ_{ks}), katı-hava (γ_{kh}) ve sıvı-hava (γ_{sh}) arasındaki etkileşim kuvvetleri ile kontrol edilir. Islatan sıvılar pozitif ıslatmayanlar ise negatif adezyon gösterirler. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi kontak açısı ne kadar küçük olursa adezyon da o kadar artmaktadır.

Yapılan çalışmalar uygun bir asfalt agregası kombinasyonunun yüzey enerjisi ölçümü ile tespit edilebileceği, asfaltın polaritesinin artması ile serbest yüzey enerjisinin ve dolayısıyla agregası ile arasındaki adezyonun arttığı, asfalta asit içeren katkı maddeleri ilavesi ile polaritenin artacağı ve kontak açısının azalacağı belirtilmiştir [7].

2.1.3. Mekanik Kenetlenme Teorisi

Mekanik kenetlenme teorisi, pürüzlü yüzeylerdeki adezyonu açıklamaktadır. Agregası ve bağlayıcı arasında hızlı bir ilk ıslatmadan sonra çok küçük boşluklar sıvı ile dolmakta ve katılaşmaktadır. Kenetlenme sonucunda kompozit bir malzeme gibi davranan ara yüzey oluşur. Boşlukların sıvı ile dolması sonucu meydana gelen kenetlenme viskozite ile önemli ölçüde etkilenmektedir. Sıvı asfaltların viskozitesi 6-70 pa.s arasında değişmektedir. Bütün sıvı asfaltlar mekanik kenetlenmede aynı etkiyi göstermezler. Düşük viskoziteli bir asfalt, agregası yüzeyinde yüksek viskoziteli bir asfalta göre daha derine iner ve iyi bir mekanik kenetlenmeyi temin eder. 90 pa.s viskozite değerinin altındaki bir asfalt, agregayı ıslatabilir ve 0,1 mm derinlikteki küçük boşluklar içerisine 5 dakika içinde girebilir. Daha yüksek viskoziteli asfaltlar için bu süre, saatlerle ölçülmektedir [8]. Asfaltın soğuma hızı adezyon üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Filler gibi küçük parçalar da asfaltın boşluklara dolmasına mani olmaktadır. Bu sebeple düşük viskoziteli asfaltlar adezyon için daha uygundur. Fakat asfaltın viskozitesini düşürmek için gereğinden fazla ısıtmak önerilmez. Düşük viskoziteli asfaltlar 40-70 °C de tekerlek yükleri ile birlikte akmaya başlarlar sıfırın altındaki sıcaklıklarda ise esnekliklerini kaybederler. Bağlayıcının, servis süresi içindeki uygun fiziksel özelliklerin temin edilebilmesi için bir alt viskozite limiti, agregası penetrasyonu için de bir üst viskozite değeri seçilmelidir

2.1.4. Diğer Teoriler

Kimyasal reaksiyon, yüzey enerjisi ve moleküler uyuşma, mekanik kenetlenme teorilerden başka difüzyon, elektrostatik ve zayıf sınır tabakası teorileri vardır. Difüzyon teorisi yüksek viskoziteli ve kauçuk gibi malzemelerin adezyonunu açıklar. Malzemelerin birbiri içinde difüzyon olduktan sonra ara yüzeyinde meydana gelen uzun zincir bileşenler yapışmayı sağlamaktadır. Burada malzemelerin birbiri içinde difüzyonu ısıtma ile gerçekleşmektedir.

Elektrostatik teoriye göre adezyon, malzemelerin temas noktalarındaki elektrik yüklerinin etkileşimi ile meydana gelmektedir.

Zayıf sınır tabakası teorisi iki malzemenin birbirine nasıl yapışabileceğini değil neden yapışamayacağını açıklar. Bu teoriye göre kopma, malzemelerin ara yüzeyindeki en zayıf noktada meydana gelmektedir. Bu bozukluklar iyi bir ıslatmanın sağlanmaması, boşlukların olması ve ara yüzeyde kirli malzemelerin olmasından kaynaklanmaktadır. Bu bozukluk, agreganın yapısındaki yada sıkışma sırasında oluşan kılcal çatlaklar da olabilir. Yaşlanmış üst yapılar kılcal çatlakların oluşmasına karşı çok hassastır. Bu kılcal çatlaklar donma çözülme periyotları ile meydana gelerek asfalt betonunun dayanımını düşürür. Bu periyotlar sırasında agrega yüzeyi küçük parçacıklar şeklinde kırılmakta ve bağlayıcı ile birlikte ayrılmaktadır [9].

2.2. Asfalt ve Agrega Özelliklerinin Adezyon Üzerine Etkisi

Asfalt ile agrega arasındaki adezyon, agrega ve asfaltın fiziksel, kimyasal özelliklerine göre farklılıklar göstermektedir.

Asfalt, molekül ağırlıkları farklı hidrokarbonların bir karışımı olup n-heptan'da çözülen kısmına malten, çözünmeyen kısmına da asfalten adı verilir. Maltenler kısımlarına ayrıldığında; aromatikler, reçineler ve doymuş hidrokarbonlardan oluşur. Asfaltenler gri-siyah veya kahve renkli amorf katılardır. Karbon, hidrojen, biraz nitrojen, sülfür ve oksijen içermektedirler. Asfaltenler genellikle oldukça yüksek molekül ağırlıklı, polar ve kompleks aromatik maddelerdir. Asfalten fazı, malzemenin reolojik özelliklerine önemli derecede etki eder: Asfaltenin artmasıyla, asfalt çimentosu sertleşerek daha düşük penetrasyona ve daha yüksek yumuşama noktasına sahip olur, sonuçta yüksek viskoziteli bir malzeme elde edilir. Bir asfalt çimentosundaki asfalten miktarı % 5 ile %25 arasında değişmektedir.

Reçineler, n-heptanda çözünmekte, asfaltenler gibi çok miktarda karbon ve hidrojen, biraz da nitrojen sülfür ve oksijen içermektedirler. Koyu kahve renkte, katı veya yarı-katı ve oldukça polar maddelerdir. Bu yapısal özellik, onları oldukça yapışkan yapar. Bunlar,

asfaltlenleri dağıtan kısımdır ve asfaltlenlerin dağılma derecesine göre asfalt imentosu “Solution” (SOL) veya “Gelatinous” (GEL) olarak adlandırılır.

Aromatikler, asfalt çimentosunun içinde bulunan en düşük molekül ağırlıklı naftanik aromatik bileşiklerdir. Bitümün % 40 ile % 65’ini oluştururlar; koyu kahve renkte ve viskoz sıvıdırlar. Diğer yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbonlara göre daha yüksek çözünme özelliğine sahiptirler

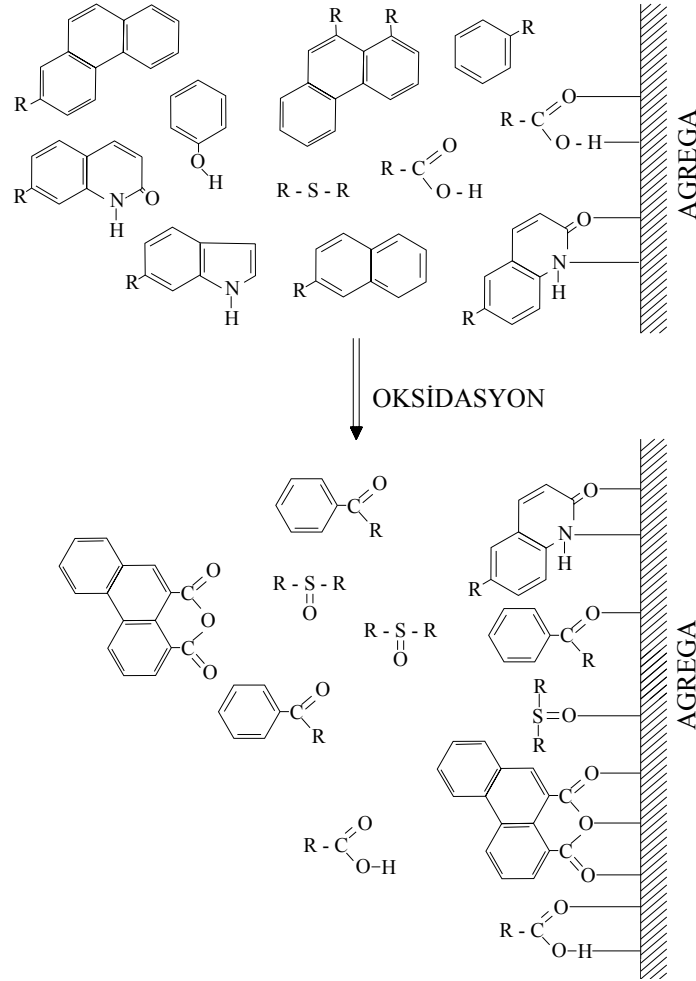
Doymuş hidrokarbonlar, beyazımsı renkte, polar olmayan viskoz yağlardır. Ortalama molekül ağırlıkları aromatikler kadardır. Bu fraksiyon, bir asfalt imentosu içinde % 5-20 civarındadır [10].

Plancher, agrega yüzeyindeki asfaltta bulunan fonksiyonel grupların miktarının karboksilik asid > anhidrit > 2-quilones > slfoxid > nitrojen tipleri > keton şeklinde sıralandığını, suyun etkisinden sonra agrega yüzeyinde kalan fonksiyonel grupların miktarının ise, keton > 2-quilones > nitrojen tipleri > slfoxid > anhidrit > karboksilik asid şeklinde sıralandığını belirtmiştir [11].

Thomas, asfaltın oksidasyonu sonucu sulfonik asit ve keton gibi polar bileşenlerin oluştuğunu bunlardan sulfonik asidin nem hasarını artırdığını ketonun ise azalttığını, agregaların CaCO_3 içeriğinin artması ile bozulmaya neden olan donma-çözülme periyotlarının parabolik bir şekilde arttığını tespit etmiştir [12].

Huang, asfalt agrega arasındaki adezyona etki eden etkileşimler ile kimyasal özellikler arasındaki ilişkinin zaman içerisinde ve sistemde suyun olması durumunda nasıl değiştiğini incelemiştir. Asfalt-agrega ara yüzeyindeki yapışma dayanımının, oksidasyondan sonra nasıl değiştiğini deneysel olarak incelemiştir. alışmasında agrega olarak kireç taşı ve granit, bağlayıcı olarak ise AAB-1 asfaltını kullanmıştır. Hazırladığı numunelere indirek çekme deneyi uygulamıştır. 100 C’de 20 saat yaşlandırmaya tabi tutulan ve asfalt ağırlığının %20’si oranında kireç ilave edilen numunelerden iki grup hazırlamıştır. Birinci grup kuru ikinci grup ise yaş numunelerdir. Yaş numuneler –18 C’de 15 saat, 60 C suda 24 saat bekletilme bir periyot olmak üzere farklı sayıda donma çözünme periyotlarına tabi tutulmuştur. Numuneler test edildikten sonra içerdikleri asfalt, santrafj ile çıkartılarak kimyasal analizleri yapılmıştır. Çalışmada bütün numunelerin indirek çekme oranlarının donma çözülme periyotlarının artması ile düştüğü, granit agregalı numunelerde bu düşüşün en fazla, %20 kireç ilaveli numunelerde ise en az olduğu tespit edilmiştir. Her iki agrega ile hazırlanmış numunelerin nem hassasiyetlerinin yaşlandırmadan sonra arttığı ve bu artışın kireç taşı agregalı numunelerde daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal analiz sonuçlarına göre ise ilave edilen kirecin, agrega yüzeyindeki bazık bileşenler ile bağ kuran ve suyun etkisi ile kolaylıkla sistemden uzaklaşabilen karboksilik asidin suya karşı dayanımını artırdığı ayrıca oksidasyon sonucunda oksijen içeren keton ve

sulfoxid gibi yeni foksiyonel grupların oluştuğu ve bunların da asfalt agrega adezyonunu artırdığı belirtilmiştir [13]. Şekil 2.4’de oksidasyon sonucu oluşan bağlar görülmektedir.



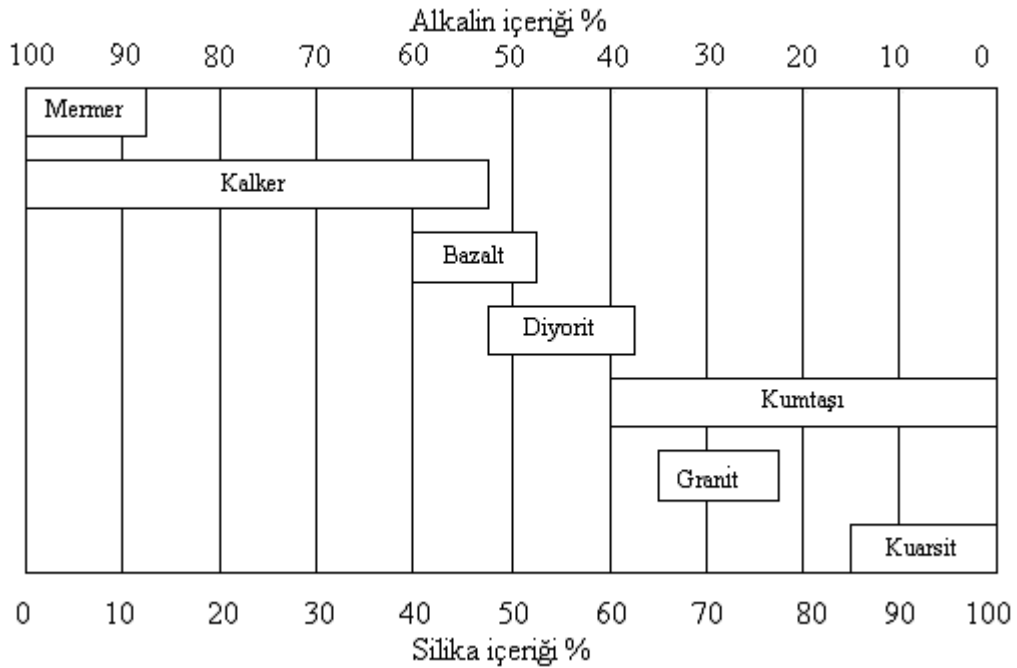
Şekil 2.4 Oksidasyon etkisi.

Robertson, organik moleküllerde elektrik yükü dağılımının yani polarlaşmanın agrega ile asfalt arasındaki etkileşimi artırdığını, genelde ne agreganın ne de asfaltın net bir yük dağılımına sahip olduğunu, bunların birbirlerinin zıt kutupları ile etkileşime girecek şekilde davrandığını belirtmiştir. Robertson, belli bir molekül seviyesinde nitrojen bileşiklerin agrega yüzeyine çok sıkı bir şekilde yapıştığını belirtmiştir ve ayrıca tamamiyle polar olan kuru agrega yüzeyine güçlü bir şekilde yapışan ve suyun etkisi ile kolaylıkla yok olan karboksilik asidi tarif etmiştir [14].

Asfaltın polaritesi, içinde bulunduğu kısımların miktarına göre değişmektedir. Asfalt içindeki polarite sıralaması doymuşlar < aromatikler < reçineler < asfaltenler şeklindedir. Dolayısıyla yüksek polarite ve iyi yapışma potansiyeline sahip asfaltlar asit-baz teorisine bağlı olarak yüksek asfalten ve reçine oranı içermektedir. Fakat böyle bir durumda da asfalt kırılğan bir yapı almaktadır.

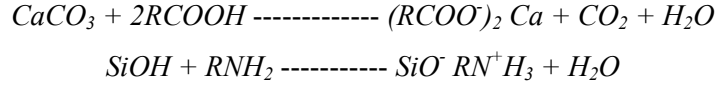
Siddiqui, yaptığı çalışmasında 2 farklı asfalt ve 3 farklı agrega ile asfalt –agrega arasındaki yapışma ilişkisini araştırmıştır. Burada net adsorbsiyon deneyi uygulanmıştır. Agreganın asfalt adsorbsiyonu üzerinde etkili olduğu ve soyulmadan sonra agrega yüzeyinde kalan asfalt üzerinde yapılan IR deneyinde Keton, karboksilik asit, sülfoksid gibi fonksiyonel grupların bulunduğu ve en çok adsorbe edilen grubun karboksilik asit olduğu, asfaltın oranı yüksek olan parafinik asfaltın kireç taşı ile, asfaltın oranı düşük aromatik asfaltın ise granit ile iyi adezyon sağladığı tespit edilmiştir. [15]

Genel bir hipotez asidik agregaların hidroforik (su tutmayan) bazik agregaların ise hidrofil olduğu şeklindedir. Asfalt agrega etkileşiminde agreganın yüzey pürüzlülüğü, şekli, agrega yüzeyinin çevresel etkilerden dolayı yaşlanması, boşlukların hacmi ve dağılımı, yüzeydeki kimyasal bileşenler, yüzeyin elektrik yükü yada polaritesi, agreganın kuru yada yaş olması etkili olmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü agreganın uygun bir şekilde kaplanabilme kabiliyetine etki etmekte ve iyi bir ilk kaplama iyi bir adezyon için gereklidir. Geniş yüzey alanına ve asfaltın penetre olacağı şekilde uygun boşluklara sahip agregalarda adezyon artmakta, ince boşluklara sahip yuvarlak yüzeye sahip agregalarda ise asfalt ince boşluklara girememekte ve hava hapsolmektedir. Diğer taraftan asfaltın boşluklara girmesi sadece boşluk yapısına değil asfaltın viskozitesine ve karışımın sıcaklığına da bağlıdır. Yol yapımında kullanılan agregalar asidik ve bazik olarak nitelendirilebilir. Şekil 2.5’de agregaların alkalin ve silika içerikleri görülmektedir.



Şekil 2.5. Agregaların alkalin ve silika içerikleri.

Bir çok çalışmada asfaltın asidik özellik sergilediği ve dolayısıyla bazik agregalarla daha iyi yapışma sağladığı, silisli agregalar ile asfalt arasındaki adezyonu artırmak için ise alkalın içerikli katkıları kullanıldığı belirtilmiştir [16,17,18]. Alkalın ve silisli agregalar ile asfalt arasındaki ilişki sırasıyla aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.



Strategical Highway Research Programme'a (SHRP) göre agreganın özellikleri, bağlayıcının özelliklerine göre adezyon üzerinde daha çok öneme sahiptir. Adezyon bitümün polar bileşenlerinin agrega ile hidrojen bağı, Wander Walls bağı ve elektrostatik kuvvet oluşturması ile gerçekleşmektedir. Yoon ve Tarrer hemen hemen aynı fiziksel özelliklere sahip kireç taşının kuvarsta göre asfalt ile arasında yüksek bir yapışma gücüne sahip olduğunu belirtmişlerdir [19]. Cheng, yüzey enerjisi ölçümünden hesaplanan adeziv yapışmanın birim alandaki enerji cinsinden değerlendirilmesi durumunda granit agregalarda kireç taşına göre daha yüksek olduğu fakat yapışmanın birim agrega ağırlığı cinsinden değerlendirilmesi durumunda yapışma enerjisinin kireç taşında oldukça yüksek olduğunu tespit etmiştir [20].

2.3. Asfalt –Agrega Adezyonunun Artırılması

Bitümlü sıcak karışımlarda asfalt-agrega adezyonunun artırılması, nem hassasiyetinin azaltılması iki grup yöntemle yapılmaktadır. Birincisi bağlayıcı ile ilgili olan iyileştirmeler ikincisi ise agrega ile ilgili olan iyileştirmelerdir. Çok değişik kimyasallar bitümlü sıcak karışımların nem hassasiyetini azaltmak ve adezyonu artırmak için kullanılmaktadır.

Bitümlü bağlayıcıya ilave edilen kimyasallar değişik isimlerde satılan alkali aminlerdir. Bu kimyasallar direk olarak ya rafineride yada yapım sırasında bağlayıcıya ilave edilmektedir. Polimerler de soyulmayı önleyici ve adezyonu artırıcı katkıları olarak kullanılmaktadır.

Agrega ile ilgili olarak yapılan iyileştirmeler, agregaya hidrate kireç, portlant çimentosu, uçucu kül ve polimer ilavesidir. Bu malzemeler genellikle karışıma, bitümlü bağlayıcı girmesinden önce agregaya ilave edilmektedir. Hidrate kirecin agregaya ilavesi en çok kullanılan iyileştirme yöntemidir. Portlant çimentosu ilavesi çok fazla tercih edilen bir işlem değildir. Agregaya polimer ilavesi üzerinde ise çok az çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda karışıma katkı ilavesinin gereksiz yada doğru olarak ilave edilmemesi durumunda ters etki yapacağı bunun sonucunda kaplamada erken bakım ve rehabilitasyon gerekeceği belirtilmiştir.

Yapılan çalışmada bağlayıcıya %1 oranında sıvı soyulma önleyici katkı ilavesinin asfaltın yaşlanmadan sonra artan viskozitesini %30 oranında düşürdüğü, etkili sıvı soyulma önleyici katkı dozajının bağlayıcı ağırlığının %0,5-0,75'i olduğu, bu etkinin agrega ağırlığına göre ilave edilen %1 oranındaki hidrate kireç ile de elde edilebileceği, bu katkıların bitümlü sıcak karışımın davranışına etki ederek üst yapının tekerlek izi oluşumunda, yorulma ve soyulma davranışları üzerinde etkili olabileceği belirtilmiştir [21].

Soyulma önleyici katkılar ve kirecin etkisi agrega tipine, etkinin değerlendirilmesi ise kullanılan deney yöntemine göre farklılıklar sergilemektedir. Deney şartları ne kadar ciddi ve kapsamlı ise katkılarının etkinliği arasındaki fark o kadar açığa çıkmaktadır [22]. Yapılan çalışmalarda BSK'ya kireç ilavesinin sıvı soyulma önleyici katkılardan daha etkili olduğu, kireç ilavesinin agrega ve asfalt arasındaki yapışma kuvvetini artırdığı, karışımın yorulma dayanımını artırdığı, kalıcı deformasyon yada tekerlek izi oluşumunu azalttığı tespit edilmiştir [23,24,25].

Kireç ilavesi, mikse bağlayıcının girmesi sırasında kuru olarak, kuru yada nemli agregaya önceden kuru ve hidrate olarak ilave edilerek yapılmaktadır. Sönmemiş kireç ilavesi su ile temasa geçtiğinde, hacimsel değişmelere neden olup dayanımı ve performansı düşürdüğünden dolayı kullanılmamaktadır. Hidrate kireç ilavesinin, agrega üzerindeki tozlanmayı önlemesi ve agregalar arasında iyi bir şekilde dağılması gibi avantajları vardır.

Little, BSK'larda kirecin faydaları ile ilgi yaptığı çalışmasında, kirecin mineral filler gibi davrandığını bağlayıcının ve BSK'nın rijitliğini artırdığını, düşük sıcaklıklarda çatlak gelişimine karşı olan dayanımı artırdığını, oksidasyon sonucu oluşan ürünler ile etkileşime girerek bunların olumsuz etkilerini azalttığını, kil parçacıklarının plastik özelliklerini nem stabilitesi ve durabiliteyi iyileştirecek şekilde değiştirdiğini belirtmiştir [26].

Paul, agrega, asfalt çimentosu ve soyulmayı önleyici katkılarının uygunluğunu incelediği bir çalışma sunmuştur. Çalışmasında 18 değişik agrega 5 değişik asfalt çimentosu 11 değişik katkı kullanmış kaynama deneyi, Lottmann indirek çekme deneyi ve donma çözülme deneylerini uygulamıştır. Katkılarının 4 tanesi yüksek 4 tanesi düşük etkili sıvı soyulma önleyici bir tanesi süper katkı, diğer ikisi ise kuru ve sulandırılmış kireçten oluşmaktadır. Çalışmada kireç taşı agregaların en iyi performansı sergilediği granit kökenli agregaların ise soyulma önleyici katkı kullanılması durumunda bile yüksek bir nem hasarı potansiyeline sahip olduğu, %0,5 oranındaki soyulma önleyici katkının yeterli olmadığını, %1,25 oranının kaynama deneyinde daha etkili sonuçlar verdiği, sulandırılmış hidrate kirecin ve yüksek etkili katkılarının diğer katkılara göre daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan üç deney yönteminin de nem hassasiyetini belirlemede arazi şartları ile ilgili olarak iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [27].

Aksoy, iki yağlı amin (WetfixI, Lilamin VP 75 P) bir katalist (chemcrete) ve bir polimerin asfalt karışımların nem hassasiyeti üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Karışımlar Marshall, indirek çekme ve Lottman deneyine tabi tutulmuştur. %0,2 WetfixI, %0,4-0,6 Lilamin VP 75 P katkılı karışımların, indirek çekme mukavemeti oranlarının 0,70 den büyük olduğunu ve nem hasarlarının düşük olduğunu tespit etmiştir [28].

Shulder ve Douglas açık gradasyonlu asfalt karışımlarda soyulma problemini incelemiştir. Normal ve polimer modifiyeli bağlayıcıları, soyulmayı önleyici katkılar ve hidrate kireç ile kullanmış, bu şekilde katkıların soyulmayı önemli derecede azalttığını tespit etmişlerdir [29].

Kandhal, BSK'ların nem hassasiyeti problemini tanımladığı ve çözüm önerileri sunduğu çalışmasında, yetersiz üst yapı drenajı, BSK'nın yetersiz sıkışması, agregaya yüzeyindeki aşırı tozlanma, agreganın asfalt ile karıştırılmadan önce yeterince kurutulmaması, zayıf ve gevrek agreganın kullanımı, BSK'nın bozulmuş beton yolların üzerine serilmesi gibi faktörlerin, problemin ortaya çıkmasında etkili olduğunu belirtmiş, problemin çözümü için kullanılan soyulma önleyici katkı ve kirecin etkinliğini araştırmıştır. Çalışmada modifiye Lottman deneyi kullanılmış ve bu deney yönteminin potansiyel nem hassasiyetini belirlemede etkin bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Ayrıca soyulma önleyici katkıların agregaya ve asfalt cinsine göre değişik etkiler gösterdiğinden bütün BSK'lar için etkili olamayacağı, bazı BSK'ların nem hasarına dayanabildiğini ve dolayısıyla bu katkıların ekonomik olamayacağı, laboratuvar ve arazi çalışmalarından kireç ilavesinin soyulmayı önlemede çok etkili olduğu ve kirecin sulandırılmış şekilde kullanılmasının daha etkili olduğu tespit edilmiştir [30].

Kerh, BSK'da filler olarak kaya tozu, %1 kireç ve %1 çimento katkılı kaya tozunu kullanarak bu işlemlerin BSK'nın soyulma dayanımı dahil bazı mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini araştırmıştır. Sonuçta filler olarak kullanılan kaya tozuna %1 kireç ilavesinin, stabiliteyi, indirek çekme oranını, soyulma deneyinden sonra agregaya yüzeyinde kalan asfalt yüzdesini ve dinamik stabiliteyi artırdığını, akmayı ve tekerlek izi oluşumunu azalttığını ve böylece kaplamanın durabilitesi ve ömrünü artırdığını tespit etmiştir [31].

Katinpong, soyulma önleyici katkıların ve polimerlerin, bağlayıcının adezyon özelliklerine olan etkisini ve bu etkinin laboratuvarla su ile koşullandırılmış numunelerin performansı ile olan ilişkisini değerlendirmiştir. Numunelere indirek çekme, tek eksenli serbest basınç ve Hamburg tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır. Bağlayıcı, kimyasal katkıları, polimerler ve oksidasyon ile modifiye edilmiştir. Agregaya olarak granit ve kireçtaşı kullanılmıştır. Sonuçta asfalt karışımının performansının, önemli derecede modifikasyon tekniğine ve su ile koşullandırmaya bağlı olduğu, polimer modifiyeli asfaltlar ile üretilmiş BSK'ların en iyi performansı sağladığı, polimer modifikasyonu ile tekerlek izi direncinin arttığı,

bağlayıcının adezyon ve kohezyon özelliklerinin iyileştiği, soyulma önleyici katkıları ile ise sadece karışımın diğer özelliklerini değiştirmeden adezyon özelliğinin arttığı tespit edilmiştir [32].

Yamaguchi, yaptığı çalışmada doğrudan asfalt bağlayıcıya ağırlığının % 20'si oranında Carbon Black (CB) ilave etmiştir. Bu şekilde özellikle oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda asfaltın elastik modülünün arttığını viskozitesinin ise düştüğünü belirtmiştir. CB ilavesinin düşük sıcaklıklarda bozulmaya neden olan birim şekil değiştirmesini artırdığını, asfaltın termal genleşme katsayısının agregaya yakın olacak şekilde azalttığını, böylece agregaya ile asfalt arasındaki termal genleşme katsayılarının farklı olmasından dolayı oluşan gerilmelerin azaldığını, yüksek sıcaklıklarda deformasyon direncini, düşük sıcaklıklarda ise çatlak oluşma direncini artırdığı, CB ilavesinin asfalt karışımlarının durabilitesinin iyileştirilmesinde etkili bir katkı olduğu belirtilmiştir [33].

3. NEM HASSASİYETİ

Esnek kaplamalarda sistemde suyun yada nemin olması, asfalt-agrega karışımı arasındaki bağı zayıflatarak adezyonu, asfalt bağlayıcı bünyesinde değişiklikler yaparak kohezyonu etkilemektedir. Asfalt agregası arasındaki yapışmanın kaybolması ve/veya bağlayıcının özelliklerinin değişmesi bitümlü karışımlarda çok önemli mühendislik özelliklerinin değişmesine ve üst yapının bozulmasına neden olmaktadır. Trafik miktarı, dingil yükleri ve lastik basınçlarının artması, agregası ve bağlayıcı özelliklerinin değişmesi, yapım ve tasarım, üst yapıda meydana gelen bozulmalarda etkili olan parametrelerdir. Nem hassasiyeti ise bütün bu faktörlerin neden olduğu bozulmaların şiddetini artırmaktadır. Nem hassasiyetinin soyulma, tekerlek izi oluşumu ve yorulma ömrü üzerinde önemli etkileri vardır. Bitümün yaşlanması ve bağlayıcı oranının az olmasının yanı sıra nem, asfaltı agregadan ayırmakta ve soyulmaya neden olmaktadır. Nemin tekerlek izi oluşumuna etkisi ise BSK'nın dayanımını düşürmesinden dolayı meydana gelmektedir. Ayrıca tekerlek izi oluşumu esnasında kusmalar meydana gelmekte ve soyulma da gerçekleşmektedir. Yorulma tekrarlı yükler ve dolayısı ile meydana gelen yüksek gerilme ve şekil değiştirmeler ile ilgilidir. BSK'nın rijitliğinde meydana gelen azalma BSK'ların yorulma kapasitesini aşacak yüksek gerilmelere ve şekil değiştirmelere neden olur. Nem, bu rijitliğin azalmasına ve tekrarlı trafik yüklerinin meydana getirdiği gibi yüksek gerilmelere neden olmaktadır [34].

3.1. Soyulma

Soyulma, agregası ile asfalt çimentosu arasındaki yapışmanın zayıflamasından dolayı BSK'ların bütünlüğünün azalması olarak tarif edilir. Asfalt agregası arasındaki adezyon eksikliği BSK'nın dayanımının aniden düşmesine neden olur. Soyulma genellikle BSK'nın alt tabakalarından başlayıp yukarı doğru hareket eder. Tipik bir durum, yıllar içerisinde dayanımın yavaş yavaş kaybolması ve bunun sonucunda da tekerlek izi oluşumudur. Şekil 3.1'de bu durum görülmektedir.

Çoğu zaman soyulmaya işaret edecek yüzeydeki belirtilerin oluşması yıllar alacağından, soyulmayı belirlemek zordur. Diğer taraftan yüzeydeki belirtiler tekerlek izi, sökûlmeler ve çatlaklardan dolayı olabilir. Soyulmanın tam olarak belirlenebilmesi için BSK'ların kesitinin incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 3.1. (a) Soyulma olmamış numune, (b) Soyulma sonucu tekerlek izi oluşan numune.

Soyulmada rol alan önemli faktörler, agrega ve bağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri, aralarındaki etkileşimi, üstyapı tasarımı, karışım tasarımı, serim ve sıkıştırma, yüzey drenajı ve/veya alt tabakalardaki drenaj, trafik olarak sıralanabilir. Bütün soyulma problemlerinde ortak faktör, agrega ve asfalt ara yüzeyinde su ve nemin olmasıdır.

Genellikle BSK'ların tasarımında %3-5 hava boşluğu öngörülmektedir. Hava boşluğu %5'in altında olduğu zaman bitümlü sıcak karışım suya karşı hemen hemen geçirimsiz olmaktadır. Ancak gradasyonu ve bağlayıcı oranları uygun tespit edilmemiş, yapım sırasında sıkışma kontrolü iyi yapılmamış kaplamalarda yüksek hava boşlukları meydana gelmektedir. Hava boşluklarının % 8'in üstünde olması durumunda ise su kolayca sıkışmış karışımın içine sızabilmektedir [34].

Nemin ve suyun bitümlü sıcak karışım tabakası içine girmesinin bir çok yolu vardır. Yer altı suyunun kapilarite ile yükselmesi, yağış ve kaplamayı çevreleyen arazideki sızıntılar bunların başlıcalarıdır. Yeterli drenaj mevcut değilse BSK'nın içindeki boşluklar nem ve su ile doymun hale gelerek, iç basıncın artmasına ve yapışmanın yok olmasına neden olur.

Agregaların aşırı tozlu olması, agreganın asfaltla temasını engelleyerek agreganın tam olarak asfaltla kaplanmasını önlemektedir. Agreganın üstündeki toz ve kirler suyun penetrasyonu için kanallar oluşturabilmekte ve aynı zamanda asfaltı absorbe ederek agrega yüzeyindeki asfalt film kalınlığının az olmasına neden olmaktadır [35]. Literatürde, sökölme (dettachment), yer değiştirme (displacement), kendiliğinden emilsiyonlaşma (spontaneous emulsification), gözenek basıncı (pore pressure), hidrolik yıkanma (hydraulic scour) ve pH kararsızlığı (pH instability) olmak üzere 6 tip soyulma mekanizması tanımlanmıştır [35,36,37].

3.1.1. Sökölme

Sökölme tipi soyulmada, asfalt filmi agrega yüzeyinden, filmde bir kırılma olmaksızın ince su filmi ile dağılmaktadır. Adezif yapışma enerjisi teorisi, sökölme tipi soyulmayı açıklar. İlk etapta, asfalt ve agrega arasında iyi bir bağ geliştirmek gereklidir. Böyle bir bağ ilk önce asfaltın agregayı ıslatabilme kabiliyetine bağlıdır. Majidzadeh ve Brovold'a göre su, asfalt ve agregadan oluşan üç fazlı bir yüzeyde su, sistemin serbest enerjisini asfalta göre daha çok azaltır. Suyun olması durumunda agrega ile asfalt ara yüzeyindeki serbest enerji hesaplandığında, agrega yüzeyinin asfalttan daha çok, kuvvetli bir şekilde suyu tercih ettiği tespit edilmiştir. Asfalt agrega arasında ki yüzey enerjisi ölçümünde suyun olması durumunda negatif değerler çıkmaktadır. Bu değer ne kadar çok negatif olursa, suyun olması durumunda, bu tip soyulma ile asfaltın agregadan sökölmesi o kadar kuvvetli olacaktır [38]. 1962'de Road Research Laboratory'de yapılan çalışmada çoğu asfaltın düşük polar aktiviteye sahip olduğu, buna karşın suyun yüksek derecede polar olduğu ve bu sayede asfalt-agrega yüzeyinde suyun asfaltla yer değiştireceği ileri sürülmüştür [38].

3.1.2. Yer Değiştirme

Yer değiştirme tipi soyulma, bir yönüyle sökölme tipi soyulmadan ayrılmaktadır. Burada agrega yüzeyindeki asfaltın yer değiştirmesi asfalt filmindeki bir kırılmadan meydana gelmektedir [39]. Bu kırılmanın nedeni agrega yüzeyinin tam olarak asfaltla kaplanmaması, agreganın keskin köşelerinde asfalt filminin kırılması, agreganın kaplanması sırasında asfalt filminde küçük deliklerin kalması olabilir. Adezyonun kimyasal reaksiyon teorisi bu tip soyulmayı açıklamada kullanılabilir. Buna göre yer değiştirme işlemi agrega yüzeyindeki suyun pH değişikliklerinden dolayı ilerler. Bu pH değişimi absorbe edilen polar grupların tipini değiştirmekte ve agrega ve asfalt yüzeyinde negatif yüklü yüzeyler oluşmasına yol açmakta ve fiziksel bir ayrışmaya neden olmaktadır.

3.1.3. Kendiliğinden Emilsiyonlaşma

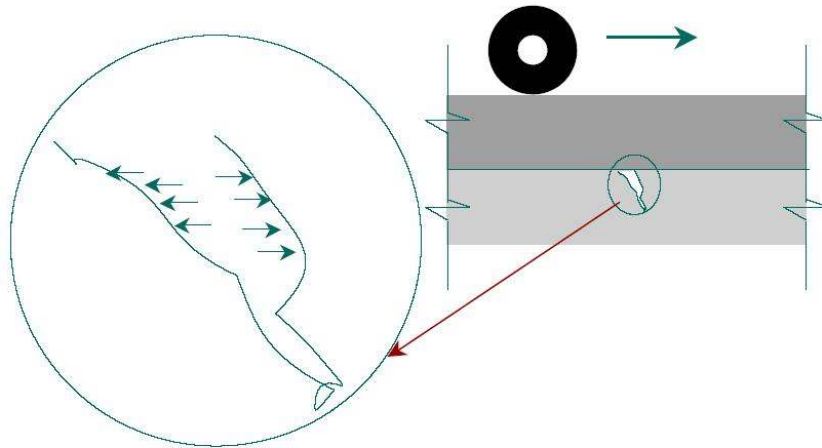
Kendiliğinden emilsiyonlaşma, su damlacıklarının asfalt çimentosu içinde ters emilsiyonudur. Fromm, kendiliğinden emilsiyonlaşmanın, asfalt filminin suya batmasından meydana geldiğini ve emilsiyonlaşma hızının ise asfaltın yapısı ve katkılara dayandığını belirtmiştir. Bu ters emilsiyonun alt tabaklara penetrasyonu adezif yapışmayı kırmakta ve bu emilsiyonlaşma, kil ve katkı maddeleri ile daha kötü hale gelmektedir [40].

3.1.4. Gözenek Basıncı

Asfalt kaplama karışımlarının tasarımı, asfalt ve agrega malzemesinin seçilmesi ve karışımın davranışını etkileyen bir çok değişken arasında bu malzemelerin uygun bir şekilde oranlanması yönüyle çok aşamalı bir işlemdir. Trafik ve iklim, dış faktörler olarak tasarım işleminin parçalarıdır. Her hangi bir tasarım için performans faktörleri şu amaçları içerir :

- Yorulma ömrünü artırmak
- Potansiyel tekerlek izi oluşumunu azaltmak
- Düşük ısıların çatlamalar üzerine olan etkisini azaltmak
- Yaşlanma hızını kontrol yada minimize etmek
- Suyun etkisini azaltmak.

Çoğu durumda üst yapıdaki su, bu amaçlardan her hangi birini etkileyerek kaplamanın bütünüyle performansını azaltmaktadır. Karışımın bütünlüğünün dağılmasından dolayı soyulma ve yapışma kaybının etkileri, kohezyon eksikliğinden daha açıktır. Kohezyon eksikliği, rijitlik ve dayanımda önemli eksikliklere neden olabilir. Havanın yada nemin boşluklu sisteme girmesi yaşlanmayı hızlandırır ve böylece üst yapı ömrünü azaltır. Kaplama içindeki boşlukların karakteristiği performans üzerinde önemli rol oynamaktadır. Laboratuarda yoğun gradasyonlu karışımlar %4 hava boşluğunda tasarlanırlar fakat gradasyon ve bağlayıcı oranlarının uygun tespit edilmemesi ve yapım sırasındaki sıkıştırma eksiklerinden dolayı BSK'daki hava boşluğu oranı %8-10 olabilmektedir. Bu boşlukların su ile doymun hale gelip donma çözünme periyotlarına maruz kalması BSK'nın dayanımını, kuru olana göre önemli derecede azalmaktadır. Tekrarlı trafik yüklerinden gözeneklerdeki suya aktarılan gerilmeler hasarın daha da artmasına, asfalt filminin agrega yüzeyinden uzaklaşmasına yada asfalt filminin çatlamasına neden olur. Şekil 3.2'de gözenek basıncı görülmektedir.



Şekil 3.2. Tekrarlı yüklemelerden dolayı gelişen gözenek basıncı.

Terrel ve Al.Swailmi, yaptıkları çalışmalarında boşlukların miktarı, dağılımı ve büyüklüklerine göre, optimum hava boşluğunun tersi olan “pesimum hava boşluğu” terimini kullanmışlardır. Bu çalışmaya göre, karışımdaki boşluklar üç sınıfa ayrılmaktadır. Birinci sınıfa geçirimsiz olacak şekilde, yüksek bağlayıcı oranı ve modifiyeli agrega ve bağlayıcılarla üretilen %4 hava boşluğuna sahip karışımlar; ikinci sınıfa, %8-10 hava boşluğuna sahip yani pesimum bölgede bulunan karışımlar; üçüncü sınıfa ise açık gradasyonlu, %15’den daha yüksek hava boşluğuna sahip karışımlar girmektedir. Pesimum bölgede karışıma giren su, birbiri ile irtibatlı boşluklar arasında kolaylıkla hareket edebilmekte, kaplamadan uzaklaşmadan karışımın içinde kalmakta böylece trafik ve donma çözülme etkilerinden dolayı ek gerilmelere neden olup kaplamanın performansını önemli derecede düşürmektedir. Üçüncü sınıf da ise serbest drenaj söz konusudur. Burada suyun karışıma verdiği zarar, suyun bünyede tutulmamasından dolayı, pesimum bölgedeki karışıma göre daha azdır [41].

3.1.5. Hidrolik Yıkanma

Hidrolik yıkanma, üst yapının yüzeyinde meydana gelir. Burada soyulma, doygun yüzey üzerinde tekerleklerin etkisi ile oluşur. Tekerleklerin önündeki suyun, kaplama içine doğru basınçla itilmesi ve hemen sonra tekerleğin arkasında tekrar tekerlek tarafından geri emilmesi basınç-çekme periyotları oluşturarak asfalt filminin agregadan ayrılmasına katkıda bulunmaktadır [42].

3.1.6. pH Kararsızlığı

Asfalt-agrega yapışması önemli ölçüde temas eden suyun pH’ı ile etkilenmektedir. Scott asfaltla cam arasındaki çekimin, suyun pH değerinin orta derecelerde (9’a kadar) olduğu zaman en yüksek değere ulaştığını belirtmiştir [43]. Kennedy, kaynama deneyinde, farklı kaynaklardan gelen suların, agrega yüzeyinin kaplanmasında önemli değişikliklere neden olduğunu tespit etmiştir [44]. Tarrer, asfalt ve agrega arasındaki yapışmanın yüzeyin kimyasal aktivitesine bağlı olduğunu, arazide agrega yüzeyindeki suyun pH değerinin yüksek olduğunu ve bu yüksek pH değerine karşı dayanımı artırmak için kullanılan soyulmayı önleyici katkıların kür sürelerinin 3 saat gibi uzun bir süre gerektirdiğini, asfalt ve agrega arasındaki kuvvetli bir kimyasal bağın oluşabilmesi için pH değişikliklerine ve yüksek pH değerine karşı koyulması gerektiğini ve bunun da kalsiyum ve bazik tuzlar gibi suda çözünmeyen organik tuzlar oluşturarak başarılabileceğini belirtmiştir. Bu organik tuzlar hızlı bir şekilde oluşabilir ve yüksek pH

değerinden ve değişikliklerinden etkilenmezler. PH değişiklikleri kimyasal bağı etkilememesine rağmen pH değerindeki değişiklikleri uygun bir değerde tutmak önemlidir [45].

3.2. Nem Hasarının Tespitindeki Deneyler

BSK'ların nem hassasiyetinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemleri sıkışmamış gevşek karışımlar üzerindeki deneyler ve sıkıştırılmış karışımlar üzerindeki deneyler olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Sıkışmamış gevşek karışımlar üzerinde, statik daldırma, film soyulma, kaynama, net absorpsiyon ve yüzey enerjisi deneyleri, sıkıştırılmış karışımlar üzerinde ise, daldırma-batırma, Lottman, modifiye Lottman, Hamburg tekerlek izi ve çevresel koşullandırma deneyleri uygulanmaktadır [46].

3.2.1. Sıkıştırılmamış Gevşek Karışımlara Uygulanan Deneyler

Sıkışmamış karışımlara uygulanan deneyler asfaltla kaplanmış ve su içinde bulunan agrega daneleri üzerinde yapılmaktadır. Bu deneyler basit ve ekonomiktirler. Fakat boşluk basıncının, trafik etkisinin ve karışımın mekanik özelliklerinin dikkate alınmaması bir dezavantajdır. Bu deneylerin sonuçları BSK'ların arazideki performansı ile ilişkilendirilemez. Bu tip deneyler farklı agrega-asfalt çifti arasındaki yapışma kuvvetini ve soyulma dayanımını karşılaştırmada iyi bir şekilde kullanılır.

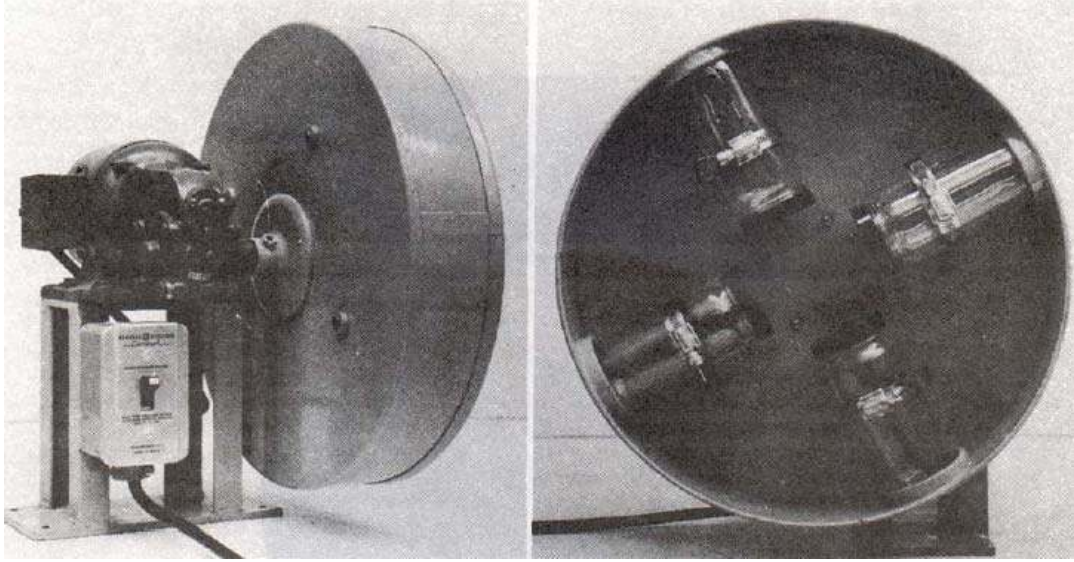
3.2.1.1. Statik Daldırma Deneyi

Bu deney AASHTO'da T182 olarak halen standart olan bir deney olmasına rağmen ASTM standardında uzun süre yer almamıştır. Bu deneyde asfalt agrega karışımı 60 C⁰ de iki saat kür edildikten sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Daha sonra karışım cam bir kavanoza konulur ve 600 ml damıtılmış su doldurulur. Kavanozun kapağı kapatılarak 25 C⁰ lik su banyosunda 16-18 saat kalmak üzere bırakılır. Daha sonra soyulma görsel olarak incelenir. Agregaların görünen yüzeyinin %95'inden az yada çok kaplanmış olup olmadığına bakılır [47].

3.2.1.2. Film Soyulma Deneyi

Bu deney AASHTO T182 deneyinin modifiye edilmiş bir halidir. 60 gr agrega asfalt ile kaplanıp 60 C⁰ lik etüvde 15-18 saat bekletilir. Daha sonra oda sıcaklığında soğutulan numuneler, içinde 175 ml damıtılmış su bulunan kavanoza yerleştirilir. Üzeri kapatılan kavanoz

dakikada 35 devir ile dönen deney aparatındaki yerine 15dak. kalmak üzere yerleştirilir. Sonuçlar soyulan toplam agreg a yüzeyinin yüzdesi olarak belirlenir. Şekil 3.3’de film soyulma deney cihazı görülmektedir.



Şekil 3.3. Film soyulma deney cihazı

3.2.1.3. Kaynama Deneyi

Bu deney yöntemi Kennedy tarafından geliştirilmiş ve ASTM tarafından D3625 olarak standardize edilmiştir. Burada asfalt agreg a karışımı kaynayan bir su içerisinde 10 dakika kalmak üzere bırakılır. Daha sonra karışım sudan çıkartılır ve soğumaya bırakılır. Suyu drene olan karışım bir kağıt üzerinde kurumaya bırakılır ve sonra görsel olarak soyulma derecesi değerlendirilir [48].

3.2.1.4. Net Adsorbsiyon Deneyi

Bu deney yöntemi SHRP’ın 1990’lardan önce geliştirdiği A-341 olarak raporunu hazırladığı bir deneydir. Bu deney, bir asfalt-agrega çiftinin uygunluğunun ve sistemin suya karşı olan hassasiyetinin belirlenmesi için kullanılır. Deney iki aşamadan oluşur. İlk olarak agreg a yüzeyindeki asfalt toluen çözeltisi ile absorbe edilir ve çözeltideki asfalt miktarı ve agreg a yüzeyinde kalan asfalt miktarı tespit edilir. İkinci olarak sisteme su ilavesi yapılır böylece agreg a yüzeyindeki asfalt kendisini salar. Daha sonra yine çözeltideki asfalt miktarı ve agreg a yüzeyinde kalan asfalt miktarı tespit edilir. Asfaltın kendisini salmasından sonra agreg a

yüzeyinde kalan asfalt miktarı net adsorbsiyon olarak tanımlanır. Bu deney direk olarak asfalt-agrega çiftinin uygunluğunu gösterir ve karşılaştırma sunar [49].

3.2.1.5. Serbest Yüzey Enerjisi Deneyi

Serbest yüzey enerjisi kavramının arkasındaki prensip asfaltın kohezyonu ve asfalt-agrega arasındaki adezyonun asfalt ve agreganın serbest yüzey enerjisi ile ilgili olduğudur. Agregaların yüzey enerjisi Universal Sorption Device (USD) ile, bağlayıcının yüzey enerjisi ise Wilhelmy Plate ile ölçülmektedir. Agregaların yüzey enerjisi çözücülerin yüzeye tutulma karakteristiği ile bağlayıcının yüzey enerjisi ise bağlayıcı ile kaplanmış ince plaka ve yüzey enerjisi bilinen bir sıvı arasındaki kontak açısı ile belirlenmektedir. Agregaların yüzey enerjisi ölçümünde 4,75 mm ve 2,36 mm elek arasında kalan 40 gram agrega damıtılmış su, metanol, heksan ve tekrar metanol ile yıkanmaktadır. 4 saat etüvde kurutulan ve sonra oda sıcaklığında soğutulan agregalar alimünyum kap içine bırakılarak USD deki yerine yerleştirilir. Daha sonra agregalar üzerine 10 aşamada ve her aşamada artmak suretiyle basınçla solvent verilir ve her aşamada agrega üzerindeki solvent ağırlığı tespit edilir. Bu işlem, solvent olarak n-heksan, Methyl Propyl Ketone (MPK) ve su kullanılarak üç aşamada yapılır her aşamada numuneler yıkanmaktadır. 10 aşamada artan basınç ve agrega yüzeyindeki solvent ağırlığı agreganın spesifik yüzey alanının hesaplanmasında kullanılır [50].

3.2.2. Sıkıştırılmış Numunelere Uygulanan Deneyler

Sıkıştırılmış karışımlar üzerindeki deneyler laboratuarda sıkıştırılmış yada araziden alınmış numuneler üzerinde uygulanır. Bu deneylerin en büyük avantajı karışımın fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin, su ve trafik etkisinin, boşluk basıncının etkilerinin dikkate alınması ve sonuçların nicel olarak değerlendirilmesidir. Burada deney ekipmanları daha ayrıntılı ve deneyler uzun sürelidir.

3.2.2.1. Daldırma-Batırma Deneyi

Bu deney prosedürü 1949 yılında ASTM tarafından yayınlanmıştır. Bu kadar eski bir deney olmasından dolayı nem hassasiyetinin değerlendirilmesinde ilk kullanılan deneylerden biri olmuştur. Burada iki grup sıkıştırılmış numune kullanılmaktadır. Birinci gruptaki numuneler 120 °F'daki su banyosunda 4 gün bekletilirken ikinci grup numuneler kuru olarak muhafaza edilmektedir. Koşullandırılmış numuneler (birinci grup) alternatif olarak 24 saat

140 °F'da da kalabilir. Numunelerin serbest basınç dayanımı 77 °F'da ve numune yüksekliğinin her bir inç'i için 0,05 in/dak. yükleme hızında tespit edilir. Sonuçta koşullandırılmış numunelerin dayanımının kuru numunelerin dayanımına oranı belirlenir. Bu oran bir çok kurum tarafından minimum %70 olarak kabul edilmiştir.

3.2.2.2. Lottman İndirek Gerilme Deneyi

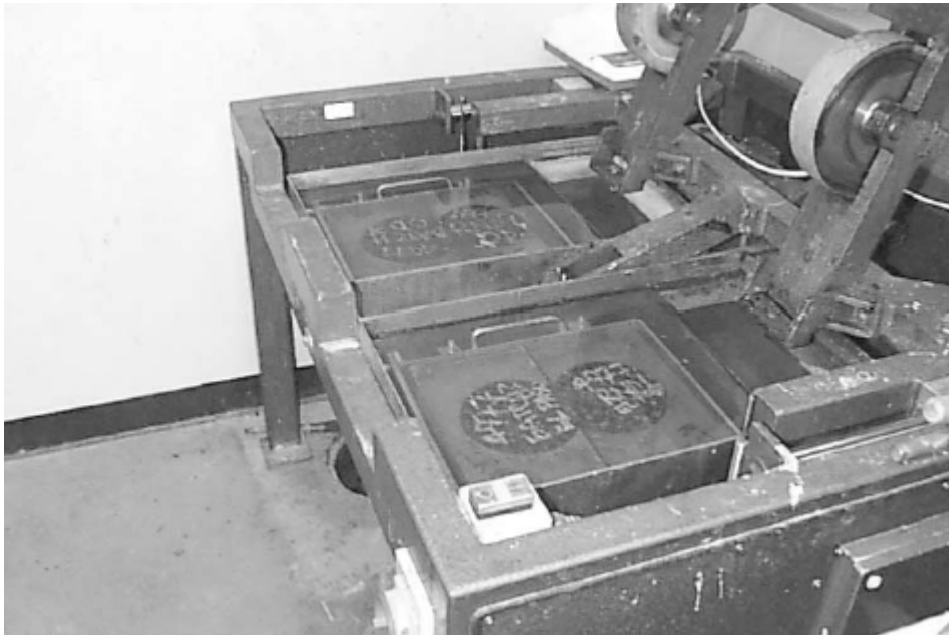
Bu deney 1970'lerin sonunda Lottman tarafından geliştirilmiştir. Deney prosedürü kuru ve koşullandırılmış olmak üzere iki grup numune gerektirmektedir. Numuneler 4 inç çapında ve 2,5 inç yüksekliğindedir. Koşullandırma işleminde numuneler 26 inç civa basıncında 30 dakika ve daha sonra 30 dakika atmosferik basınçta doymun hale getirilir. Kısmen doymun hale getirilen numuneler 0 °F'da 15 saat dondurulur ve arkasından 24 saat 140 °F su banyosuna bırakılır. Bu durum hızlandırılmış donma-çözülme olarak kabul edilir. Lottman burada alternatif olarak periyotlu sistemi önermektedir. Periyotlu sistemde numuneler 4 saat 0 °F da daha sonra 4 saat 120 °F da bekletilmektedir Böylece bir periyot 8 saat sürmektedir. Bu sistemde numuneler 18 periyoda maruz bırakılmalıdır. Sonuçta koşullandırılmış ve kuru numunelerin indirek çekme gerilmesi değerleri oranlanır. Deneylerdeki yükleme hızı 55 °F için 0,065 in/dak. 73 °F için 0,150 in/dak.dır.

3.2.2.3. Modifiye Lottman Deneyi

AASHTO tarafından T283 olarak standardize edilen bu deney, BSK'ların nem hassasiyetinin belirlenmesinde en çok kullanılan deneydir. Orijinal Lottman deneyinden farkı burada numuneler %70-%80 doymun hale getirilmektedir. Diğer bir değişiklik ise deney ısı ve yükleme hızları ile ilgilidir. Yükleme hızı 77 °F için 2 in/dak.dır. Böylece, deney Marshall deney cihazı ile yapılabilir. İlk önce sıkıştırılmamış numuneler 60 °C'de 16 saat bekletilmekte ve sonra 135 °C'de 2 saat yaşlanma işlemine maruz bırakılmaktadır. Hava boşlukları %6,5 ve %7,5 arasında altı numune hazırlanır. 3 numune -18 °C'de 16 saat daha sonra 60 °C'lik su banyosunda 24 saat bekletilerek koşullandırılır. Daha sonra koşullandırılmış ve kuru numuneler sabit bir sıcaklığa getirilir ve indirek çekme gerilmeleri tespit edilerek oranlanır. Bu oranın minimum %80 olması gerekmektedir [51].

3.2.2.4. Hamburg Tekerlek İzi Deneyi

Bu deneyde tekerlek izi oluşumu ve nem hasarı birlikte değerlendirilir. Burada sıcak su içinde bulunan beton asfalt kaplama numunesinin yüzeyinde ileri geri hareket eden bir çelik tekerlek mevcuttur. Deneyde kübik yada kiriş numuneler kullanılabildiği gibi yoğurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırılmış silindirik numuneler de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tekerlekler 20 bin defa yada 20 mm deformasyona ulaşınca kadar geçmektedir. Deney sonucunda konsolidasyonu, sünme eğimini, soyulma eğimini ve soyulma büküm noktasını gösteren bir grafik ortaya çıkmaktadır. Teker geçişleri karışımı yoğunlaştırmakta ve konsolidasyona neden olmaktadır. İlk 1000 teker geçişinde meydana gelen deformasyon konsolidasyon olarak kabul edilmektedir. Karışımın viskoz davranışından dolayı teker geçişlerinin 1 mm derinlikte deformasyon oluşturacağı tekrar sayısı ile sünme eğimi elde edilmektedir. Soyulma eğimi, soyulmanın başlamasından sonra ve deney sonuna kadar deformasyon eğrisinin lineer bölümünde deformasyon hızının tersinin alınması ile elde edilmektedir. Soyulma büküm noktası sünme eğimi ile soyulma eğiminin kesiştiği yerdeki geçiş sayısıdır. Bu nokta bitümlü sıcak karışımların nem hassasiyeti dayanımı gösterir ve soyulmanın başladığı yer olarak kabul edilir. İyi dizayn edilmiş karışımlarda soyulma büküm noktası 10 bin geçişin üstündedir. Bu deneyin sonuçları, agrega özelliklerine, agrega üzerinde toz bulunmasına, kil muhtevasına, ince malzeme ve asfalt oranının yüksek olmasına karşı hassastır Şekil 3.4’de deney cihazı görülmektedir [52].



Şekil 3.4. Hamburg tekerlek izi deney aleti.

3.2.2.5. Çevresel Koşullandırma Sistemi (ECS) Deneyi

SHRP'nın asfalt araştırma programının bir parçası olarak nem hasarı ile ilgili mekanizmalar kapsamlı olarak araştırılmış ve yeni bir sistem geliştirilmiştir. Bu prosedür bitümlü sıcak karışımların sıcaklık, nem doygunluğu ve dinamik yükleme gibi üst yapıda oluşabilecek şartlar altındaki nem hassasiyetinin belirlenmesi için tasarlanmıştır. Bu deneyde 102 mm çapında ve yüksekliğindeki, %7,5 hava boşluğunda ve çevresi bir membran ile kaplanmış numuneler sıcaklık, tekrarlı yükleme ve nem koşullandırma periyotlarına maruz bırakılmaktadır. İlk olarak AASHTO TP4-93 e uygun olarak sıkıştırılmamış karışıma kısa süreli yaşlanma işlemi uygulanmaktadır. Daha sonra karışım AASHTO TP4-93 e uygun olarak yoğunmalı pres ile sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırılmış numuneler oda sıcaklığında bir gün soğutulduktan sonra çevresi membranla kaplanarak 15 saat kurumaya bırakılır. ECS yükleme çerçevesine yerleştirilen numunelerin, hava permabiliteleri ve kuru rezilans modülleri tespit edilir. Hava permabilitesi, numune içinden 68 kPa seviyesindeki vakum ile geçirilen hava sayesinde tespit edilmektedir. Rezilans modülünün tespitinde yükleme periyodu 0,1 saniye rest periyodu ise 0,9 sn dir. 68 kPa seviyesindeki vakum ile damıtılmış su, numune içerisinden geçirilerek su permabilitesi tespit edilmektedir. Doygun hale gelmiş numunelerin sıcaklığı tekrarlı yükleme sırasında 6 saat 60 °C'de ye yükseltilir daha sonra 2 saat 25 °C'ye soğutulur. Bu 8 saat sonunda koşullandırılmış rijitlik modülü tespit edilir. Koşullandırılmış numunelerin rijitlik modülünün kuru numunelerin rijitlik modülüne oranı 0,7 den az ise karışımın neme karşı hassas olduğu kabul edilir [53].

Bu deney çok uzun sürmekte ve karmaşık işlemler içermektedir. Bunun yanı sıra trafik yüklerinin etkisini ve boşluk suyu basıncını dikkate alan kapsamlı bir deneydir.

West, BSK'ların tekerlek izi oluşumunu, yorulma davranışını ve nem hassasiyetini değerlendiren Asphalt Pavement Analizer (APA) ile, nem hassasiyetini değerlendirmede etkili olan, numune şekli, yükleme durumları ve koşullandırma yöntemleri gibi parametreleri incelemiştir. Deneylerde soyulmaya karşı dirençli olan kireç taşı ve soyulmaya karşı dayanımı düşük olan granit, agrega olarak kullanılmıştır. Sonuçta yüklemenin çelik tekerlek ile yapılmasının, numunelerin 6 dakika 28 mm hg basınç ile doymun hale getirilmesinin , nem hassasiyetini belirlemede etkili olduğu, numune şeklinin kırış yada silindirik olmasının ise fazla bir etkisinin olmadığını belirtmiştir [54].

Kiggundu, bitümlü sıcak karışımın nem hassasiyetinin değerlendirilmesinde kullanılan deney yöntemlerinin etkinliğini araştırmış en etkili deney yöntemlerinin sırası ile modifiye Lottman deneyi, Tunccliff Root deneyi, 10 dakika kaynama ve daldırma-batırma deneyi olduğunu belirtmiştir [55].

Kim, Nottingham deney aleti ile bitümlü sıcak karışımların nem hassasiyetini incelemiştir. Burada kuru numuneler membran ile kaplanarak suyun çevresel basınç etkisini de dikkate almak amacıyla su içinde deney edilmiş, koşullandırılmış numuneler ise farklı derecelerde doymuş hale getirilmiştir. Numunelere 100 kPa değerinde tekrarlı yükler uygulanmış, kuru ve koşullandırılmış numunelerin stabil halden kararsız hale geçtikleri yük tekrar sayılarının oranı tespit etmiş ve bu şekilde BSK'ların nem hassasiyetinin belirlenmesinin daha etkili olduğunu tespit etmiştir [56].

Mallick, BSK'ların nem hassasiyetinin belirlenmesinde numunelerin koşullandırma işlemini, çoklu donma çözünme periyotları, tekrarlı trafik yüklemesi ve numuneyi doymuş hale getirip suyunu emme periyotları ile yapmıştır. Daha sonra numunelerin indirek çekme oranları ve tekerlek izi derinliklerini tespit etmiştir. Tekrarlı trafik yüklemesi ile yapılan koşullandırmada, 60 °C su içindeki 150 mm çapındaki numunelere 690 kPa tekerlek basıncı 80000 tekrar olacak şekilde uygulanmıştır. Daha sonra bu 150 mm'lik numunelerden çıkartılan 100 mm'lik numunelere indirek çekme deneyi uygulanmıştır. Numunelere su emdirmesi ve vakum yoluyla yapılan koşullandırmada 210 kPa değerindeki basınç ile 60 °C'deki numunelere 5000 periyot uygulanmaktadır. Çalışmada bu şekilde koşullandırılmış numunelerin indirek çekme oranlarının nem hassasiyetini belirlemede çok iyi sonuçlar verdiği donma çözünme ile numuneler koşullandırılacak ise T-283 deki ne uygun yöntemle en az 6 periyot uygulanması gerektiği belirtilmiştir [57].

4. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Bitümlü sıcak karışımlar, agregası, bitüm ve hava olmak üzere üç fazlı bir sistemden oluşmaktadır. Agregası katı fazı, bitüm sıvı fazı ve boşluklar gaz fazını oluştururlar. Sıvı fazı oluşturan bitüm viskoelastik ve termoplastik bir malzemedir. Viskoelastik malzemelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi yükleme zamanı ile değişmektedir. Viskoelastik malzemelerde yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik malzemelerde ise gerilme-şekil değiştirme davranışı sıcaklıkla ilişkili olarak değişmektedir. Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Bitüm'ün bu özellikleri, bitümlü sıcak karışımlara yansiyarak karışımın mekanik özellikleri üzerinde önemli etki yapmaktadır. BSK'ların en önemli mekanik özellikleri, rijitlik, çekme dayanımı, kalıcı deformasyonlar - tekerlek izi oluşumu ve yorulma davranışlarıdır.

4.1. Rijitlik

Elastik malzemelerin elastik modülü yada Young modülü, gerilmenin birim şekil değiştirmeye oranı olarak tarif edilir. Burada şekil değiştirme yükleme zamanının bir fonksiyonu değildir. Viskoelastik malzemelerin deneyinde, kısa yükleme süresi yüksek, uzun yükleme süresi de düşük mukavemet gösterdiğinden bu malzemelerde yükleme zamanı dikkate alınmalıdır. Viskoelastik malzemeler yükleme zamanı arttıkça kolay bir şekilde sünebilmektedir. Asfalt karışımlar viskoelastik malzeme olduklarından bunların gerilme-şekil değiştirme karakteristikleri zamana bağlı olarak tarif edilmektedir. Bu şekilde zamana bağlı olarak tarif edilen modüle, rijitlik modülü denilmektedir. Rijitlik modülü asfalt karışımların karakteristiklerini belirlemede en önemli özelliklerden biri olarak tarif edilir.

BSK'ların rijitliği, bitümün rijitliği ve agregası hacimsel konsantrasyonuna bağlıdır. Van der Poel bitümün rijitliğini matematiksel olarak formül 4.1'deki gibi tanımlamıştır [58].

$$S_b = 1,157 \cdot 10^{-7} \cdot t_w^{-0,368} \cdot \exp(-PI) \cdot (T_{HB} - T)^5 \quad (4.1)$$

Burada, S_b bitümün rijitliği (MPa), t_w yük etki süresi (sn), PI penetrasyon indeksi, T_{HB} halka bilye metodu ile hesaplanan yumuşama noktası ($^{\circ}\text{C}$), T bitümün sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)'dır.

Heukelam ve Klomp, Van der poel'in çalışmasına dayanarak boşluk oranı %3'den fazla olan BSK'nın rijitliği için formül 4.2 - 4.5'deki eşitlikleri geliştirmişlerdir.

$$E = S_b \cdot [1 + (2,5/n) \cdot C'_v / (1 - C_v)]^n \quad (4.2)$$

$$C'_v = C_v / [0,97 + 0,01(100 - (VA + VB))] \quad (4.3)$$

$$C_v = VA / (VA + VB) \quad (4.4)$$

$$n = 0,83 \cdot \log(40000 MPa / S_b) \quad (4.5)$$

Burada, E karışımın rijitliği, C'_v ve C_v hacimsel olarak agrega konsantrasyonu, VA hacimsel agrega yüzdesi, VB hacimsel bitüm yüzdesi, n ise bitümün rijitliğine bağlı olarak belirlenen bir sayıdır.

Kuloğlu, yaptığı çalışmasında bitüm ve bitümlü sıcak karışımların rijitliğine etki eden parametreleri, Heukelam ve Klomp'un geliştirdiği matematiksel modeli kullanarak incelemiştir. Çalışmada yük etki süresinin artışının bitümün rijitliğini nasıl azalttığı, penetrasyon indeksi ve yumuşama noktasındaki artışın da rijitliği nasıl artırdığı grafiklerle gösterilmiştir. Çalışmanın BSK'ların incelendiği bölümünde rijitlik ile boşluk oranı arasında lineer bir ilişkinin olduğu ayrıca en yüksek rijitliğin %3 hava boşluğu, %96 agrega ve %4 bitüm konsantrasyonunda olduğu tespit edilmiştir [59].

BSK'ların rijitlik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direk basınç, indirek çekme, burulma deneyleri uygulanmaktadır. Bütün deney metotları, viskoelastik bir malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığı kabulüne dayanmaktadır. Deney yöntemleri periyodik olarak uygulanan yükü ve bu esnada oluşan ani deformasyonları içermektedir. Rijitlik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Rijitlik modülü esasında viskoelastik malzemenin ani elastik modülüdür. Diametral deneyler, direk basınç deneylerine göre karışımdaki bağlayıcının etkisine karşı daha hassas olduğundan daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Direk basınç deneyindeki asfalt karışımlarında agregalar arasındaki kenetlenme ve bağlayıcının rijitliği söz konusu olurken, çekme deneyinde agrega kenetlenmesi daha az öneme sahiptir [60].

Rijitlik, yükleme süresi azaldıkça (veya yükleme hızı arttıkça), ısı azaldıkça, karışım yoğunluğu arttıkça, asfaltın penetrasyonu azaldıkça artar. Rijitlik modülü deneyi hasarsız bir deney yöntemidir. Diametral yükleme altında numunede meydana gelen teorik gerilme dağılımları Şekil 4.1'de verilmiştir. Schmidt, düzlem gerilme ve lineer elastik malzeme kabulüne dayanarak aşağıdaki formülleri geliştirmiştir [61].

Çap doğrultusundaki (yatay) gerilmeler formül 4.6-4.8’de verilmiştir.

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi d} \left[\frac{d^2 - 4x^2}{d^2 + 4x^2} \right]^2 \quad (4.6)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi d} \left[\frac{4d^2}{(d^2 + 4x^2)} - 1 \right] \quad (4.7)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (4.8)$$

Yük doğrultusundaki (düşey) gerilmeler formül 4.9-4.11’de verilmiştir.

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi d} = \text{sabit} \quad (4.9)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi} \left[\frac{2}{d - 2y} + \frac{2}{d + 2y} - \frac{1}{d} \right] \quad (4.10)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (4.11)$$

Burada σ_x : çekme gerilmesi, σ_y : basınç gerilmesi, P:uygulanan yük, t: numune kalınlığı, d: numune çapı, x,y: numune merkezinden olan koordinat değerleridir.

Formül 4.6 ve 4.7 formül 4.12’de yerine yazıldığı takdirde formül 4.13 elde edilmektedir.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu \sigma_y] \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_x = \frac{2}{E\pi d} \left[\frac{d^4(1+5\nu) - 8x^2d^2(1-3\nu) + 16x^4(1+\nu)}{(d^2 + 4x^2)^2} \right] \quad (4.13)$$

Formül 4.13’ün $x = -d/2$ ve $x=d/2$ aralığındaki integrali formül 4.14’deki yatay doğrultudaki deformasyonu vermektedir.

$$\Delta H = \frac{P}{tE} \left[\frac{4}{\pi} + \nu - 1 \right] \quad (4.14)$$

Uygulanan bir dinamik yük ve bunun neden olduğu yatay deformasyonun bilinmesi ile rijitlik modülü (S_m) formül 4.15 ile hesaplanabilmektedir [62].

$$S_m = \frac{P(\nu + 0,27)}{\Delta H.t} \quad (4.15)$$

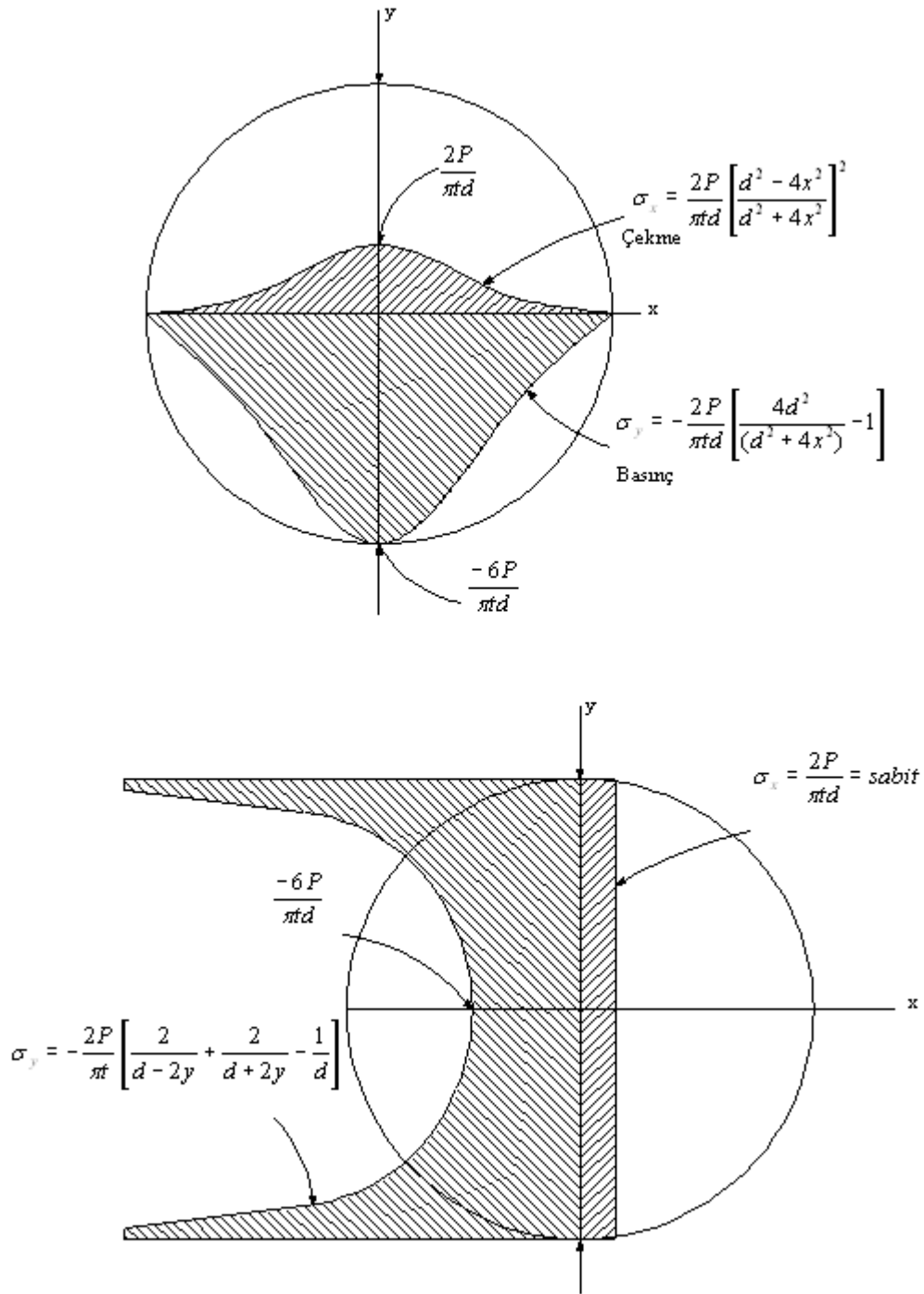
S_m : Esneklik modülü (Mpa).

P : Maximum yük (N).

ΔH : İki yada daha fazla yük tekrarından elde edilen ortalama yatay deformasyon (mm).

t : Numune kalınlığı (mm).

ν : Poisson oranı.



Şekil 4.1. Yatay ve düşey diametral düzlemlerde teorik gerilme dağılışı.

4.2. İndirek Çekme Mukavemeti

BSK'ların indirek çekme gerilmesi çatlak potansiyeli için iyi bir göstergedir. Bozulma anındaki yüksek çekme birim şekil değiştirmesi, BSK'nın bozulmadan önce yüksek değerlerdeki şekil değiştirmeleri, çatlamalara dayanacak şekilde tolere edeceğine işaret eder. İndirek çekme dayanımı deneyinde silindirik numuneler çap doğrultusunda etki eden basınç yüklemesine tabi tutulur. Marshall deney ekipmanı ile bu deney yapılabilir. İndirek çekme mukavemeti formül 4.16 ile hesaplanmaktadır [61].

$$ITS = \frac{2P_{\max}}{\pi t.d} \quad (4.16)$$

ITS : İndirek çekme mukavemeti (kPa).

$P_{\max}$: Maximum yük (kN).

t : Numune yüksekliği (m).

d : Numune çapı (m).

4.3. Kalıcı Deformasyonlar ve Tekerlek İzi Oluşumu

Stabilite BSK'ların trafik yükleri altında oluşacak kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği dirençtir. BSK'nın stabilitesi ne kadar düşük olursa trafik yükleri altında oluşabilecek deformasyonda o kadar fazla olacaktır. Ancak çok düşük stabilite ne kadar istenmez ise çok yüksek stabilite de o kadar zararlıdır. Çünkü çok yüksek stabiliteli bitümlü karışımlar gerilmelere maruz kaldığında esnek davranış gösteremeyip kaplamada çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. BSK'larda meydana gelen kalıcı deformasyonlar trafiğe bağlı nedenler ve çevresel nedenler olarak ikiye ayrılabilir. Trafiğe bağlı nedenler uzun süreli yüklemeler, aşırı yüklemeler ve yük tekrarları, çevresel nedenler ise taban zemini genişmesi, üstyapıdaki sıkışabilir malzeme ve alt tabakalarda donmaya hassas malzeme olarak belirtilebilir [63]. Bir başka sınıflandırma alt tabakalara bağlı nedenler ve bitümlü tabakalara bağlı nedenler olarak yapılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre alt tabakaların kalınlıklarının yetersiz olması, alt tabakaların veya tabanın konsolidasyona maruz kalması, alt tabakalara bağlı nedenlerden; karışımın stabilitesinin yetersiz oluşu (karşımda asfalt, filler yüzdesinin yüksek oluşu, bölge sıcaklığına göre yumuşak asfalt, yuvarlak agrega kullanılması), aşınma tabakasının yetersiz sıkışması ise bitümlü tabakalara bağlı nedenlerdendir. Bunların yanı sıra aşırı sıcaklar ve yer altı

su seviyesinin yüksek olması çevresel etkiler, dingil yükü, lastik hava basıncı, trafik hacmi ve kompozisyonu, yükleme zamanı ve yükler arasındaki zaman aralığı ise trafik etkileridir [64].

Kalıcı deformasyonların tespit edilmesi için karışımın düşük rijitliği yani yüksek ısılarda veya uzun süreli gerilmeleri dikkate alınmalıdır. Bitümün rijitliği 5×10^6 Pa'dan daha az ise karışımın davranışı elastik davranıştan daha karışık olacaktır. Karışımın yüksek rijitlik modülü, bitüm rijitliğinin ve agrega içindeki boşluk miktarının bir fonksiyonu iken düşük rijitlik modülü, bitüm rijitliğinin, agrega içindeki boşluk miktarının, agreganın yüzey yapısı ve gradasyonunun, sıkışmanın ve yanal deplasmanın bir fonksiyonudur. Kalıcı deformasyonu oluşturan düşük rijitlik, yüksek ısı ve uzun süreli yükleme şartlarına ilaveten daha karmaşık şartlara bağlı olarak değişmektedir [4]. Bitümlü karışımların deformasyon davranışını belirlemek için bir çok deney metodu üzerindeki çalışmalar devam etmektedir. Bunlar içinde günümüzde kullanılanlar ise, statik sünme, dinamik sünme, dinamik modülü, Marshall ve tekerlek izi deneyleridir.

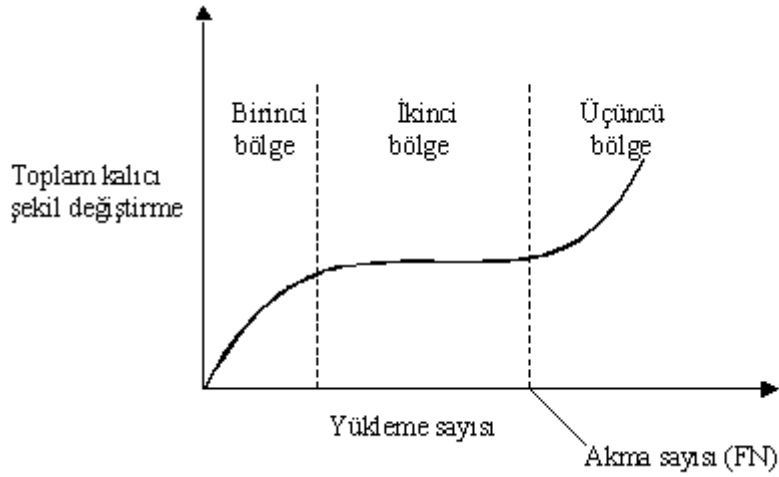
4.3.1. Statik Sünme Deneyi

Statik sünme deneyi numune üzerine statik bir yük uygulayıp yük kaldırıldıktan sonra oluşan kalıcı deformasyonun ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Ölçülen bu kalıcı deformasyon miktarı tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilmektedir. Yüksek değerlerdeki kalıcı deformasyon yüksek derecede tekerlek izi potansiyeline işaret etmektedir. Sünme deneyleri basit ekipmanlar gerektirdiği ve kolay olduğu için yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Sınırlandırılmış, sınırlandırılmamış ve diametral olmak üzere üç şekilde yapılmaktadır. En yaygın olanı tek eksenli sünme deneyi olarak da bilinen sınırlandırılmamış sünme deneyidir. Burada 100 kPa değerindeki eksenel gerilme, numuneye 1 saat 40 °C'de uygulanmaktadır. Üç eksenli yada sınırlandırılmış sünme deneyinde ise numuneye üç eksenli olarak 138 kPa değerinde basınç uygulanmaktadır. Diametral sünme deneyinde ise yük numuneye çap doğrultusunda uygulanmaktadır. Deney süresince numunede oluşan kalıcı şekil değiştirmeler ölçülmekte ve sünme rijitliği tespit edilmektedir [65].

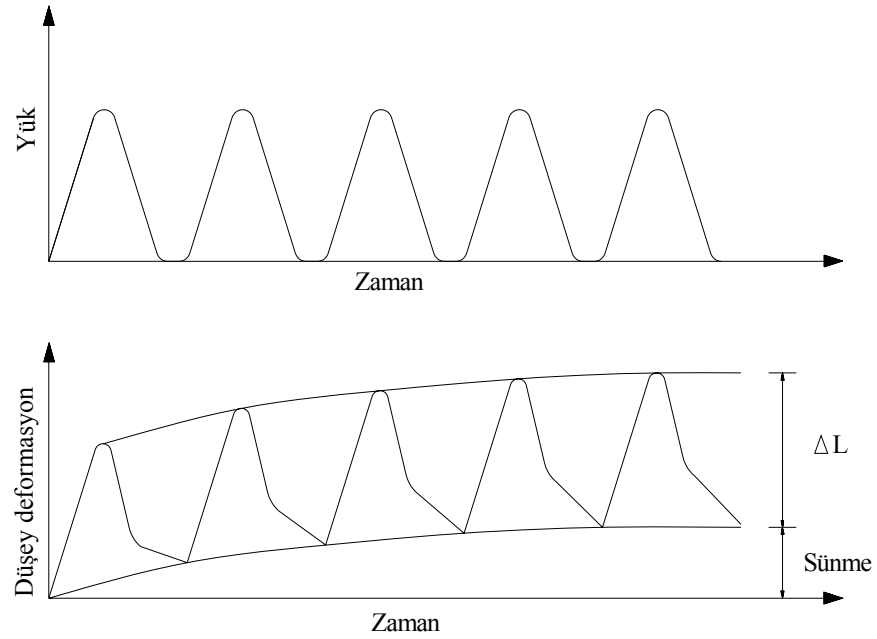
4.3.2. Dinamik Sünme Deneyi

Bu deneyde sabit bir değerdeki yük, silindirik numunenin yatay yüzüne belirli periyot ile tekrarlı olarak uygulanmaktadır. Dinamik sünme deneyinde yük tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak ölçülen toplam kalıcı deformasyon, tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilebilmektedir. Deney, farklı sıcaklık ve yüklemelerde yapılabilmektedir. Bu deney ile ayrıca belli bir poisson oranı kabul ederek ve yatay deformasyonun ölçülmesi ile rezilans

modülü de tespit edilebilmektedir. Dinamik sünme deneyinde genellikle yük tekrar sayısı ve toplam kalıcı şekil değiştirme eğrisi (Şekil 4.2) sonuç olarak verilmektedir. Burada akma sayısı üçüncü bölgenin başladığı yük tekrar sayısı olarak tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilmektedir. Dinamik sünme deneyi de sınırlandırılmış, sınırlandırılmamış ve diametral olarak üç şekilde yapılmaktadır. Şekil 4.3’de yük zaman ve yük deformasyon arasındaki ilişki görülmektedir [66].



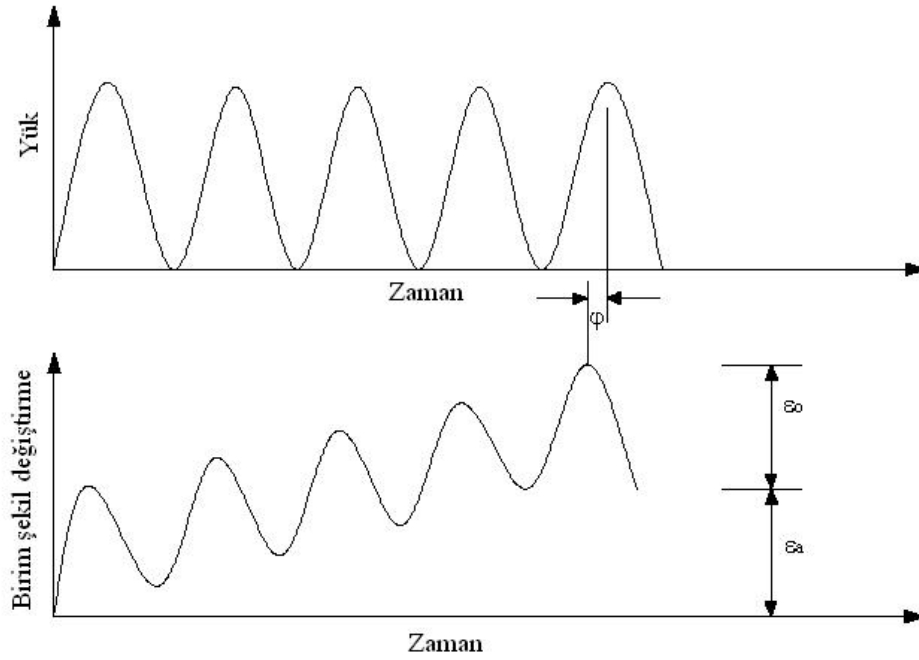
Şekil 4.2. Yük tekrar sayısı-Şekil değiştirme ilişkisi.



Şekil 4.3. Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi.

4.3.3. Dinamik Modülü Deneyi

Dinamik modülü deneyinde numunelere sabit şiddette tekrarlı yük uygulanmaktadır. Numuneler değişik sıcaklık ve yükleme hızlarında (çoğunlukla 1,4 – 16 Hz) test edilebilirler. Yükleme sinüs dalgası şeklinde olmaktadır. Şekil 4.4’de şematik olarak dinamik modülü deneyindeki yük zaman ve şekil değiştirme zaman ilişkisi görülmektedir [67].



Şekil 4.4. Yükleme-zaman ve şekil değiştirme-zaman ilişkisi.

Dinamik modülü deneyi yükleme frekanslarına göre dinamik sünme deneyinden ayrılmaktadır. Dinamik sünme deneyinde aynı yük binlerce defa aynı frekansta uygulanırken dinamik modül deneyinde 1,4 ile 16 Hz arasında frekansa sahip olan yük, 30 ile 45 saniye uygulanmaktadır. Bu yönüyle dinamik modülü deneyi çok hassas deformasyon ölçümleri gerektirdiğinden dinamik sünme deneyinden oldukça zordur. Dinamik modülü deneyi sürekli sinüsoidal yükleme altında numunenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ölçmektedir. Lineer viskoelastik malzemeler için bu ilişki formül 4.17’de hesaplanan kompleks modülü ile tanımlanmaktadır.

$$E^* = |E^*| \cos \varphi + i |E^*| \sin \varphi \quad (4.17)$$

Burada E^* : kompleks modülü, $|E^*|$: dinamik modülü, φ : birim şekil değiştirmenin gecikip gerilmenin arkasında kalmasından dolayı oluşan faz açısı, (elastik malzemelerde faz açısı 0 olup kompleks modülü dinamik modüle eşit olmaktadır), i ise sanal bir sayıdır.

4.3.4. Marshall Deneyi

Marshall stabilitesi ve akma deneyi bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyonlara karşı potansiyelini değerlendirmede kullanılan deneylerdendir.

4.3.5. Tekerlek İzi Deneyi

Laboratuvar tekerlek izi cihazı BSK'nın üzerinde tekrarlı olarak geçen tekerin meydana getirdiği oluklanmayı ölçmektedir. Daha sonra bu oluklanma arazide meydana gelebilecek tekerlek izi ile ilişkilendirilmektedir. Kabul edilebilir sonuçlar alınabilmesi için arazi şartlarını temsil edecek yükleme, teker geçiş sayısı ve sıcaklık gibi parametrelerin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. Kaplamanın tekerlek izi direncini belirlemede kullanılan Asphalt Paving Analyzer, French Pavement Rutting, ve Hamburg Wheel-Tracking deney cihazları, kaplamanın yıllar içinde maruz kalacağı trafik şartlarını laboratuvar ortamında simule eden ve bu şartların etkisini saatler mertebesine indiren hızlandırılmış deneylerdir. Hamburg Wheel tracking cihazında 32 x 26 cm boyutlarında ve 4,8,12 cm kalınlıklarındaki numuneler, 25-70 °C'deki su içinde, 20,35 cm çapında ve 4,7 cm genişliğindeki çelik tekerleğin 685 N'luk yük ve 1,1 km/saat hızı ile tekrarlı geçişlerine maruz bırakılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan Hamburg Wheel Tracking deneyinde 10000 tekerlek geçişi için 4 mm, 20000 tekerlek geçişi için ise 10 mm kabul edilebilir tekerlek izi önerilmektedir [68]. French Pavement Rutting cihazında 50 x 18 cm boyutlarında ve 5,10 cm kalınlığındaki numuneler, 60 °C'de 41,5 cm çapında 11 cm genişliğindeki lastik tekerleğin 0,60-0,71 MPa basınç ve 7 km/saat hızı ile tekrarlı geçişlere maruz bırakılmaktadır. Asphalt Paving Analyzer cihazında 2,5-3,8 cm çapındaki numuneler, basınçlı silindirin 2,2 km/saat hızı ile tekrarlı geçişlere maruz bırakılmaktadır.

4.4. Yorulma Davranışı

Yollardaki bitümlü malzemeler her taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalırlar. Bu, malzemenin rijitliğinde azalmayla sonuçlanan çok küçük hasarlara neden olur. Bu hasarların birikmesi ile uzun sürede malzeme bozulmaktadır. Yorulma dayanımı, asfalt betonunun tekrarlı trafik yüklerine, dolayısıyla tekrarlı eğilme yüklemesine kırılmadan karşı koyabilme yeteneğidir. Yorulma, genel olarak asfalt betonu kullanılan üstyapılarda tekrarlı yükleme ile ilerleyen bir çatlak formudur. Yorulma çatlağı trafik yüklerinin belirli bir tekerrür sayısından sonra yavaş yavaş meydana gelmektedir. İnce kaplama veya zayıf alt tabakalar

olması halinde ağır trafik yükleri altında aşırı defleksiyonlar oluşur. Bu defleksiyonlar kaplama altındaki yanal çekme gerilmelerini artırarak yorulma çatlaklarını doğurmaktadır.

Üst yapı performansında en önemli özellik olarak BSK'ların yorulma davranışı kabul edilmektedir. BSK'ların sıkışması, asfalt içeriği ve hava boşluğu gibi özelliklerin etkinlik dereceleri diğer deneylere göre, yorulma davranışının incelenmesi ile daha açık bir şekilde belirlenebilmektedir. Kaliforniya Ulaştırma Bölümünde yapılan bir çalışmada, %5 asfalt % 5 hava boşluğunda imal edilmiş bitümlü sıcak karışımlarda hava boşluğunun %1 artması yorulma ömrünü %30, asfalt içeriğinin ise hedeflenen değerden %1 az olmasının yorulma ömrünü %12 azalttığı belirtilmiştir [69].

Yorulma karakteristikleri genel olarak başlangıç gerilmesi yada birim şekil değiştirmesi ile bozulmaya neden olan yükleme adedi arasındaki ilişki olarak açıklanabilir. BSK'ların yorulma karakteristikleri genellikle gerilme yada şekil değiştirme kontrollü olmak üzere, tekrarlı eğilme kırışi, direk çekme ve diametral deneylerle belirlenmektedir. BSK'ların yorulma davranışı logaritmik eksenlerde gerilme yada şekil değiştirmenin bozulmaya neden olan yük tekrarı sayısı arasındaki eğim olarak karakterize edilebilmekte ve bu ilişki formül 4.18'deki gibi tanımlanabilmektedir

$$N_f = a \left(\frac{1}{\varepsilon_o} \right)^b \cdot \left(\frac{1}{S_o} \right)^c \quad (4.18)$$

Burada N_f , yorulma ömrü (yük tekrar sayısı) ε_o , başlangıç şekil değiştirmesi, S_o karışımın başlangıç rijitliği, a,b,c, deneysel olarak belirlenen katsayılarıdır. Gerilme kontrollü deneyde gerilme sabit kalmakta şekil değiştirme yük tekrarı ile artmaktadır. Şekil değiştirme kontrollü deneyde şekil değiştirme sabit kalmakta gerilme ise azalmaktadır. Gerilme kontrollü deneyde bozulma, numunenin kırılması olarak tarif edilirken, şekil değiştirme kontrollü deneylerde bozulma, rijitlikte %50 azalmanın olması olarak tarif edilir. Yorulma çatlağı, çatlak başlaması ve çatlak ilerlemesi olarak iki aşamaya ayrılabilir. Yorulma ömrü tayini için geliştirilen bir çok model çatlak başlangıcı safhasını içermektedir [70]. Yorulma ömrü tayini için geliştirilen bazı modeller şunlardır:

a) Shell Modeli: Shell modeli en eski ve yaygın olarak kullanılan bir metottur. Bu modelde, arazi düzeltme faktörlerini içermeyen çok geniş sıcaklık aralığında eğilme kırışi deneyleri ile gerilme ve şekil değiştirme kontrollü olmak üzere formül 4.19 ve 4.20'deki iki ayrı ampirik bağıntı geliştirilmiştir.

Gerilme kontrollü durum

$$N_f = [0,0252PI - 0,00126PI(V_b) + 0,00673V_b - 0,0167]^5 \varepsilon_t^{-5} S_m^{-1,4} \quad (4.19)$$

Şekil değiştirme kontrollü durum

$$N_f = [0,17PI - 0,0085PI(V_b) + 0,04543V_b - 0,112]^5 \varepsilon_t^{-5} S_m^{-1,8} \quad (4.20)$$

Burada N_f : bozulmaya neden olan tekrar sayısı, PI : penetrasyon indeksi, V_b : bağlayıcı oranı, ε_t : başlangıç çekme şekil değiştirmesi, S_m : karışımın rijitliği (psi) dir.

b) Asfalt Enstitüsü Modeli: Bu modelde, eğilme kirişi deneyi ile %7 hava boşluğunda ve %11 efektif bağlayıcı oranındaki karışımlar için formül 4.21'deki eşitlik geliştirilmiştir. Hacimsel özellikleri farklı olan diğer karışımlar için formül 4.22 ve 4.23'deki düzeltme faktörleri belirlenmiş ve arazi düzeltme faktörü 18,4 olarak tayin edilmiştir. Bu model gerilme kontrollü bir modeldir.

$$N_f = A \cdot 0,00432 \cdot C \cdot \varepsilon_t^{-3,291} |E^*|^{-0,854} \quad (4.21)$$

$$C = 10^M \quad (4.22)$$

$$M = 4,84 \cdot \left(\frac{V_{befk}}{V_h + V_{befk}} - 0,69 \right) \quad (4.23)$$

Burada $|E^*|$: karışımın dinamik modülü (psi), A : 18,4 olan arazi düzeltme faktörü, C, M : hacimsel düzeltme faktörleri, V_{befk} : efektif bağlayıcı oranı, V_h : hava boşluğu oranıdır.

c) SHRP Modeli: Eğilme kirişi deneyini kullanan bu model, yorulma çatlak tahmini için karışımın kompleks modülünü kullanmaktadır. Şekil değiştirme kontrollü bir modeldir ve uygulanan şekil değiştirme 200-1200 mikrostrain arasındadır. Formül 4.24 bozulmaya neden olan yük tekrarı sayısını vermektedir. Bu modelde arazi düzeltme faktörü 14 olarak belirlenmiştir.

$$N_f = 2,738 \cdot 10^5 \exp(0,077 \cdot V_f) \cdot \varepsilon_t^{-3,624} (S_o)^{-2,720} \quad (4.24)$$

Burada S_o , karışımın esneklik modülü, V_f , asfaltla dolu boşluk yüzdesidir.

d) Medani ve Molenaar Modeli: Medani ve Molenaar, bozulmaya neden olan yük tekrarı sayısının tahmininde formül 4.25'deki Wöhler bağıntısını kullanmıştır. Ampirik parametreler olan k_1 ve n , deney edilen asfalt betonunun özelliklerini temsil etmektedir. Bu model karışımın hava boşluğu ve rijitliğine dayanan çatlak gelişimi ve Paris kuralı ile ilişkili olan malzeme parametresi formül 4.26'daki "n"yi kullanarak kırılma mekanizması konseptini uygulamaktadır.

Formül 4.27'deki k_1 parametresi çok sayıda şekil değiştirme kontrollü kırış eğilme deneylerinden elde edilmiş olup bu formüller arazi düzeltme faktörleri içermemektedirler.

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^n \quad (4.25)$$

$$n = \frac{2}{m \left(0,541 + \frac{0,346}{m} - 0,03524.V_h \right)} \quad (4.26)$$

$$\log k_1 = 6,589 - 3,762.n + \frac{3209}{S_m} + 2,332.\log V_b + 0,149 \frac{V_b}{V_h} + 0,928.PI - 0,0721T_{T,B} \quad (4.27)$$

Burada, m : karışım rijitliği eğrisinin eğimi V_h : hava boşluğu oranı V_b : bağlayıcı oranı $T_{T,B}$: bağlayıcının yumuşama noktası ($^{\circ}C$) S_m : karışımın rijitliği (MPa)dir.

Yapılan çalışmalarda, 150 mm'den daha kalın olan tabakalar için kontrollü gerilme deneyinin, 50 mm'den ince tabakalar için ise kontrollü şekil değiştirme deneyinin uygun olduğu belirtilmiştir. Ayrıca kalın üst yapılarda asfalt karışımının ana yük taşıyıcı olduğu ince üst yapılarda ise asfalt kaplamadaki şekil değiştirmenin alttaki tabakalara bağlı olduğu dolayısıyla yorulma çatlaklarını azaltmak için rijitliği yüksek karışımların kalın üst yapılarda, daha yumuşak karışımların ise ince üst yapılarda uygun olacağı belirtilmiştir. Kontrollü gerilme deneyinde gerilme sabit tutulur şekil değiştirme ise giderek artar. Kontrollü şekil değiştirme deneyinde, deney süresince hasar birikmekte ve çatlak başladıktan sonra başlangıç şekil değiştirmesini gerektiren gerilme giderek azalmaktadır. Çatlak başladıktan sonra çatlak etrafında aynı şekil değiştirmeyi temin edecek gerilme azaldığından bozulmaya neden olacak çatlak ilerlemesi yavaşlamakta ve bu tip, kontrollü gerilme deneyine göre daha uzun sürmektedir. [71,72].

Yorulma deneylerindeki eğilme deneyinin, teker geçişleri sırasında kaplama içinde meydana gelen tekrarlı eğilme kuvvetlerini temsil ettiği, çekme deneyinin, kaplamanın tabanında meydana gelen çekme kuvvetini temsil ettiği, düşünülmektedir [73]. Eğilme deneyinde, uzunluğu 310 mm olan, genişliği ve yüksekliği 7,62 mm'yi geçmeyen numune, uçları mafsallı olup dönme ve ötelenmeye izin verilmiştir. İki noktadan yükleme, bu noktalar arasında basit eğilmeye neden olmaktadır. Yükleme süresi 0,1sn, yük boşaltma süresi 0,4sn ve yükleme tipi yarım sinüs dalgasıdır [72]. İndirek çekme yorulma deneyi, araştırmacıların çoğu tarafından asfalt karışımların değerlendirilmesinde ve üstyapı analizinde kullanılmıştır. Deney oldukça basit olup malzeme karakteristiklerinin temel özellikler cinsinden belirlenmesinde oldukça etkilidir. Numunede gerilme durumunun oldukça kompleks olmasına rağmen, kritik

gerilme ve şekil değiştirmeler lineer elastik kabulü yapılırsa kolayca hesaplanabilir. İndirek çekme yorulma deneyinde, düşey aks boyunca iki eksenli gerilme durumu mevcuttur. Bu aks boyunca yatay çekme gerilmeleri oldukça sabit kalırken düşey basınç gerilmeleri önemli ölçüde değişmektedir [74].

5.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bitümlü sıcak karışımların üretilmesinde, geleneksel olarak bağlayıcı, kaba agreg, ince agreg ve mineral filler aynı ortamda bir defada karıştırılmaktadır. Bu şekildeki karıştırmada küçük daneler ve filler kaba agreganın tam olarak asfaltla kaplanmasını önlemektedir. Kaba agreg üzerindeki küçük parçacıklar, suyun agregaya penetrasyonu için kanallar oluşturabilmekte ve aynı zamanda asfaltı absorbe ederek agreg yüzeyindeki asfalt film kalınlığının ince olmasına neden olmaktadır. Ayrıca küçük parçacıklar asfaltın, kaba agreganın boşluklarına girmesine engel olmakta ve iyi bir mekanik kenetlenme temin edilememektedir. Diğer taraftan geleneksel karıştırma yönteminde agreg karışımının bağlayıcı ile buluştuktan sonraki bekleme süresi, asfaltın agreganın boşluklarına iyi bir şekilde gireceği kadar uzun değildir.

Bu çalışmada yeni bir yöntem olarak, BSK'ların üretiminde iki aşamalı karıştırma sistemi geliştirilmiştir. İki aşamalı karıştırma sisteminde kaba agreg, ince agreg ve fillerden ayrı olarak karıştırılmakta, bir ön kaplama işlemine tabi tutulmaktadır. Bu şekilde kaba agreganın tam ve üniform olarak asfalt film ile kaplanması hedeflenmektedir. Ayrıca kaplanan agreganın belirli süre ve sıcaklıkta bekletilmesi ile asfaltın kaba agreganın kılcal boşluklarına gireceği ve iyi bir mekanik kenetlenme temin edeceği düşünülmektedir.

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında kullanılacak malzemelerin karakteristikleri ve şartnamelere uygunluğu tespit edilmiştir. Daha sonra gerek geleneksel yöntemle ve gerek iki aşamalı karıştırma sistemi ile üretilecek Marshall numuneleri için optimum bağlayıcı oranı ve %7 boşluk oranını sağlayacak karışım tespit edilmiştir. Optimum bağlayıcı oranında hazırlanan numunelere Marshall stabilite, rijitlik modülü, sünme rijitliği ve yorulma deneyleri, %7 boşluk oranındaki numunelere ise indirek çekme mukavemeti deneyleri uygulanmıştır.

5.1.Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Deneylerde agreg olarak Elazığ civarı karayollarında kullanılmak üzere kırmataş malzeme üreten Karayazı taşocağından temin edilen kırmataş bazalt malzemesi kullanılmıştır. Bu agreg malzemesinin fiziksel özellikleri belirlenmiş ve şartnamelere uygun olduğu tespit edilmiştir. Agregaya ait deney sonuçları Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Agreganın fiziksel özellikleri.

Aşınma kaybı (%) (Los Angeles)	16
Donma kaybı (%) (Na ₂ SO ₄)	6,16
Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı (gr/cm ³)	2,673
Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı (gr/cm ³)	2,716
İnce agreganın hacim özgül ağırlığı (gr/cm ³)	2,691
İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı (gr/cm ³)	2,725
Filler zahiri özgül ağırlığı (gr/cm ³)	2,732

Deneylerde bağlayıcı olarak AC 100-150, AC 75-100 ve AC 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentoları ve AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosuna ağırlıkça %5 Styrene Butadiene Styrene (SBS,Kraton D1101) katılarak modifiye edilen bağlayıcı kullanılmıştır. Asfalt çimentolarına ait fiziksel özellikler Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Bağlayıcı fiziksel özellikleri.

Bağlayıcı	Yumuşama noktası (C°) (TS 120)	Düktilite (cm) (TS 119)	Penetrasyon (1/100 cm) (TS 118)	Özgül ağırlık (gr/cm ³) (TS 1087)
AC 100-150	43,2	125	120	1,015
AC 75-100	48,4	110	81	1,022
AC 50-70	54,7	100	68	1,031
%5 SBS katkılı AC 75-100	71,4	53	59	1,038

AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosunun SBS ile modifiye işleminde ağırlıkça % 5 SBS kullanılmıştır. Asfalt çimentosu ve SBS, 170 °C sıcaklıkta 8 cm çapındaki silindir kalıpta her bir kanat uzunluğu 3 cm olan iki kanatlı karıştırıcı ile 500 devir/dakika hızda 1,5 saat karıştırılmıştır.

Deneylerde agreganın gradasyonu olarak, KGM fenni şartnamesi aşınma tabakası Tip 2 gradasyon limitleri ortalaması kullanılmıştır. Agreganın gradasyonu Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3. Karışımlarda kullanılan agreganın gradasyonu.

Elek açıklığı (mm)	25	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,18	0,075
Geçen (%)	100	90	72,5	63	49	36,5	19,5	12	4,5

Karışımlardaki kaba agreganın oranı % 44, ince agreganın oranı % 49, filler oranı ise %7’dir.

5.2. Optimum Bağlayıcı Oranlarının Bulunması

Karışımların optimum asfalt içeriği Marshall metoduna göre her bir bağlayıcı için tespit edilmiştir. Seçilen agrega gradasyonu için farklı asfalt muhtevalarında üçer adet Marshall numuneleri, 101,6 mm çapındaki kalıplarda her iki yüzüne 75 darbe uygulanarak hazırlanmıştır. Öncelikle numunelerin üç ayrı yerden yükseklikleri ölçülmüş, havadaki kuru ağırlıkları (W_{kuru}), sudaki ağırlıkları (W_{suda}) ve havadaki doymuş ağırlıkları ($W_{doymuş}$) ölçülerek, numunelerin pratik özgül ağırlıkları (D_p), asfaltla dolu boşluk oranları (V_f), boşluk oranları (V_h), agregalar arasındaki boşluk oranları (V_{ma}) tespit edilmiştir. Daha sonra numuneler Marshall deney cihazında kırılarak stabilite ve akma değerleri tespit edilmiştir.

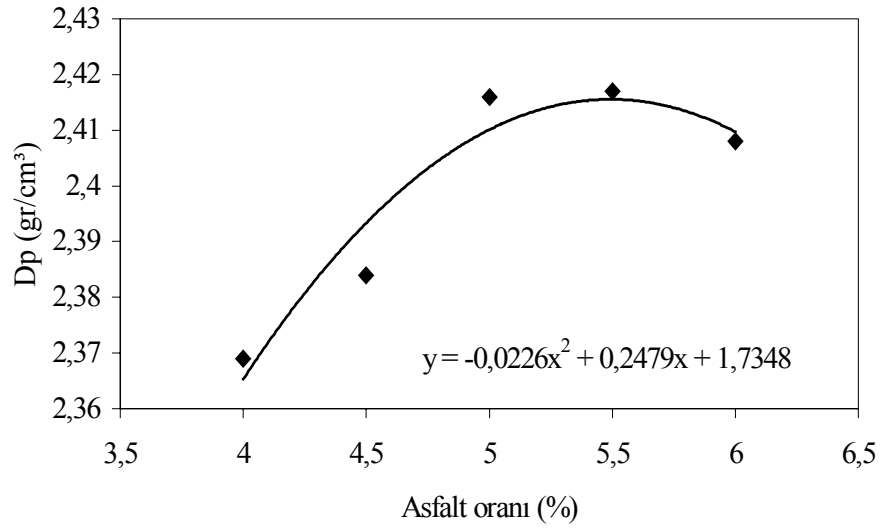
5.2.1. AC 100-150 Penetrasyonlu Asfalt Çimentosu İçin Optimum Bağlayıcı Oranının Bulunması

AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanacak numunelerde optimum bağlayıcı oranını tespit etmek için karışımlara agrega ağırlığınca %4,0; %4,5; %5,0; %5,5 ve %6 oranlarında asfalt ilave edilerek her bir karışımın Tablo 5.4’de yer alan Marshall dizayn değerleri tespit edilmiştir.

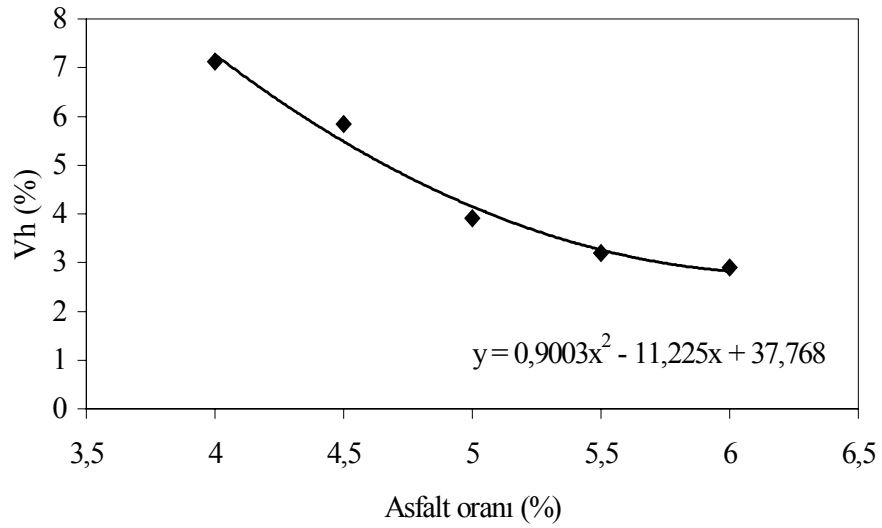
Tablo 5.4’deki ortalama değerler, asfalt oranı-pratik birim ağırlık ilişkisi, asfalt oranı-boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-stabilite ilişkisi, asfalt oranı-akma ilişkisi olarak sırasıyla Şekil 5.1–5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.4. AC 100-150 ile hazırlanan numunelerin Marshall metodu dizayn değerleri.

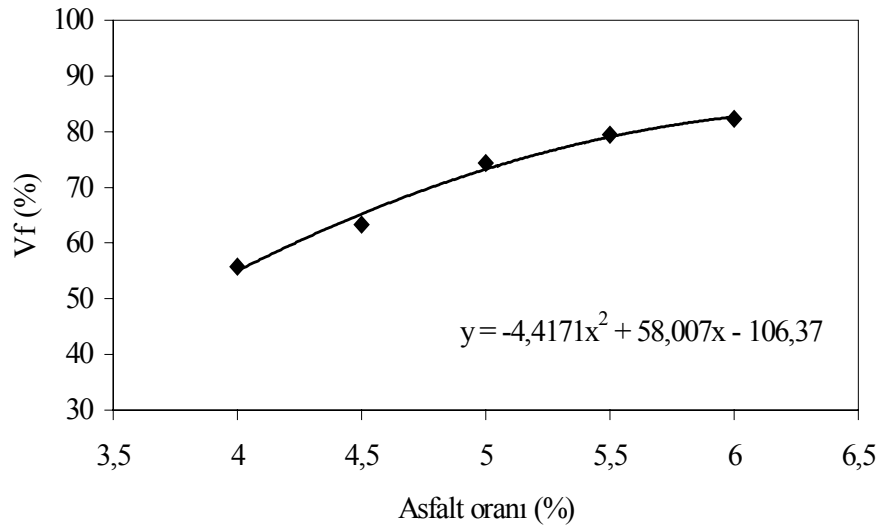
Bağlayıcı oranı (%)	No	Yükseklik (mm)	W _{kuru} (gr)	W _{doygun} (gr)	W _{suda} (gr)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{ma} (%)	V _f (%)	Stabilite (kN)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kN)	Akma (mm)
4,0	1	64,5	1243,28	1251,14	726,30	2,369	2,551	7,126	16,103	55,745	15,6	0,975	15,21	2,64
	2	64,2	1245,14	1254,16	727,90	2,366	2,551	7,238	16,204	55,33	15,1	0,982	14,83	2,61
	3	64,2	1247,23	1255,20	729,31	2,372	2,551	7,017	16,004	56,154	15,4	0,982	15,12	2,52
	Ort.					2,369	2,551	7,127	16,104	55,743			15,05	2,59
4,5	1	64,3	1248,56	1254,06	730,06	2,383	2,532	5,906	16,015	63,122	16,3	0,980	15,97	2,66
	2	64,3	1250,62	1255,75	730,82	2,382	2,532	5,918	16,026	63,073	16,7	0,980	16,37	2,79
	3	64,2	1251,15	1256,10	732,04	2,387	2,532	5,722	15,851	63,902	16,2	0,982	15,91	2,75
	Ort.					2,384	2,532	5,849	15,964	63,365			16,07	2,73
5,0	1	64,0	1250,73	1253,00	734,20	2,411	2,514	4,120	15,431	73,299	16,4	0,988	16,20	2,92
	2	64,5	1250,40	1254,11	736,80	2,417	2,514	3,869	15,209	74,559	15,9	0,975	15,50	2,79
	3	64,3	1251,82	1252,6	735,27	2,420	2,514	3,764	15,116	75,101	16	0,980	15,68	2,85
	Ort.					2,416	2,514	3,918	15,252	74,320			15,80	2,85
5,5	1	64,7	1253,21	1257,65	738,81	2,415	2,497	3,265	15,671	79,166	15,2	0,970	14,74	3,08
	2	64,5	1256,72	1259,22	740,07	2,421	2,497	3,052	15,485	80,292	15,5	0,975	15,11	3,17
	3	64,5	1255,89	1258,63	738,51	2,415	2,497	3,297	15,699	79,001	15,9	0,975	15,50	3,31
	Ort.					2,417	2,497	3,204	15,618	79,486			15,12	3,19
6,0	1	64,3	1253,46	1258,71	737,61	2,405	2,480	3,002	16,416	81,715	14,7	0,980	14,41	4,41
	2	64,7	1256,78	1260,31	738,83	2,410	2,480	2,816	16,256	82,679	14,1	0,970	13,68	4,29
	3	64,5	1255,44	1259,32	738,15	2,409	2,480	2,862	16,295	82,439	14,4	0,975	14,04	4,34
	Ort.					2,408	2,480	2,893	16,322	82,278			14,05	4,35



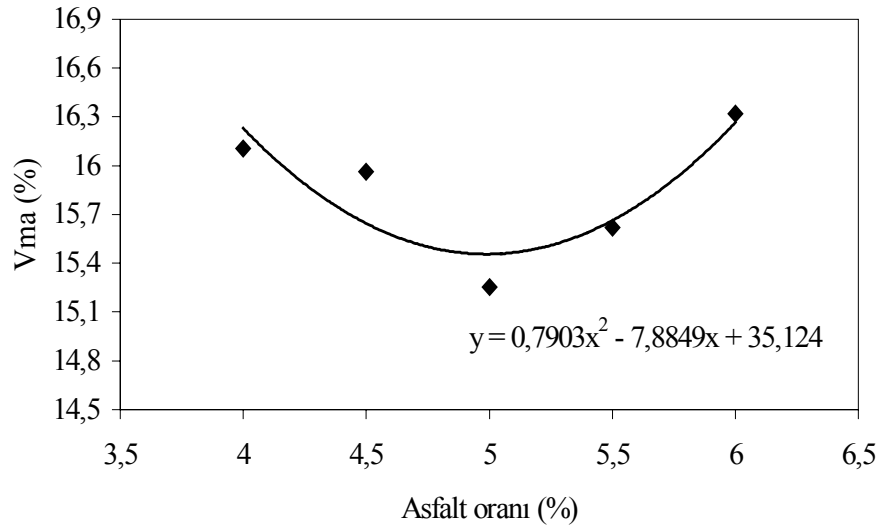
Şekil 5.1. Asfalt oranı – Pratik birim ağırlık ilişkisi.



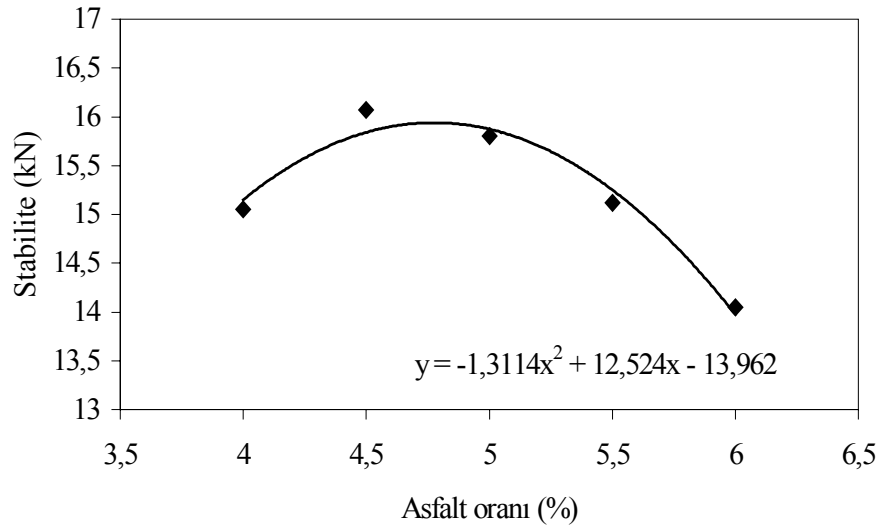
Şekil 5.2. Asfalt oranı – Boşluk yüzdesi ilişkisi.



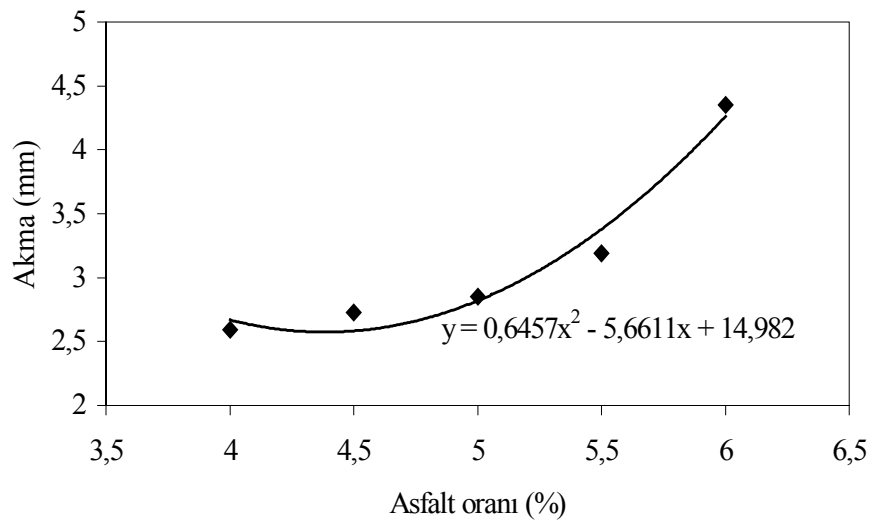
Şekil 5.3. Asfalt oranı – Asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi.



Şekil 5.4. Asfalt oranı – Agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi.



Şekil 5.5. Asfalt oranı – Stabilite ilişkisi.



Şekil 5.6. Asfalt oranı – Akma ilişkisi.

Optimum asfalt içeriğinin bulunması için,

Pratik özgül ağırlık, stabilite, akma, boşluk oranı, asfalt ile dolu boşluk oranı grafikleri çizilerek, yoğunluk ve stabilite eğrilerinin en büyük değerlerine karşı gelen asfalt yüzdeleri, boşluk oranı, asfaltla dolu boşluk oranı için şartnamede öngörülen değerlerin ortalamasına karşı gelen asfalt yüzdeleri tespit edilmiştir. Bunun için % 4 boşluk oranına ve % 80 asfaltla dolu boşluk oranına karşılık gelen asfalt içerikleri tespit edilmiştir. Optimum asfalt içeriği bu dört değerin aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Buna göre,

Stabilitenin maksimum olduğu asfalt yüzdesi = 4,77

Pratik birim ağırlığın maksimum olduğu asfalt yüzdesi = 5,48

% 80 asfaltla dolu boşluk oranı için asfalt yüzdesi = 5,61

% 4 hava boşluğu için asfalt yüzdesi = 5,06

Optimum asfalt yüzdesi = $(4,77 + 5,48 + 5,61 + 5,06) / 4 = 5,23$

% 5,23 optimum asfalt yüzdesindeki numunelerin akma değerlerinin şartname limitleri olan 2-4 mm arasında olduğu Şekil 5.6'da görülmektedir.

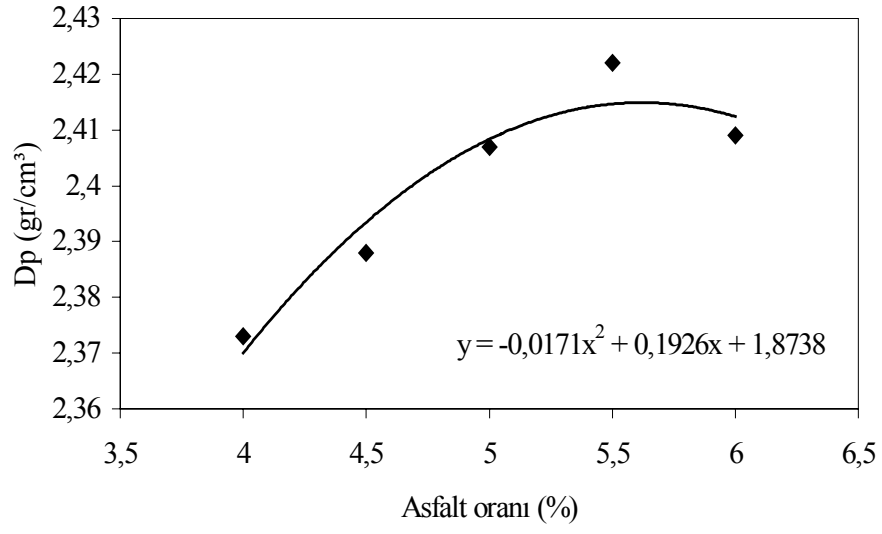
5.2.2. AC 75-100 Penetrasyonlu Asfalt Çimentosu İçin Optimum Bağlayıcı Oranının Bulunması

AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanacak numunelerde optimum bağlayıcı oranını tespit etmek için karışımlara agrega ağırlığınca %4,0; %4,5; %5,0; %5,5 ve %6 oranlarında asfalt ilave edilerek her bir karışımın Tablo 5.5'de yer alan Marshall dizayn değerleri tespit edilmiştir.

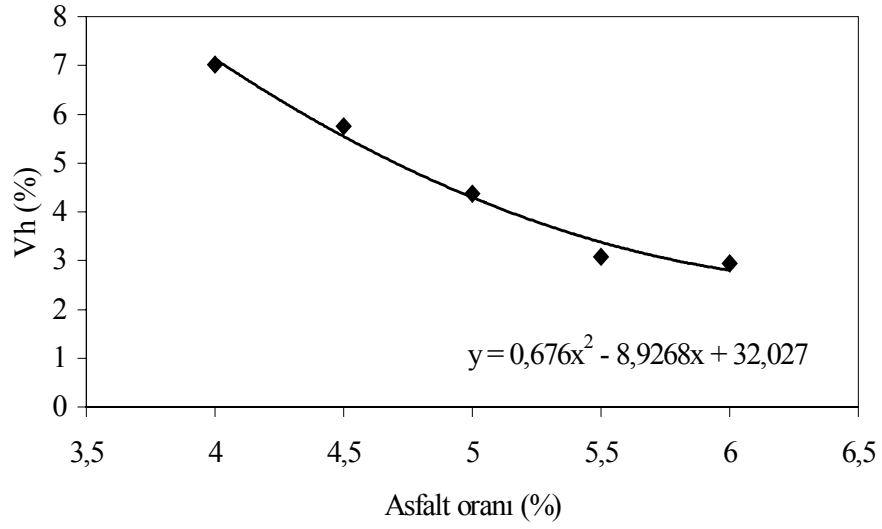
Tablo 5.5'deki ortalama değerler, asfalt oranı-pratik birim ağırlık ilişkisi, asfalt oranı-boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-stabilite ilişkisi, asfalt oranı-akma ilişkisi olarak sırasıyla Şekil 5.7–5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.5. AC 75-100 ile hazırlanan numunelerin Marshall metodu dizayn değerleri.

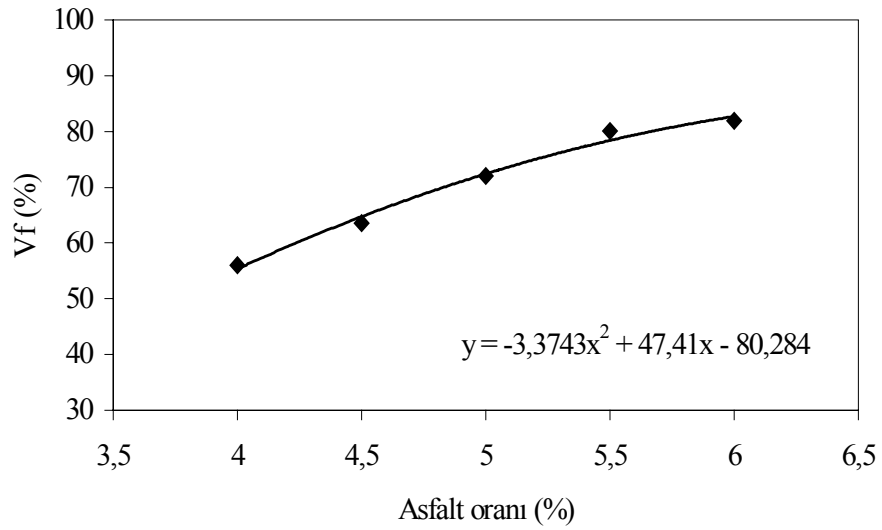
Bağlayıcı oranı (%)	No	Yükseklik (mm)	W _{kuru} (gr)	W _{doygun} (gr)	W _{suda} (gr)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{ma} (%)	V _f (%)	Stabilite (kN)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kN)	Akma (mm)
4,0	1	64,2	1244,14	1251,75	727,40	2,373	2,552	7,037	15,966	55,927	16,2	0,982	15,91	2,31
	2	64,0	1246,32	1255,20	729,12	2,369	2,552	7,180	16,096	55,391	16,4	0,988	16,20	2,44
	3	64,5	1248,76	1256,43	731,25	2,378	2,552	6,839	15,787	56,681	16,2	0,975	15,80	2,40
	Ort.					2,373	2,552	7,019	15,95	55,999			15,97	2,38
4,5	1	64,3	1249,34	1256,10	732,88	2,388	2,534	5,776	15,837	63,527	17,0	0,980	16,66	2,53
	2	64,5	1251,25	1257,15	732,90	2,387	2,534	5,818	15,874	63,351	17,6	0,975	17,16	2,59
	3	64,5	1250,99	1255,38	732,04	2,390	2,534	5,674	15,746	63,967	17,3	0,975	16,87	2,45
	Ort.					2,388	2,534	5,756	15,819	63,615			16,90	2,52
5,0	1	64,5	1252,73	1257,00	736,01	2,405	2,516	4,448	15,651	71,582	18,5	0,975	18,04	2,74
	2	64,2	1249,80	1257,83	738,20	2,405	2,516	4,422	15,628	71,707	18,7	0,982	18,36	2,85
	3	64,3	1250,65	1254,80	735,87	2,410	2,516	4,228	15,457	72,649	18,1	0,980	17,74	2,71
	Ort.					2,407	2,516	4,366	15,579	71,979			18,05	2,77
5,5	1	64,3	1252,19	1257,45	740,11	2,420	2,499	3,148	15,495	79,681	18,1	0,980	17,74	3,01
	2	64,7	1255,23	1260,10	742,78	2,426	2,499	2,910	15,287	80,967	17,9	0,970	17,36	3,13
	3	64,3	1252,40	1259,71	742,24	2,420	2,499	3,157	15,502	79,638	18,4	0,980	18,03	3,17
	Ort.					2,422	2,499	3,072	15,428	80,095			17,71	3,10
6,0	1	64,5	1254,71	1259,80	739,42	2,411	2,482	2,863	16,217	82,347	17,4	0,975	16,97	4,01
	2	64,7	1257,30	1262,26	739,69	2,406	2,482	3,070	16,396	81,275	17,0	0,970	16,49	3,93
	3	64,5	1254,50	1261,33	740,85	2,410	2,482	2,898	16,247	82,165	16,8	0,975	16,38	3,83
	Ort.					2,409	2,482	2,944	16,287	81,929			16,61	3,92



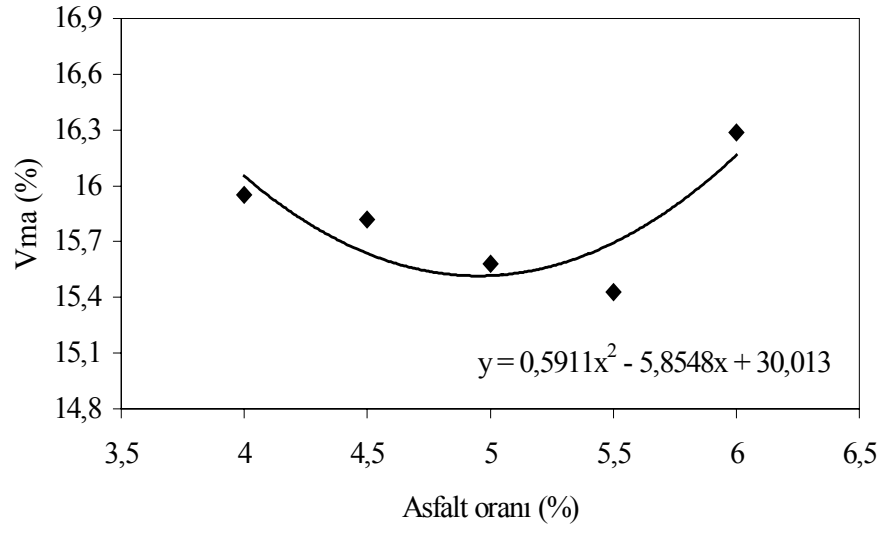
Şekil 5.7. Asfalt oranı – Pratik birim ağırlık ilişkisi.



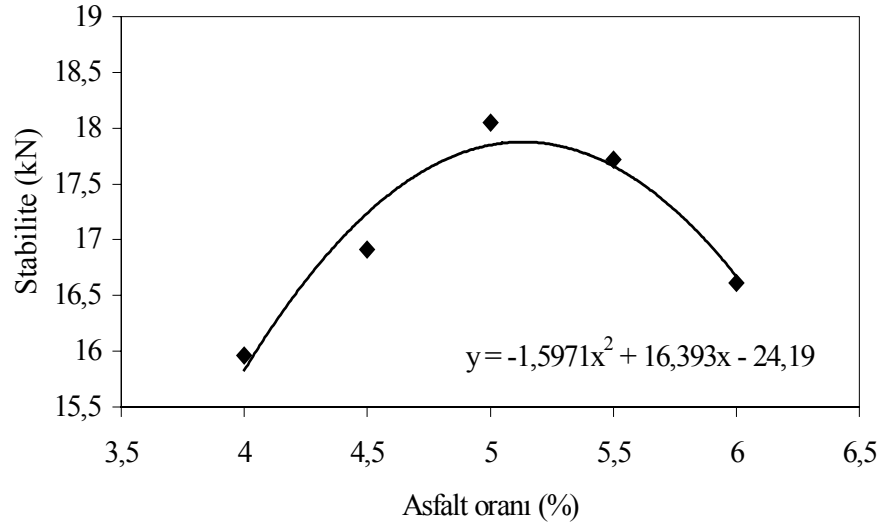
Şekil 5.8. Asfalt oranı – Boşluk yüzdesi ilişkisi.



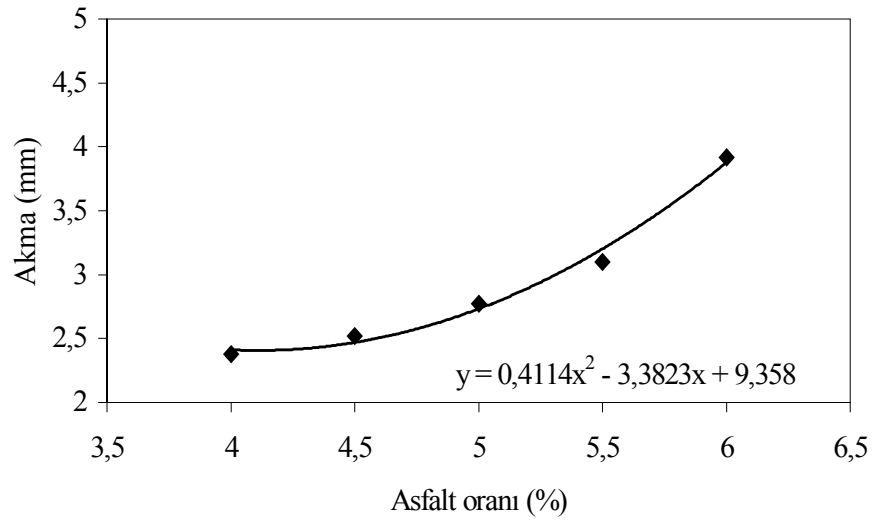
Şekil 5.9. Asfalt oranı – Asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi.



Şekil 5.10. Asfalt oranı – Agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi.



Şekil 5.11. Asfalt oranı – Stabilite ilişkisi.



Şekil.5.12. Asfalt oranı – Akma ilişkisi.

Optimum asfalt içeriğinin bulunması için,

Pratik özgül ağırlık, stabilite, akma, boşluk oranı, asfalt ile dolu boşluk oranı grafikleri çizilerek, yoğunluk ve stabilite eğrilerinin en büyük değerlerine karşı gelen asfalt yüzdeleri, boşluk oranı, asfaltla dolu boşluk oranı için şartnamede öngörülen değerlerin ortalamasına karşı gelen asfalt yüzdeleri tespit edilmiştir. Bunun için % 4 boşluk oranına ve % 80 asfaltla dolu boşluk oranına karşılık gelen asfalt içerikleri tespit edilmiştir. Optimum asfalt içeriği bu dört değerin aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Buna göre,

Stabilitenin maksimum olduğu asfalt yüzdesi = 5,13

Pratik birim ağırlığın maksimum olduğu asfalt yüzdesi = 5,63

% 80 asfaltla dolu boşluk oranı için asfalt yüzdesi = 5,67

% 4 hava boşluğu için asfalt yüzdesi = 5,13

Optimum asfalt yüzdesi = $(5,13 + 5,63 + 5,67 + 5,13) / 4 = 5,39$

% 5,39 optimum asfalt yüzdesindeki numunelerin akma değerlerinin şartname limitleri olan 2-4 mm arasında olduğu Şekil 5.12’de görülmektedir.

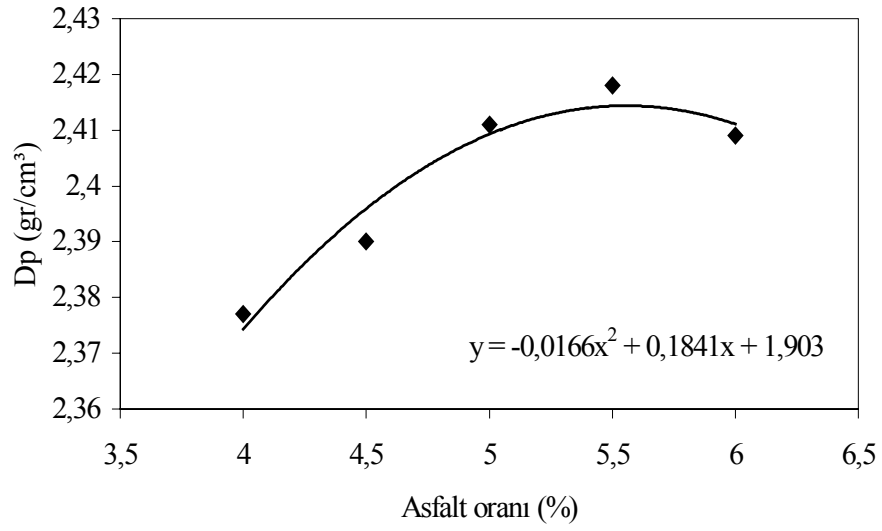
5.2.3. AC 50-70 Penetrasyonlu Asfalt Çimentosu İçin Optimum Bağlayıcı Oranının Bulunması

AC 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanacak numunelerde optimum bağlayıcı oranını tespit etmek için karışımlara agrega ağırlığınca %4,0; %4,5; %5,0; %5,5 ve %6 oranlarında asfalt ilave edilerek her bir karışımın Tablo 5.6’da yer alan Marshall dizayn değerleri tespit edilmiştir.

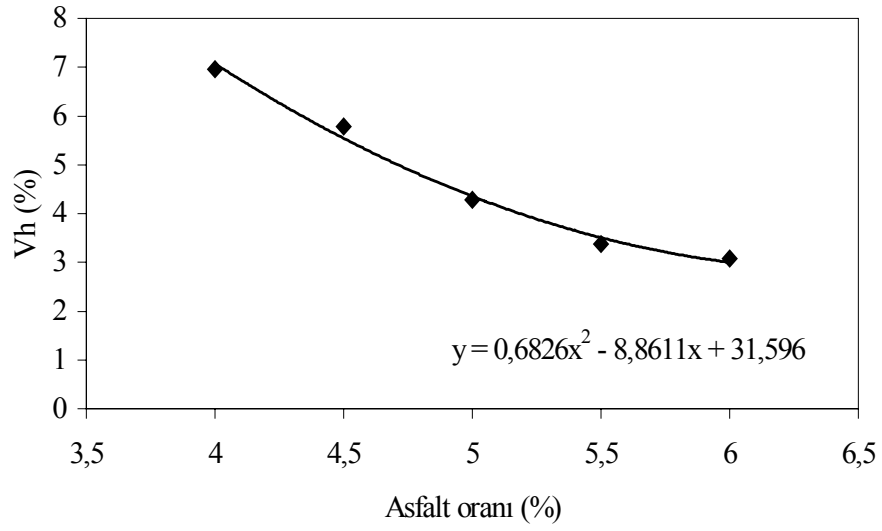
Tablo 5.6’daki ortalama değerler, asfalt oranı-pratik birim ağırlık ilişkisi, asfalt oranı-boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-stabilite ilişkisi, asfalt oranı-akma ilişkisi olarak sırasıyla Şekil 5.13–5.18’de verilmiştir.

Tablo 5.6. AC 50-70 ile hazırlanan numunelerin Marshall metodu dizayn değerleri.

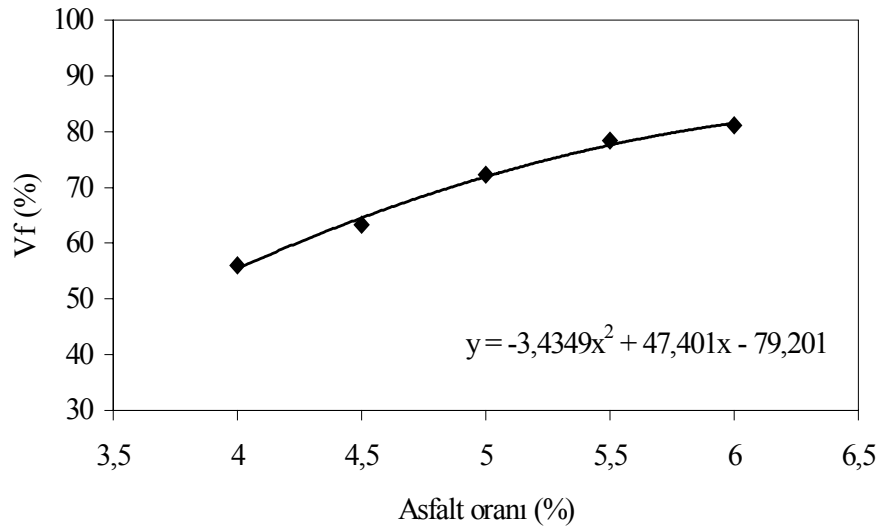
Bağlayıcı oranı (%)	No	Yükseklik (mm)	W _{kuru} (gr)	W _{doygün} (gr)	W _{suda} (gr)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{ma} (%)	V _r (%)	Stabilite (kN)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kN)	Akma (mm)
4,0	1	64,3	1245,20	1252,73	728,20	2,374	2,554	7,067	15,923	55,616	17,5	0,980	17,15	2,54
	2	64,3	1247,33	1254,80	730,18	2,378	2,554	6,924	15,794	56,158	17,0	0,980	16,66	2,33
	3	64,2	1246,25	1253,12	729,07	2,378	2,554	6,904	15,776	56,236	17,2	0,982	16,89	2,49
	Ort.					2,377	2,554	6,965	15,831	56,003			16,90	2,45
4,5	1	64,2	1252,63	1259,10	735,29	2,391	2,537	5,723	15,711	63,575	17,8	0,982	17,48	2,55
	2	64,0	1250,18	1257,65	734,46	2,390	2,537	5,795	15,776	63,264	18,0	0,988	17,78	2,64
	3	64,0	1250,79	1258,17	734,53	2,389	2,537	5,831	15,807	63,115	18,4	0,988	18,18	2,68
	Ort.					2,390	2,537	5,783	15,765	63,318			17,81	2,62
5,0	1	64,0	1252,30	1256,12	736,42	2,410	2,519	4,341	15,471	71,938	19,5	0,988	19,27	2,93
	2	64,2	1254,25	1258,14	737,83	2,411	2,519	4,305	15,439	72,117	18,9	0,982	18,56	2,74
	3	64,0	1256,75	1259,86	739,17	2,414	2,519	4,184	15,332	72,710	19,3	0,988	19,07	2,86
	Ort.					2,411	2,519	4,277	15,414	72,255			18,96	2,84
5,5	1	64,5	1254,75	1260,28	741,06	2,417	2,502	3,409	15,629	78,185	19,5	0,975	19,01	3,18
	2	64,3	1253,34	1259,79	741,88	2,420	2,502	3,274	15,511	78,892	19,7	0,980	19,31	3,13
	3	64,2	1251,30	1258,03	740,15	2,416	2,502	3,426	15,643	78,100	19,9	0,982	19,54	3,24
	Ort.					2,418	2,502	3,370	15,594	78,392			19,29	3,18
6,0	1	64,5	1255,10	1261,33	740,28	2,409	2,485	3,074	16,299	81,140	18,4	0,975	17,94	4,19
	2	64,3	1253,19	1259,55	739,83	2,411	2,485	2,974	16,212	81,657	19,0	0,980	18,62	4,28
	3	64,5	1256,85	1264,71	742,25	2,406	2,485	3,201	16,408	80,493	18,7	0,975	18,23	4,26
	Ort.					2,409	2,485	3,083	16,306	81,096			18,26	4,24



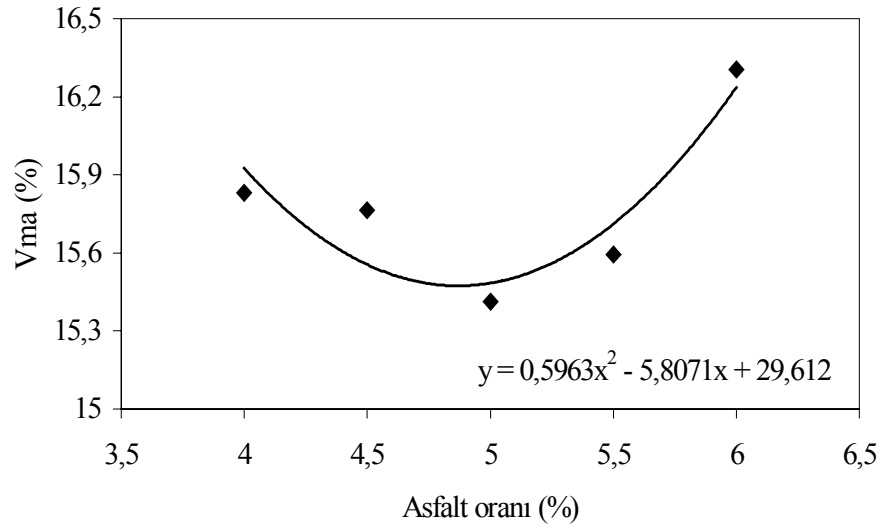
Şekil 5.13. Asfalt oranı – Pratik birim ağırlık ilişkisi.



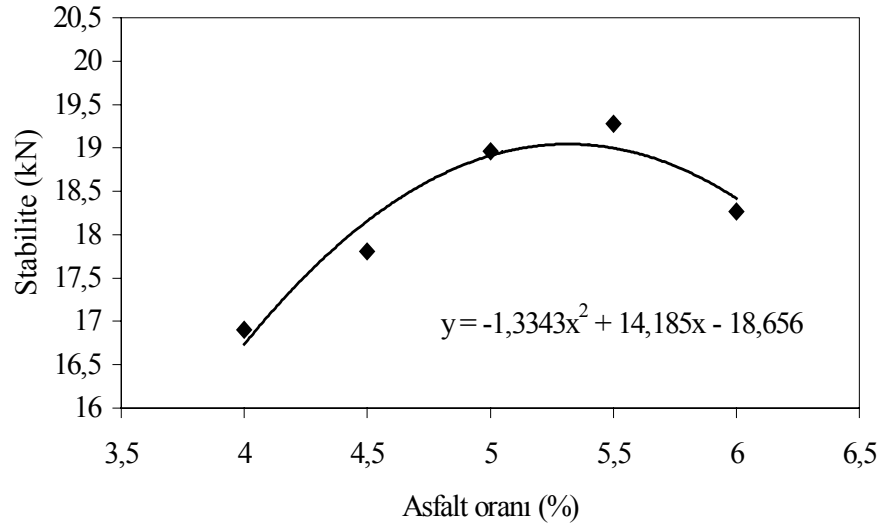
Şekil 5.14. Asfalt oranı – Boşluk yüzdesi ilişkisi.



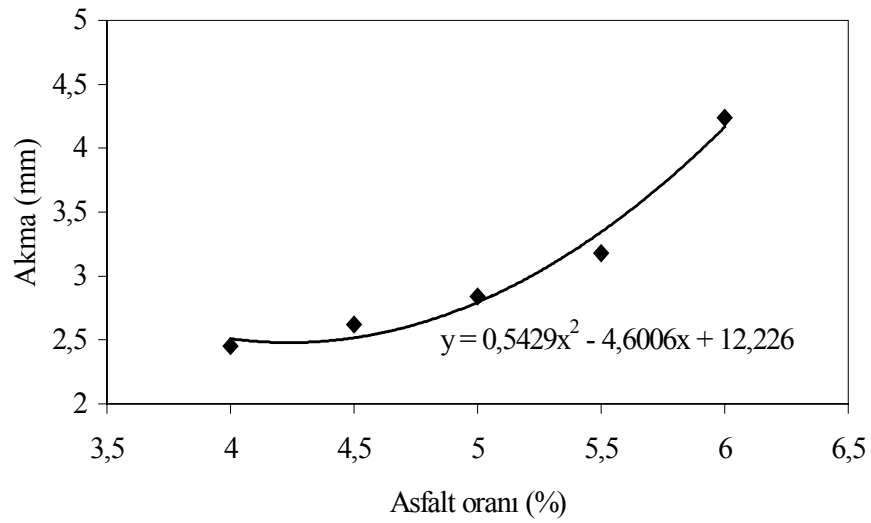
Şekil 5.15. Asfalt oranı – Asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi.



Şekil 5.16. Asfalt oranı – Agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi.



Şekil 5.17. Asfalt oranı – Stabilité ilişkisi.



Şekil 5.18. Asfalt oranı – Akma ilişkisi.

Optimum asfalt içeriğinin bulunması için,

Pratik özgül ağırlık, stabilite, akma, boşluk oranı, asfalt ile dolu boşluk oranı grafikleri çizilerek, yoğunluk ve stabilite eğrilerinin en büyük değerlerine karşı gelen asfalt yüzdeleri, boşluk oranı, asfaltla dolu boşluk oranı için şartnamede öngörülen değerlerin ortalamasına karşı gelen asfalt yüzdeleri tespit edilmiştir. Bunun için % 4 boşluk oranına ve % 80 asfaltla dolu boşluk oranına karşılık gelen asfalt içerikleri tespit edilmiştir. Optimum asfalt içeriği bu dört değer aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Buna göre,

Stabilitenin maksimum olduğu asfalt yüzdesi = 5,31

Pratik birim ağırlığın maksimum olduğu asfalt yüzdesi = 5,54

% 80 asfaltla dolu boşluk oranı için asfalt yüzdesi = 5,78

% 4 hava boşluğu için asfalt yüzdesi = 5,18

Optimum asfalt yüzdesi = $(5,31 + 5,54 + 5,78 + 5,18) / 4 = 5,45$

% 5,45 optimum asfalt yüzdesindeki numunelerin akma değerlerinin şartname limitleri olan 2-4 mm arasında olduğu Şekil 5.18’de görülmektedir.

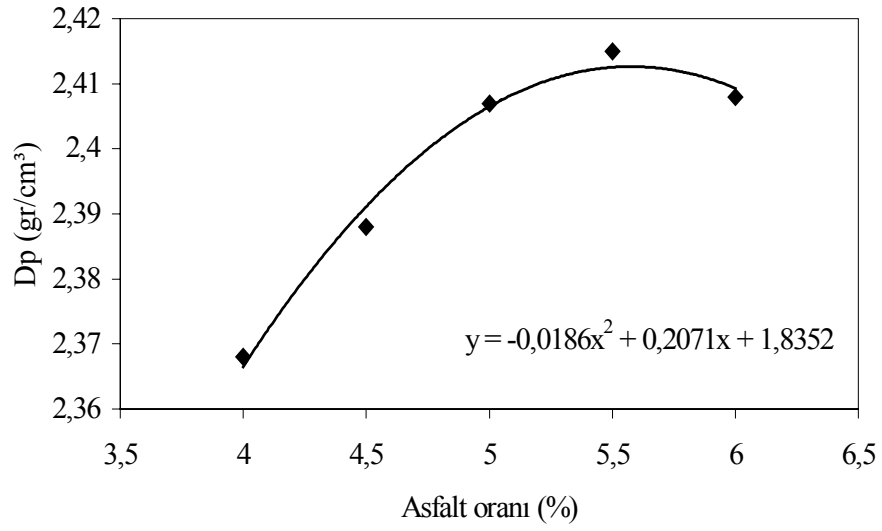
5.2.4. %5 SBS Katkılı AC 75-100 Penetrasyonlu Asfalt Çimentosu İçin Optimum Bağlayıcı Oranının Bulunması

Ağırlıkça %5 SBS katkı AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanacak numunelerde optimum bağlayıcı oranını tespit etmek için karışımlara agrega ağırlığınca %4,0; %4,5; %5,0; %5,5 ve %6 oranlarında asfalt ilave edilerek her bir karışımın Tablo 5.7’de yer alan Marshall dizayn değerleri tespit edilmiştir.

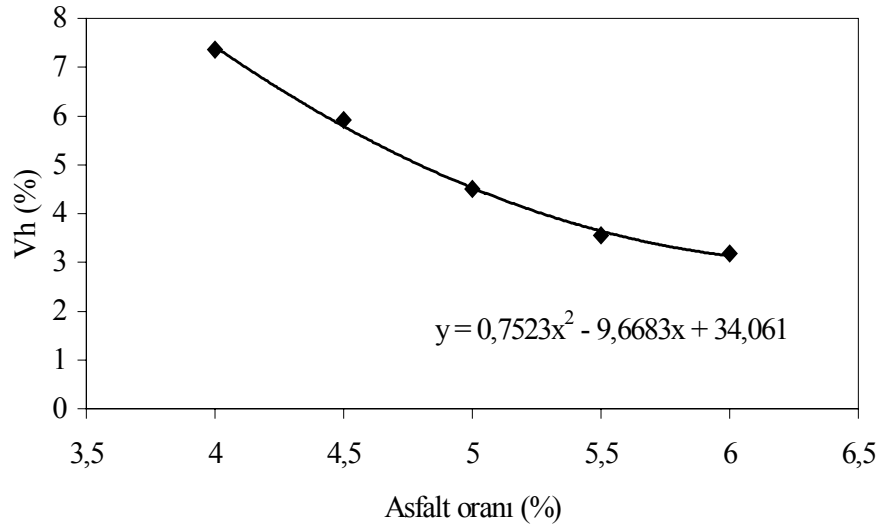
Tablo 5.7’deki ortalama değerler, asfalt oranı-pratik birim ağırlık ilişkisi, asfalt oranı-boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi, asfalt oranı-stabilite ilişkisi, asfalt oranı-akma ilişkisi olarak sırasıyla Şekil 5.19–5.24’de verilmiştir.

Tablo 5.7. 75-100 + %5 SBS ile hazırlanan numunelerin Marshall metodu dizayn değerleri.

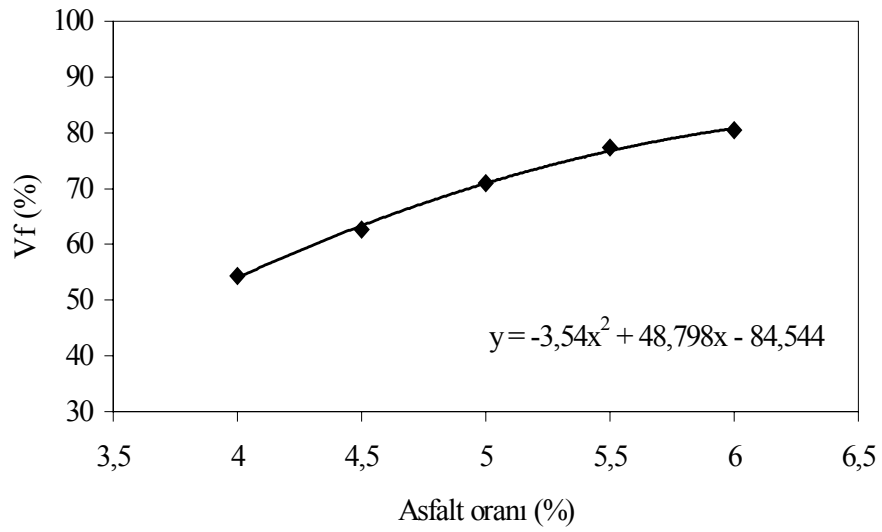
Bağlayıcı oranı (%)	No	Yükseklik (mm)	W _{kuru} (gr)	W _{doygun} (gr)	W _{suda} (gr)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{ma} (%)	V _f (%)	Stabilite (kN)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kN)	Akma (mm)
4,0	1	64,5	1248,95	1256,33	729,63	2,371	2,556	7,231	16,018	54,854	18,6	0,975	18,14	2,59
	2	64,7	1249,59	1258,81	731,14	2,368	2,556	7,354	16,129	54,403	18,9	0,970	18,33	2,44
	3	64,3	1247,61	1255,93	728,20	2,364	2,556	7,512	16,272	53,835	19,1	0,980	18,72	2,49
	Ort.					2,368	2,556	7,366	16,139	54,364			18,40	2,51
4,5	1	64,5	1253,34	1261,19	736,21	2,387	2,538	5,947	15,851	62,484	20,4	0,975	19,89	2,74
	2	64,3	1250,97	1259,02	735,67	2,390	2,538	5,832	15,748	62,967	20,2	0,980	19,80	2,78
	3	64,3	1251,85	1260,51	736,09	2,387	2,538	5,958	15,861	62,436	19,8	0,980	19,40	2,84
	Ort.					2,388	2,538	5,912	15,82	62,629			19,70	2,79
5,0	1	64,2	1252,86	1260,92	740,60	2,408	2,521	4,488	15,534	71,110	20,8	0,982	20,43	3,02
	2	64,3	1253,27	1263,08	742,72	2,408	2,521	4,464	15,513	71,225	21,5	0,980	21,07	2,86
	3	64,5	1256,38	1264,15	741,96	2,406	2,521	4,562	15,600	70,754	21,1	0,975	20,57	2,89
	Ort.					2,407	2,521	4,505	15,549	71,030			20,69	2,92
5,5	1	64,3	1257,30	1264,36	743,80	2,415	2,504	3,545	15,675	77,387	21,4	0,980	20,97	3,27
	2	64,2	1256,24	1263,29	743,86	2,418	2,504	3,416	15,563	78,048	21,4	0,982	21,01	3,35
	3	64,0	1252,91	1259,09	739,63	2,412	2,504	3,678	15,792	76,710	21,0	0,988	20,75	3,41
	Ort.					2,415	2,504	3,546	15,677	77,382			20,91	3,34
6,0	1	64,5	1256,35	1263,31	741,89	2,409	2,487	3,135	16,275	80,734	19,9	0,975	19,40	3,99
	2	64,0	1253,19	1261,64	740,76	2,406	2,487	3,279	16,399	80,005	20,4	0,988	20,16	4,18
	3	64,2	1257,05	1263,75	742,01	2,409	2,487	3,141	16,279	80,706	20,6	0,982	20,23	4,03
	Ort.					2,408	2,487	3,185	16,318	80,482			19,93	4,07



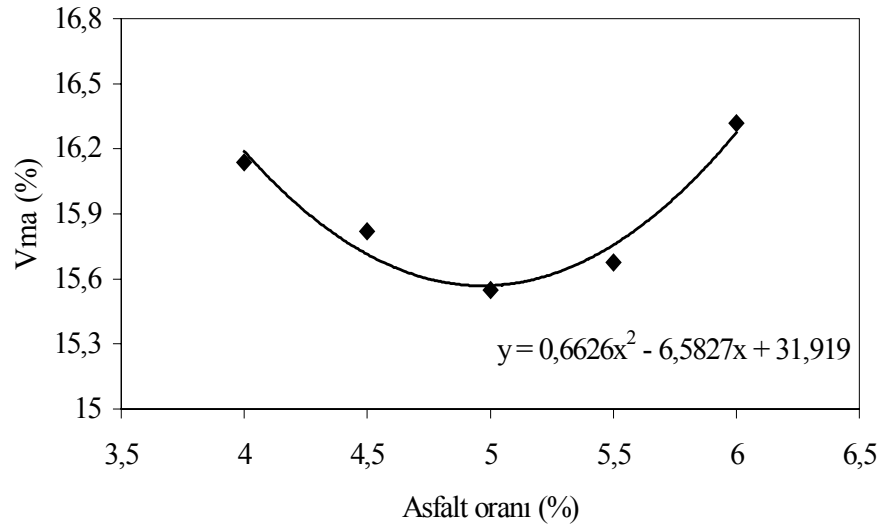
Şekil 5.19. Asfalt oranı – Pratik birim ağırlık ilişkisi.



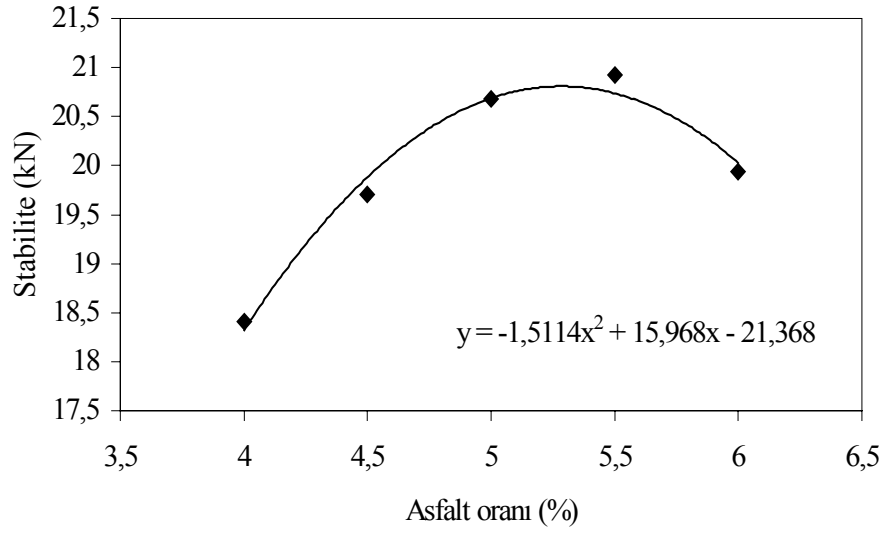
Şekil 5.20. Asfalt oranı – Boşluk yüzdesi ilişkisi.



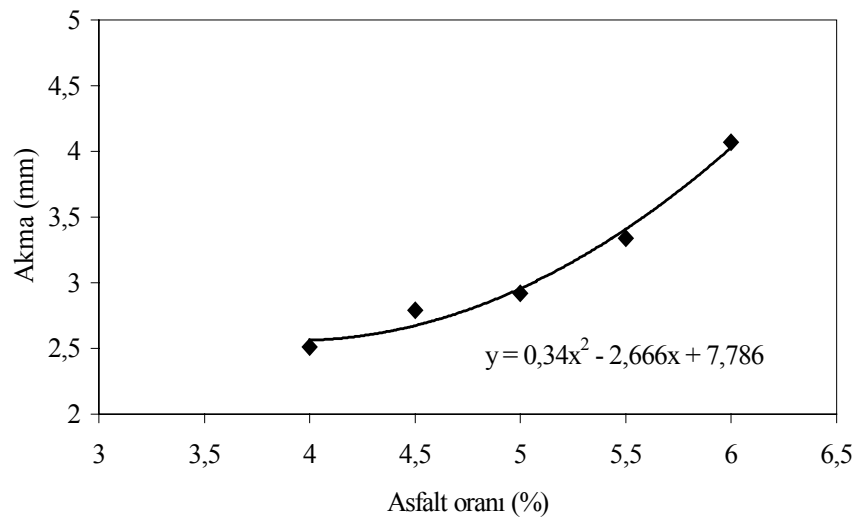
Şekil 5.21. Asfalt oranı – Asfaltla dolu boşluk yüzdesi ilişkisi.



Şekil 5.22. Asfalt oranı – Agregalar arasındaki boşluk yüzdesi ilişkisi.



Şekil 5.23. Asfalt oranı – Stabilité ilişkisi.



Şekil 5.24. Asfalt oranı – Akma ilişkisi.

Optimum asfalt içeriğinin bulunması için,

Pratik özgül ağırlık, stabilite, akma, boşluk oranı, asfalt ile dolu boşluk oranı grafikleri çizilerek, yoğunluk ve stabilite eğrilerinin en büyük değerlerine karşı gelen asfalt yüzdeleri, boşluk oranı, asfaltla dolu boşluk oranı için şartnamede öngörülen değerlerin ortalamasına karşı gelen asfalt yüzdeleri tespit edilmiştir. Bunun için % 4 boşluk oranına ve % 80 asfaltla dolu boşluk oranına karşılık gelen asfalt içerikleri tespit edilmiştir. Optimum asfalt içeriği bu dört değer aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Buna göre,

Stabilitenin maksimum olduğu asfalt yüzdesi = 5,28

Pratik birim ağırlığın maksimum olduğu asfalt yüzdesi = 5,56

% 80 asfaltla dolu boşluk oranı için asfalt yüzdesi = 5,87

% 4 hava boşluğu için asfalt yüzdesi = 5,27

Optimum asfalt yüzdesi = $(5,28 + 5,56 + 5,87 + 5,27) / 4 = 5,49$

% 5,49 optimum asfalt yüzdesindeki numunelerin akma değerlerinin şartname limitleri olan 2-4 mm arasında olduğu Şekil 5.24’de görülmektedir.

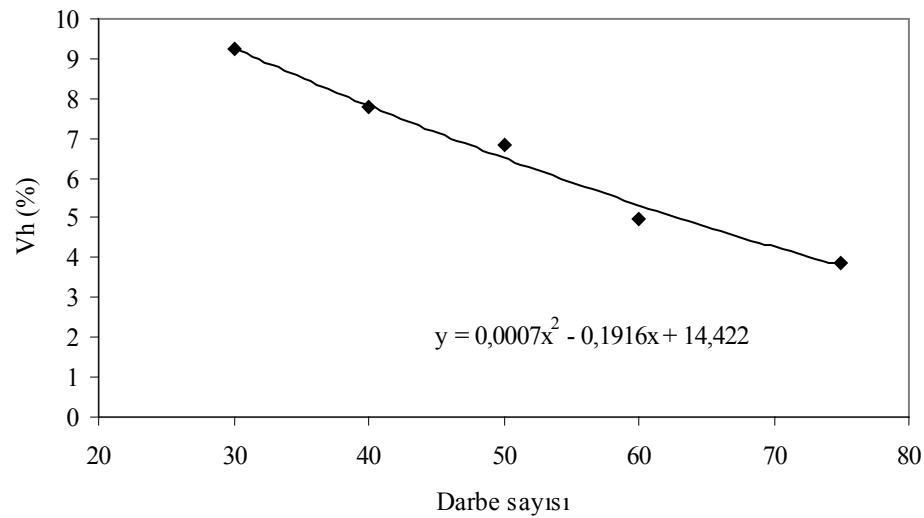
5.2.5. Nem Hassasiyeti Deneyi İçin %7 Boşluk Oranındaki Karışımın Bulunması

Nem hassasiyeti deneyinde suyun bitümlü sıcak karışıma etkisinin daha iyi incelenebilmesi için şartnameler numunelerin %6-8 boşluk oranında test edilmesini öngörmektedir [75,76]. Bu çalışmada optimum bağlayıcı oranında hazırlanmış numunelere farklı sıkıştırma enerjisi uygulanarak boşluk oranı değişimi incelenmiştir. Bu amaçla AC 75-100 asfalt çimentosu kullanılarak optimum bağlayıcı oranındaki karışımlar, her iki yüzüne 30, 40, 50, 60 ve 75 darbe uygulanarak numuneler hazırlanmıştır. Her bir darbe sayısı için üçer numunenin boşluk oranları incelenmiştir. Tablo 5.8’de farklı darbe sayılarında sıkıştırılmış numunelerin fiziksel özellikleri Şekil 5.25’de ise boşluk oranı ve darbe sayısı arasındaki ilişki verilmiştir.

Şekil 5.25’den her iki yüzüne 50 darbe uygulanarak sıkıştırılmış numunelerin yaklaşık olarak %7 boşluk oranını temin ettiği tespit edilmiştir.

Tablo 5.8. Farklı darbe sayısı uygulanarak hazırlanmış numunelerin fiziksel özellikleri.

Darbe sayısı	No	Yükseklik (mm)	W _{kuru} (gr)	W _{doygun} (gr)	W _{suda} (gr)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{ma} (%)	V _f (%)
30	1	67,8	1247,65	1266,56	718,17	2,275	2,503	9,101	20,486	55,575
	2	68,0	1248,70	1268,33	717,53	2,267	2,503	9,422	20,767	54,629
	3	68,0	1250,79	1269,94	719,56	2,273	2,503	9,202	20,574	55,276
	Ort.					2,272	2,503	9,242	20,609	55,160
40	1	67,3	1254,60	1269,50	726,12	2,309	2,503	7,752	19,306	59,848
	2	67,2	1251,35	1267,04	726,68	2,316	2,503	7,476	19,065	60,785
	3	67,5	1249,86	1266,44	725,52	2,311	2,503	7,682	19,245	60,082
	Ort.					2,312	2,503	7,637	19,205	60,238
50	1	66,8	1251,91	1265,18	728,72	2,334	2,503	6,762	18,44	63,330
	2	67,0	1255,27	1269,73	730,85	2,329	2,503	6,932	18,589	62,710
	3	66,5	1254,08	1267,21	729,36	2,332	2,503	6,842	18,51	63,037
	Ort.					2,332	2,503	6,845	18,513	63,025
60	1	65,8	1252,73	1262,42	735,68	2,378	2,503	4,979	16,881	70,503
	2	66,0	1253,41	1263,05	736,10	2,379	2,503	4,966	16,869	70,563
	3	65,7	1250,70	1259,82	733,63	2,377	2,503	5,034	16,929	70,262
	Ort.					2,378	2,503	4,993	16,893	70,443
75	1	64,2	1250,64	1256,42	736,18	2,404	2,503	3,953	15,983	75,269
	2	64,0	1253,14	1260,02	739,23	2,406	2,503	3,862	15,904	75,714
	3	64,5	1257,35	1263,48	741,06	2,407	2,503	3,840	15,884	75,823
	Ort.					2,406	2,503	3,885	15,924	75,602



Şekil 5.25. Darbe sayısı – Boşluk oranı ilişkisi.

5.3.Deney Numunelerinin Hazırlanması

İki aşamalı karıştırma sisteminin etkilerinin incelenebilmesi ve geleneksel yöntemle karşılaştırmalı olarak sunulabilmesi için geleneksel yöntemle kontrol numuneleri ve iki aşamalı karıştırma sistemi ile diğer deney numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 5.26’da hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuş numuneler görülmektedir.



Şekil 5.26. Deney numuneleri.

5.3.1.Kontrol Numuneleri

Kontrol numuneleri dört farklı grupta hazırlanmıştır. Bu gruplar farklı bağlayıcılarla hazırlanan numunelerden oluşmaktadır. Birinci grup AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile hazırlanmış olup “A” ile gösterilmiştir. İkinci grup, AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile hazırlanmış olup “B” ile gösterilmiştir. Üçüncü grup, AC 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile hazırlanmış olup “C” ile gösterilmiştir. Dördüncü grup ise % 5 SBS katkılı AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile hazırlanmış olup “D” ile gösterilmiştir. Bu şekilde karışımlarda kullanılan bağlayıcıların penetrasyonları A’den D’ye doğru düşmektedir.

5.3.2.İki Aşamalı Karıştırma Sistemi ile Numunelerin Hazırlanması

İki aşamalı karıştırma sisteminin birinci aşamasında, 160 C° ye kadar ısıtılan kaba agregaya, yüzeyini en az %90 oranında kaplayacak, optimum bağlayıcı oranının bir kısmı ile karıştırılmaktadır. Daha sonra yüzeyi kaplanmış olan kaba agregaya 1 saat 135-160 C°'lik etüvde bekletilmektedir. İkinci aşamada 160 C° ye kadar ısıtılmış olan ince agregaya ve filler ile etüvden çıkarılan kaba agregaya, optimum bağlayıcı oranının geri kalan kısmı ile karıştırılmaktadır. İki aşamalı karıştırma sistemindeki numuneler iki harf ile gösterilmektedir. “AA” ifadesi her iki aşamada da AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanmış numuneyi temsil etmektedir.

İki aşamalı karıştırma sisteminde kaba agregayı kaplayacak bağlayıcı oranını tespit etmek amacıyla ilk olarak ampirik bağıntılar kullanılarak bağlayıcı oranı tespit edilmiştir. Bitümlü karışımların optimum bitüm muhtevasının hesaplanmasında en çok kullanılan ampirik bağıntı Alrich ve Anderson tarafından belirlenen Formül 5.1 ve 5.2'deki bağıntıdır [77].

$$P = \alpha \cdot K \cdot \sqrt[5]{S} \quad (5.1)$$

$$S = 0,25G + 2,3C + 12 F + 135f \quad (5.2)$$

Burada P: agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm oranı, α :2,65/ $\delta_{\text{agrega zahiri}}$, K: agregaya zenginlik modülü (3-3,5), S: agregaya yüzey alanı (m²/kg), G: 6,3 mm açıklıklı elek üzerinde kalan agregaya yüzdesi, C: 6,3 mm açıklıklı elekten geçen ve 50 nolu elek üzerinde kalan agregaya yüzdesi, F: 50 nolu elekten geçen 200 nolu elek üzerinde kalan agregaya yüzdesi, f: filler yüzdesidir.

Bu çalışmada kaba agreganın % 25'i 6,3 mm elek üzerinde, % 19'u ise 50 nolu elek üzerinde kalmaktadır. Kaba agregaya zahiri özgül ağırlığı 2,716'dır. Buna göre;

$$S = (0,25 \cdot 25 + 2,3 \cdot 19) / 100 = 0,4995 \text{ m}^2/\text{kg}$$

$$528 \text{ gr olan kaba agreganın yüzey alanı} : 0,4995 \cdot 0,528 = 0,2637 \text{ m}^2$$

$$P = 2,65 / 2,716 \cdot 3 \cdot \sqrt[5]{0,2637} = 2,24$$

$$P = 2,65 / 2,716 \cdot 3,5 \cdot \sqrt[5]{0,2637} = 2,61 \text{ olmaktadır.}$$

Bitümlü karışımların optimum bitüm muhtevasının hesaplanmasında kullanılan bir diğer ampirik bağıntı Formül 5.3'de verilen asfalt enstitüsü bağıntısıdır [78].

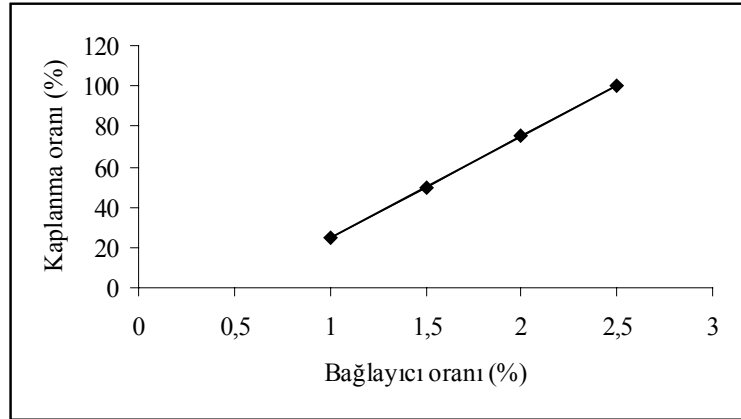
$$P = 0,035.a + 0,04.b + n.c + F \quad (5.3)$$

Burada, P: agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm oranı, a: 2,36 mm elek üzerinde kalan agrega yüzdesi, b: 2,36 mm elekten geçen ve 0,075 mm elek üzerinde kalan agrega yüzdesi, c: 0,075 mm elekten geçen agrega yüzdesi, K: filler içeriğine bağlı olarak değişen 0,15-0,20 arasında bir katsayı, F: 0,7-1 arasında değişen bir katsayıdır. Bu çalışmada kullanılan kaba agrega oranı % 44 olduğundan; Formül 5.3'e göre kaba agregayı kaplayacak bağlayıcı oranı;

$$P = 0,035.44 + 0,7 = 2,24$$

$$P = 0,035.44 + 1 = 2,54 \text{ olmaktadır.}$$

İki aşamalı karıştırma sisteminde kaba agregayı %90'nın üzerinde kaplayacak bağlayıcı miktarının ne kadar olduğunu deneysel olarak tespit etmek amacıyla kaba agrega, ağırlığının %1; %1,5; %2 ve %2,5'i oranlarında bağlayıcı ile karıştırılarak kaba agrega yüzeyinin kaplanma miktarı görsel olarak incelenmiştir. Şekil 5.27'de bağlayıcı oranı kaplanma ilişkisi verilmiştir.



Şekil 5.27. Bağlayıcı oranı – Kapanma oranı ilişkisi.

Görsel inceleme sonucunda kaba agrega ağırlığının %2,5'i kadar bağlayıcı kullanılmasının agrega yüzeyini tam olarak kapladığı ve bu şekilde karışımın, koyulduğu kaptaki az miktarda lekeler bıraktığı, %2,5'den fazla bağlayıcı miktarının agrega yüzeyine yapışmadığı ve kaptaki çok fazla lekeler bıraktığı gözlemlenmiştir. Deneysel olarak tespit edilen, kaba agregayı kaplayacak bağlayıcı miktarı, formül 5.2 ve 5.3'ile belirlenen bağlayıcı oranı ile bağdaşmaktadır. Şekil 5.28'de birinci aşamada yüzeyi kaplanmış olan kaba agrega karışımı görülmektedir.



Şekil 5.28. Birinci aşama sonrası yüzeyi kaplanmış olan kaba agreg.

Toplam 1200 gr olan agreg kombinasyonunun 528 gr'ı kaba 672 gr'ı ince agreg + fillerden oluşmaktadır. Optimum bağlayıcı muhtevasında normal bir numune için gerekli bağlayıcı miktarı $1200 \times 0,0539 = 64,7$ gr'dır. İki aşamalı karıştırma sisteminde kaba agreganın karıştırılmasında (birinci aşama) kullanılan bağlayıcı miktarı, $528 \times 0,025 = 13,2$ gr'dır. Böylece birinci aşamada kaba agreganın karıştırılması için optimum bağlayıcı muhtevasının %20'si kullanılmaktadır ($13,2 / 64,7 = 0,20$). İkinci aşamada ince agreg + fillerin karıştırılmasında optimum bağlayıcı miktarının geri kalan kısmı, ($64,7 - 13,2 = 51,5$ gr) kullanılmıştır. İnce agreg + fillerin karıştırılmasında kullanılan bağlayıcı miktarı ince agreg+filler ağırlığına $51,5 / 672 = 0,0766$ olmakta ve bu miktar optimum bağlayıcı oranının %80'ine tekabül etmektedir.

“AA” numunelerinin hazırlanması: Birinci aşamada 160 °C'deki kaba agreg, 145°C'deki AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile, %5,23 olan optimum bağlayıcı oranının %20'si oranında karıştırılarak 135°C'deki etüvde 1 saat beklemeye bırakılmıştır. İkinci aşamada ince agreg + filler, optimum bağlayıcı oranının %80'i oranında 145°C'deki AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile ilk önce 30 sn karıştırılmış daha sonra etüvde 1 saat bekletilen üzeri asfalt kaplı kaba agreg ilave edilerek 1 dak. daha karıştırılmıştır.

“BB” numunelerinin hazırlanması: Birinci aşamada 160°C'deki kaba agreg, 150°C'deki AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile, %5,39 olan optimum bağlayıcı oranının %20'si oranında karıştırılarak 140°C'deki etüvde 1 saat beklemeye bırakılmıştır. İkinci aşamada ince agreg + filler, optimum bağlayıcı oranının %80'i oranında 150°C'deki AC 75-

100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile ilk önce 30 sn karıştırılmış daha sonra etüvde 1 saat bekletilen üzeri asfalt kaplı kaba agregaya ilave edilerek 1 dak. daha karıştırılmıştır.

“CC” numunelerinin hazırlanması: Birinci aşamada 160°C’deki kaba agregaya, 155°C’deki AC 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile, %5,45 olan optimum bağlayıcı oranının %20’si oranında karıştırılarak 145°C’deki etüvde 1 saat beklemeye bırakılmıştır. İkinci aşamada ince agregaya + filler, optimum bağlayıcı oranının %80’i oranında 155°C’deki AC 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile ilk önce 30 sn karıştırılmış daha sonra etüvde 1 saat bekletilen üzeri asfalt kaplı kaba agregaya ilave edilerek 1 dak. daha karıştırılmıştır.

“DD” numunelerinin hazırlanması: Birinci aşamada 160°C’deki kaba agregaya, 170°C’deki %5 SBS modifiyeli AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile, %5,49 olan optimum bağlayıcı oranının %20’si oranında karıştırılarak 160°C’deki etüvde 1 saat beklemeye bırakılmıştır. İkinci aşamada ince agregaya + filler, optimum bağlayıcı oranının %80’i oranında 170°C’deki %5 SBS katkılı AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile ilk önce 30 sn karıştırılmış daha sonra etüvde 1 saat bekletilen üzeri asfalt kaplı kaba agregaya ilave edilerek 1 dak. daha karıştırılmıştır.

Tablo 5.9’da iki aşamalı karıştırma sisteminin birinci ve ikinci aşamasındaki asfalt sıcaklıkları ve birinci aşamadaki kür sıcaklıkları verilmiştir. Birinci aşamadaki kür sıcaklıkları, ikinci aşamadaki asfaltın kaba agregaya yüzeyindeki asfaltı iterek yerine geçmemesi için ikinci aşamadaki sıcaklıklara göre 10 °C daha düşük tutulmuştur.

Tablo 5.9. Karıştırma işleminde ve kür sırasındaki asfalt sıcaklıkları.

Numune tipi	I.Aşama			II.Aşama	
	Kullanılan asfalt cinsi	Asfalt sıcaklığı (°C)	Kür sıcaklığı (°C)	Kullanılan asfalt cinsi	Asfalt sıcaklığı (°C)
AA	AC 100-150	145	135	AC 100-150	145
BB	AC 75-100	150	140	AC 75-100	150
CC	AC 60-70	155	145	AC 60-70	155
DD	%5 SBS katkılı AC 75-100	170	160	%5 SBS katkılı AC 75-100	170

5.4. Marshall Stabilite Deneyi ve Sonuçları

Marshall stabilite ve akma deneyi için 12 tanesi kontrol numunesi (A,B,C,D), 12 tanesi de iki aşamada karıştırılarak hazırlanan numuneler (AA,BB,CC,DD) olmak üzere toplam 24 numune optimum bitüm yüzdesinde her iki yüzüne 75 darbe uygulanarak hazırlanmıştır. Her bir numune tipi için üçer numune test edilmiştir. Deneye başlamadan önce bütün numunelerin

havadaki, sudaki ve doymun ağırlıkları tespit edilip fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bu fiziksel özellikler Tablo 5.10'da verilmiştir. Deneye tabi tutulacak numunelerin Tablo 5.10'dan boşluk oranlarının, %3-5 olan şartname sınırlarının yaklaşık ortasında olduğu, asfaltla dolu boşluk oranlarının ise şartname alt sınırı olan %75 civarında olduğu görülmektedir. Fiziksel özellikleri tespit edilen 24 numune şartnamelere uygun olarak ilk önce 30 dakika 60 °C'deki su banyosunda bekletilip Marshall deney cihazında (Şekil 5.29) 50 mm/dak. hızda kırılmış, Marshall stabilite ve akma değerleri kaydedilmiştir. Tablo 5.11'de Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları verilmiştir.

Şekil 5.30'da kontrol numunelerinin ve iki aşamada hazırlanan numunelerin Marshall stabilite değerleri, Şekil 5.31'de ise stabilite/akma oranları grafiksel olarak verilmiştir.



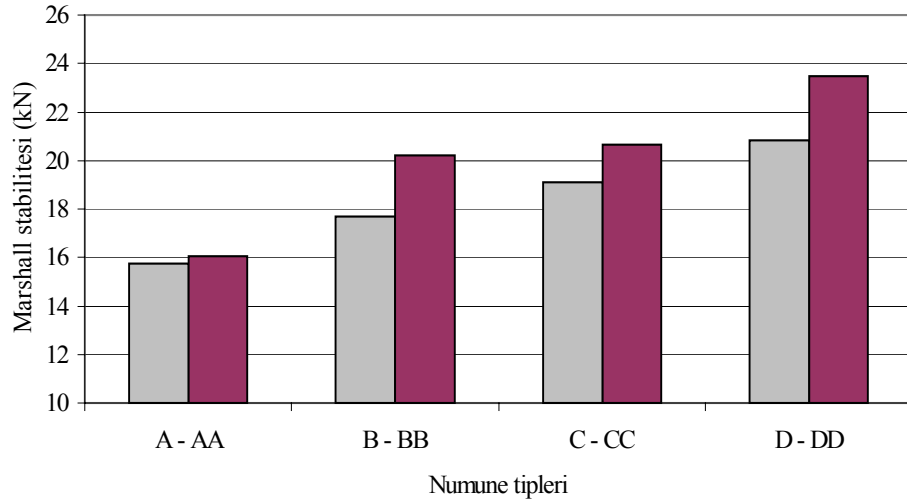
Şekil 5.29. Marshall deney cihazı.

Tablo 5.10. Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulan numunelerin fiziksel özellikleri.

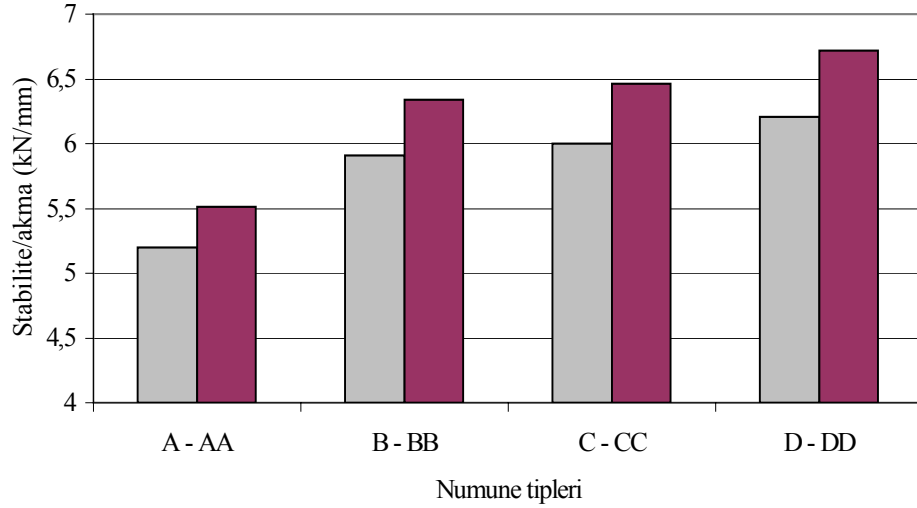
Numune	No	Yükseklik (mm)	W _{kuru} (gr)	W _{doygun} (gr)	W _{suda} (gr)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{ma} (%)	V _f (%)
A	1	64,0	1246,84	1253,43	736,22	2,411	2,506	3,815	15,619	75,575
	2	64,2	1243,29	1249,22	733,91	2,413	2,506	3,735	15,549	75,979
	3	64,0	1247,31	1255,62	739,13	2,415	2,506	3,645	15,47	76,441
	Ort.					2,413	2,506	3,732	15,546	75,998
B	1	64,0	1251,37	1256,01	737,30	2,412	2,503	3,613	15,686	76,965
	2	64,2	1254,73	1259,24	738,24	2,408	2,503	3,779	15,831	76,128
	3	64,2	1253,86	1260,46	739,65	2,408	2,503	3,811	15,859	75,970
	Ort.					2,409	2,503	3,734	15,792	76,354
C	1	63,8	1247,75	1255,30	737,85	2,411	2,504	3,685	15,773	76,637
	2	64,0	1249,35	1256,21	738,13	2,412	2,504	3,679	15,767	76,669
	3	63,9	1247,88	1253,86	736,11	2,410	2,504	3,731	15,813	76,407
	Ort.					2,411	2,504	3,698	15,784	76,571
D	1	64,5	1257,64	1262,03	740,68	2,412	2,504	3,678	15,772	76,682
	2	64,3	1258,28	1263,04	741,13	2,411	2,504	3,732	15,82	76,409
	3	64,0	1253,47	1260,47	740,82	2,412	2,504	3,683	15,777	76,656
	Ort.					2,412	2,504	3,698	15,79	76,582
AA	1	63,8	1246,13	1252,25	736,45	2,416	2,506	3,607	15,437	76,634
	2	63,8	1243,25	1250,39	735,22	2,413	2,506	3,712	15,529	76,096
	3	64,0	1247,38	1253,42	737,13	2,416	2,506	3,602	15,432	76,661
	Ort.					2,415	2,506	3,640	15,466	76,464
BB	1	64,2	1249,56	1255,43	737,23	2,411	2,503	3,658	15,725	76,738
	2	64,0	1248,39	1253,81	735,37	2,408	2,503	3,793	15,843	76,061
	3	64,3	1253,28	1258,49	739,04	2,413	2,503	3,604	15,677	77,014
	Ort.					2,411	2,503	3,685	15,748	76,604
CC	1	63,9	1249,55	1254,86	737,12	2,413	2,504	3,600	15,699	77,068
	2	64,1	1251,26	1256,35	737,52	2,412	2,504	3,671	15,761	76,708
	3	64,2	1249,63	1253,44	735,64	2,413	2,504	3,605	15,703	77,042
	Ort.					2,413	2,504	3,625	15,721	76,939
DD	1	64,5	1255,56	1260,04	739,44	2,412	2,504	3,698	15,79	76,578
	2	64,1	1251,49	1256,35	737,26	2,411	2,504	3,731	15,819	76,412
	3	64,3	1253,02	1258,23	739,21	2,414	2,504	3,601	15,705	77,073
	Ort.					2,412	2,504	3,677	15,772	76,687

Tablo 5.11. Numunelerin Marshall stabilite ve akma değerleri.

Numune	No	Yükseklik (mm)	Marshall Stabilitesi (kN)	Akma (mm)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kN)	Stb/Akma
A	1	64,0	15,9	3,03	0,988	15,71	5,18
	2	64,2	16,2	3,09	0,982	15,91	5,15
	3	64,0	15,8	2,96	0,988	15,61	5,27
	Ort.					15,74	5,20
B	1	64,0	17,7	2,95	0,988	17,49	5,93
	2	64,2	18,0	2,98	0,982	17,68	5,93
	3	64,2	18,2	3,04	0,982	17,87	5,88
	Ort.					17,68	5,91
C	1	63,8	19,0	3,23	0,992	18,85	5,84
	2	64,0	19,4	3,12	0,988	19,17	6,14
	3	63,9	19,5	3,20	0,990	19,31	6,03
	Ort.					19,11	6,00
D	1	64,5	21,5	3,40	0,975	20,96	6,16
	2	64,3	21,1	3,29	0,980	20,68	6,29
	3	64,0	21,1	3,37	0,988	20,85	6,19
	Ort.					20,83	6,21
AA	1	63,8	16,5	3,02	0,992	16,37	5,42
	2	63,8	16,2	2,84	0,992	16,07	5,66
	3	64,0	15,9	2,88	0,988	15,71	5,45
	Ort.					16,05	5,51
BB	1	64,2	20,3	3,10	0,982	19,93	6,43
	2	64,0	20,9	3,27	0,988	20,65	6,31
	3	64,3	20,5	3,20	0,980	20,09	6,28
	Ort.					20,22	6,34
CC	1	63,9	21,0	3,19	0,990	20,79	6,52
	2	64,1	21,3	3,32	0,985	20,98	6,32
	3	64,2	20,6	3,09	0,982	20,23	6,55
	Ort.					20,67	6,46
DD	1	64,5	23,5	3,34	0,975	22,91	6,86
	2	64,1	24,4	3,61	0,985	24,03	6,66
	3	64,3	23,9	3,52	0,980	23,42	6,65
	Ort.					23,46	6,72



Şekil 5.30. Kontrol ve iki aşamalı numunelerde Marshall stabilitesi değişimi.



Şekil 5.31. Kontrol ve iki aşamalı numunelerde stabilite/akma değişimi.

Şekil 5.30 ve 5.31 incelendiğinde tek aşamalı olarak karıştırılan kontrol numunelerinde (A,B,C,D) düşük penetrasyonlu ve yumuşama noktası yüksek asfalt çimentosunun kullanılması ile Marshall stabilite ve rijitliği temsil eden stabilite/akma oranlarının arttığı, % 5 SBS katkılı asfalt çimentosu ile hazırlanmış numunenin (D) en yüksek stabilite ve stabilite/akma değerine sahip olduğu görülmektedir. İki aşamalı karıştırma sistemi ile hazırlanan numunelerin stabilite ve stabilite/akma değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. İki aşamalı karıştırma sistemi AC 100-150 asfalt çimentosunun kullanıldığı numunelerin stabilite değerlerinde önemli bir iyileştirme yapmamış, B,C ve D numunelerinin stabilite değerlerinde sırasıyla %14,3 ; %8,2 ; %12,6 oranlarında artış sağlamıştır. İki aşamalı karıştırma sistemi A,B,C ve D numunelerinin stabilite/akma değerlerinde ise sırasıyla %5,9 ; %7,2 ; %7,6 ; %8,2 oranlarında artış sağlamıştır. İki aşamalı karıştırma sisteminin Marshall stabilitesi değerlerine göre en fazla iyileştirmeyi, B numunelerinde, stabilite/akma değerlerine göre ise D numunelerinde yaptığı tespit edilmiştir.

5.5. İndirek Çekme Mukavemeti, Nem Hassasiyeti Deneyleri ve Sonuçları

İki aşamalı karıştırma sisteminin etkilerini araştırmak amacıyla ikinci olarak indirek çekme mukavemeti ve nem hassasiyeti deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler için Şekil 5.32’de görülen deney düzeneği kullanılmıştır.

Nem hassasiyeti deneyi için 8 farklı numune tipinden üçer adet iki grup olmak üzere toplam 48 numune hazırlanmıştır. Numuneler standartların öngördüğü %6-8 boşluk oranının ortalaması olan %7 boşluk oranını teşkil etmek amacıyla optimum bağlayıcı oranında her iki yüzüne 50’şer darbe uygulanarak hazırlanmıştır. Numuneler deneye tabi tutulmadan önce havadaki kuru, doygun ve sudaki ağırlıkları tespit edilerek fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Kuru olarak test edilecek ve koşullandırılarak test edilecek numunelerin fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 5.12 ve 5.13’de verilmiştir.



Şekil 5.32. İndirek çekme mukavemeti deney düzeneği.

Tablo 5.12. İndirek çekme mukavemeti deneyi için hazırlanan kuru numunelerin fiziksel özellikleri.

Numune	No	Yükseklik (mm)	W _{kuru} (gr)	W _{doygun} (gr)	W _{suda} (gr)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{ma} (%)	V _f (%)
A	1	66,3	1240,75	1253,66	722,34	2,335	2,506	6,827	18,261	62,617
	2	66,5	1246,38	1258,74	725,61	2,338	2,506	6,722	18,169	63,006
	3	66,7	1241,23	1254,43	723,77	2,339	2,506	6,675	18,128	63,181
	Ort.					2,337	2,506	6,741	18,186	62,934
B	1	66,5	1244,20	1251,45	719,03	2,337	2,503	6,633	18,328	63,807
	2	66,5	1243,60	1255,22	721,55	2,330	2,503	6,897	18,558	62,837
	3	66,8	1242,71	1254,67	721,47	2,331	2,503	6,881	18,545	62,893
	Ort.					2,333	2,503	6,804	18,477	63,179
C	1	66,7	1249,56	1259,33	723,45	2,332	2,504	6,863	18,552	63,008
	2	66,8	1250,24	1261,67	725,02	2,330	2,504	6,946	18,624	62,707
	3	66,7	1253,25	1263,89	727,66	2,337	2,504	6,648	18,364	63,797
	Ort.					2,333	2,504	6,819	18,513	63,171
D	1	66,4	1256,34	1265,20	727,29	2,336	2,504	6,740	18,450	63,471
	2	66,7	1257,21	1267,31	728,34	2,333	2,504	6,859	18,554	63,034
	3	66,5	1252,75	1262,28	726,33	2,337	2,504	6,666	18,385	63,743
	Ort.					2,335	2,504	6,755	18,463	63,416
AA	1	66,7	1248,15	1259,68	726,18	2,340	2,506	6,654	18,110	63,258
	2	66,6	1248,64	1260,44	727,11	2,341	2,506	6,587	18,052	63,507
	3	66,6	1246,78	1260,73	726,53	2,334	2,506	6,879	18,307	62,426
	Ort.					2,338	2,506	6,707	18,156	63,064
BB	1	66,8	1251,25	1261,30	725,01	2,333	2,503	6,782	18,457	63,257
	2	66,8	1249,49	1259,88	724,21	2,333	2,503	6,805	18,478	63,172
	3	66,5	1252,36	1262,09	726,34	2,338	2,503	6,605	18,303	63,913
	Ort.					2,334	2,503	6,731	18,413	63,447
CC	1	67,2	1254,28	1264,37	726,85	2,333	2,504	6,796	18,493	63,252
	2	67,0	1250,05	1261,29	725,33	2,332	2,504	6,840	18,532	63,091
	3	66,8	1251,26	1262,99	725,81	2,329	2,504	6,962	18,638	62,649
	Ort.					2,332	2,504	6,866	18,555	62,997
DD	1	67,0	1256,97	1266,89	728,10	2,333	2,504	6,845	18,542	63,083
	2	66,9	1253,41	1264,03	727,23	2,335	2,504	6,765	18,472	63,378
	3	67,0	1255,66	1265,00	727,45	2,336	2,504	6,728	18,439	63,515
	Ort.					2,335	2,504	6,779	18,484	63,325

Tablo 5.13. İndirek çekme mukavemeti deneyi için hazırlanan koşullandırılacak numunelerin fiziksel özellikleri.

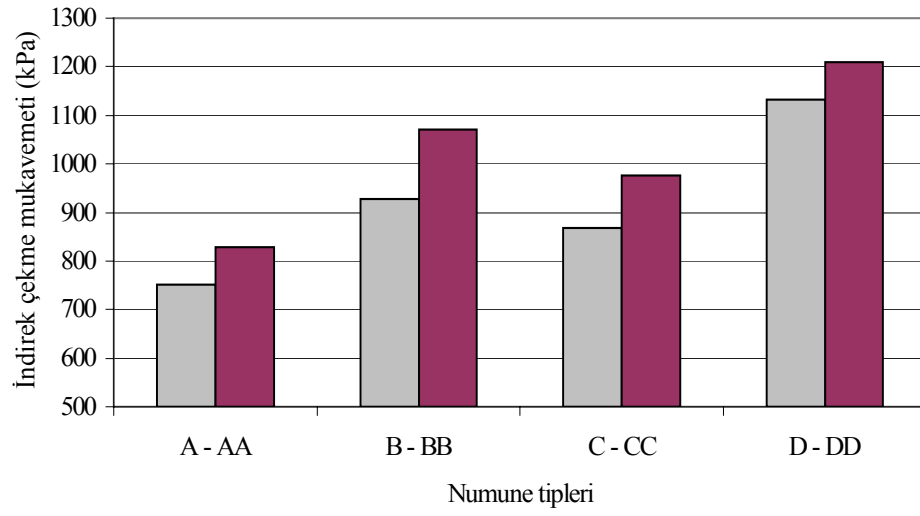
Numune	No	Yükseklik (mm)	W _{kuru} (gr)	W _{doygun} (gr)	W _{suda} (gr)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{ma} (%)	V _f (%)
A	1	66,5	1241,22	1254,48	721,21	2,328	2,506	7,132	18,529	61,509
	2	66,6	1245,84	1257,76	725,83	2,342	2,506	6,552	18,02	63,643
	3	66,7	1240,29	1253,81	722,15	2,333	2,506	6,921	18,344	62,272
	Ort.					2,334	2,506	6,868	18,298	62,475
B	1	66,8	1246,34	1257,33	721,38	2,325	2,503	7,089	18,726	62,145
	2	66,8	1245,75	1257,92	723,07	2,329	2,503	6,942	18,597	62,674
	3	66,6	1244,42	1255,84	722,80	2,335	2,503	6,725	18,408	63,465
	Ort.					2,330	2,503	6,919	18,577	62,762
C	1	66,5	1253,74	1263,67	725,63	2,330	2,504	6,926	18,607	62,777
	2	66,7	1254,56	1265,78	727,88	2,332	2,504	6,841	18,533	63,087
	3	66,5	1249,71	1260,40	725,61	2,337	2,504	6,662	18,376	63,748
	Ort.					2,333	2,504	6,810	18,505	63,204
D	1	67,0	1249,27	1260,41	725,14	2,334	2,502	6,728	18,509	63,652
	2	66,7	1255,50	1264,84	726,40	2,332	2,502	6,814	18,584	63,333
	3	66,9	1254,80	1266,05	727,82	2,331	2,504	6,880	18,567	62,944
	Ort.					2,332	2,503	6,807	18,553	63,310
AA	1	66,5	1249,65	1261,7	726,41	2,335	2,506	6,854	18,286	62,516
	2	66,4	1250,51	1262,89	728,36	2,339	2,506	6,658	18,113	63,244
	3	66,4	1247,70	1259,33	725,31	2,336	2,506	6,778	18,219	62,795
	Ort.					2,337	2,506	6,763	18,206	62,851
BB	1	66,7	1253,70	1264,26	725,90	2,329	2,503	6,958	18,612	62,613
	2	66,7	1255,43	1266,75	729,01	2,335	2,503	6,723	18,406	63,476
	3	66,9	1250,28	1261,39	725,98	2,335	2,503	6,701	18,387	63,556
	Ort.					2,333	2,503	6,794	18,468	63,215
CC	1	66,8	1256,13	1266,25	727,80	2,333	2,504	6,820	18,514	63,165
	2	66,5	1253,27	1263,21	726,62	2,336	2,504	6,710	18,418	63,570
	3	67,1	1258,20	1267,7	728,32	2,333	2,504	6,827	18,521	63,138
	Ort.					2,334	2,504	6,785	18,484	63,291
DD	1	66,9	1255,90	1265,22	727,82	2,337	2,502	6,604	18,401	64,109
	2	67,2	1257,37	1265,46	726,11	2,331	2,502	6,833	18,601	63,265
	3	67,4	1258,09	1267,25	728,10	2,333	2,504	6,796	18,493	63,254
	Ort.					2,334	2,503	6,744	18,498	63,543

Numunelerin fiziksel özellikleri tespit edildikten sonra tamamı standartlara [75,76] uygun olarak 60 °C'lik etüvde 18 saat bekletilmiştir. Bu süre sonunda kuru numuneler 25 °C'lik su banyosunda 1 saat daha bekletilerek Marshall deney cihazında eksenel yüklemeye tabi tutulup kırılmaya neden olan maksimum yük tespit edilmiş ve indirek çekme mukavemetleri hesaplanmıştır. Koşullandırılmış numuneler ise 8 saat 25 °C'deki su banyosunda bekletilerek % 80 doygun hale getirilmiş daha sonra 60 °C'lik su banyosunda 24 saat bekletilmiştir. Su banyosundan çıkartılan numuneler kuru numunelerde olduğu gibi deneye tabi tutulmadan önce tekrar 25 °C'lik su banyosunda 1 saat daha bekletilmiştir. Koşullandırılmış numuneler de bu şekilde kür şartlarına tabi tutulduktan sonra Marshall deney cihazında eksenel yüklemeye tabi tutularak kırılmaya neden olan maksimum yük tespit edilip indirek çekme mukavemetleri hesaplanmıştır. Koşullandırılmış yaş numunelerin indirek çekme mukavemetleri kuru numunelerin indirek çekme mukavemetlerine bölünerek, nem hassasiyetinin bir ölçüsü olan indirek çekme mukavemeti oranları (TSR) tespit edilmiş ve Tablo 5.14'de verilmiştir.

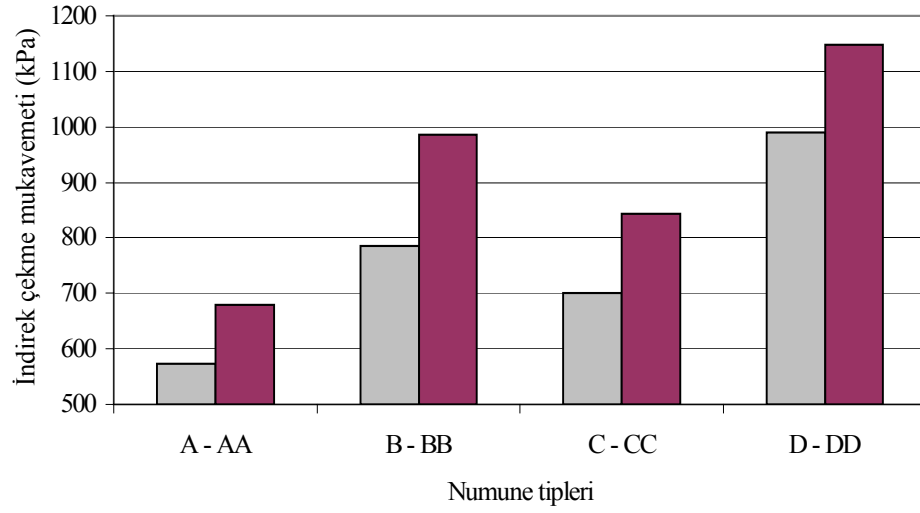
Şekil 5.33'de kuru Şekil 5.34'de koşullandırılmış numunelerin indirek çekme mukavemetleri, Şekil 5.35'de ise koşullandırılmış numunelerin indirek çekme mukavemetlerinin kuru numunelerin indirek çekme mukavemetlerine oranları (TSR) verilmiştir.

Tablo 5.14. Koşullandırılmış ve kuru numunelerin indirek çekme mukavemeti ve oranları.

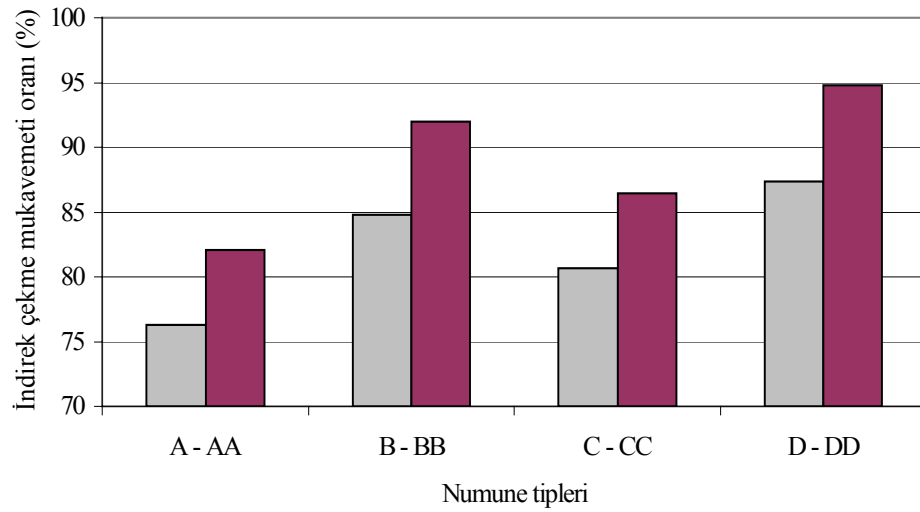
Numune	No	Koşullandırılmış numuneler			Kuru numuneler			İnd.çek. mkv. oranı (TSR) (%)
		Yükseklik (mm)	F (kN)	σ (kPa)	Yükseklik (mm)	F (kN)	σ (kPa)	
A	1	66,5	6,04	569,12	66,3	8,18	773,08	76,28
	2	66,6	6,33	595,55	66,5	7,76	731,18	
	3	66,7	5,89	553,32	66,7	7,96	747,78	
	Ort.			572,66			750,68	
B	1	66,8	8,31	779,49	66,5	9,49	894,19	84,81
	2	66,8	8,65	811,38	66,5	9,87	930,00	
	3	66,6	8,16	767,72	66,8	10,2	956,77	
	Ort.			786,20			926,99	
C	1	66,5	7,25	683,13	66,7	9,08	852,99	80,67
	2	66,7	7,66	719,60	66,8	9,45	886,42	
	3	66,5	7,43	700,09	66,7	9,23	867,08	
	Ort.			700,94			868,83	
D	1	67,0	10,2	953,92	66,4	11,8	1113,52	87,37
	2	66,7	10,6	995,78	66,7	12,0	1127,30	
	3	66,9	10,9	1020,91	66,5	12,3	1158,96	
	Ort.			990,20			1133,26	
AA	1	66,5	6,96	655,80	66,7	8,98	843,60	82,03
	2	66,4	7,41	699,25	66,6	8,67	815,70	
	3	66,4	7,23	682,27	66,6	8,76	824,17	
	Ort.			679,11			827,82	
BB	1	66,7	10,2	958,21	66,8	11,1	1041,19	92,01
	2	66,7	10,7	1005,18	66,8	11,6	1088,10	
	3	66,9	10,6	992,81	66,5	11,5	1083,58	
	Ort.			985,40			1070,96	
CC	1	66,8	9,20	862,97	67,2	10,6	988,38	86,46
	2	66,5	9,02	849,90	67,0	10,4	972,62	
	3	67,1	8,76	818,03	66,8	10,3	966,15	
	Ort.			843,63			975,72	
DD		66,9	12,6	1180,13	67,0	13,1	1225,13	94,78
		67,2	12,0	1118,92	66,9	12,6	1180,12	
		67,4	12,3	1143,49	66,9	13,1	1226,96	
				1147,51			1210,73	



Şekil 5.33. Kontrol ve iki aşamalı kuru numunelerde indirek çekme mukavemeti değişimi.



Şekil 5.34. Kontrol ve iki aşamalı koşullandırılmış numunelerde indirek çekme mukavemeti değişimi.



Şekil 5.35. Kontrol ve iki aşamalı numunelerde indirek çekme mukavemeti oranı değişimi.

Şekil 5.33, 5.34 ve 5.35 incelendiğinde kontrol numuneleri A,B, D ve iki aşamalı olarak karıştırılan AA, BB, DD numunelerinde düşük penetrasyonlu ve yumuşama noktası yüksek asfalt çimentosunun kullanılması ile koşullandırılmış ve koşullandırılmamış durumlar için indirek çekme mukavemetleri ve oranlarının arttığı, 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentosunun kullanıldığı “C” numunesinin bu artışa uymadığı görülmektedir. Karışımındaki bağlayıcının kohezyon özellikleri ile yakından ilişkili olan bu deney yönteminde “C” numunelerinin indirek çekme mukavemeti ve indirek çekme mukavemeti oranlarının “B” numunelerinden düşük olması, 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentosunun, 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosundan daha düşük duktilite dolayısıyla düşük kohezyona sahip olması olarak düşünülmektedir. %5 SBS katkılı asfalt çimentosunun duktilite değerinin düşük olmasına rağmen bu bağlayıcı ile hazırlanmış numunenin indirek çekme mukavemeti ve oranlarının diğer kontrol numunelerinden daha yüksek olması, bu bağlayıcının adezyon yeteneğinin iyi olması ve kohezyon yeteneğinin önüne geçmesi olarak düşünülmektedir.

Kuru olarak test edilen numunelerin indirek çekme mukavemetleri incelendiğinde (Şekil 5.33) iki aşamalı karıştırma sisteminin A,B,C ve D numunelerinin indirek çekme mukavemetlerinde sırasıyla %10,2 ; %15,5 ; 12,3 ; %6,8 oranlarında artış sağladığı tespit edilmiştir.

Koşullandırılmış olarak test edilen numunelerin indirek çekme mukavemetleri incelendiğinde (Şekil 5.34) iki aşamalı karıştırma sisteminin A,B,C ve D numunelerinin indirek çekme mukavemetlerinde sırasıyla %18,5 ; %25,3 ; %20,3 ; %15,8 oranlarında artış sağladığı tespit edilmiştir. İki aşamalı olarak hazırlanan koşullandırılmış numunelerin indirek çekme mukavemetlerinin koşullandırılmış kontrol numunelerinden önemli derecede yüksek olması iki aşamalı karıştırma sisteminin suya karşı direnci yüksek bir karışım sunduğunu göstermektedir.

Numunelerin indirek çekme mukavemeti oranları incelendiğinde (Şekil 5.35) iki aşamalı karıştırma sisteminin A,B,C ve D numunelerinin TSR değerlerinde sırası ile %7,5 ; 8,5 ; %7,2 ; %8,5 oranlarında iyileştirme yaptığı görülmektedir.

5.6.Esneklik Modülü, Sünme Rijitliği Deneyleri ve Sonuçları

İki aşamalı karıştırma sisteminin etkilerinin araştırılması amacıyla üçüncü olarak esneklik modülü dördüncü olarak ise sünme rijitliği deneyleri Şekil 5.36’da görülen UMATTA deney cihazı ile yapılmıştır. Esneklik modülü deneyi tahribatsız bir deney olduğu için bu deneyde kullanılan numuneler sünme rijitliği deneyi için de kullanılmıştır. Bu deneyler için 8 farklı numune tipinden üçer adet olmak üzere toplam 24 numune, optimum bitüm muhtevasında her iki yüzüne 75 darbe uygulanarak hazırlanmıştır. Kalıplardan çıkartılan numunelerin

havadaki kuru, doymun ve sudaki ağırlıkları ölçölerek fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Tablo 5.15’de deneye tabi tutulacak numunelerin hesaplanan fiziksel özellikleri verilmiştir.



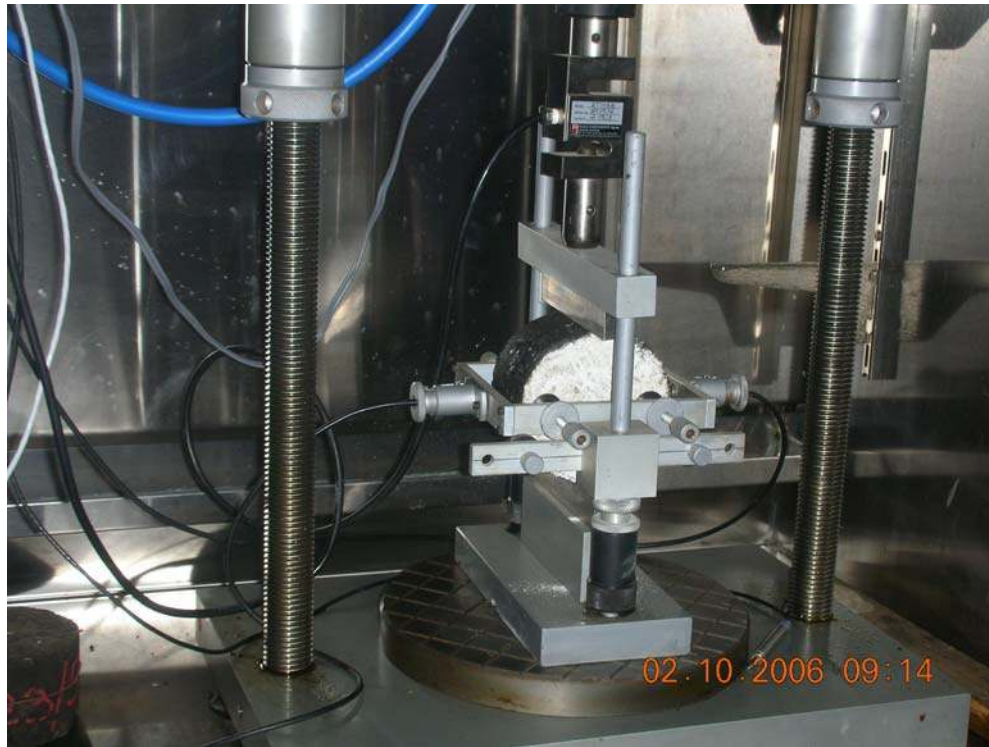
Şekil 5.36. UMATTA deney cihazı.

Tablo 5.15. Esneklik modülü ve sünme rijitliği deneyi için hazırlanan numunelerin fiziksel özellikleri.

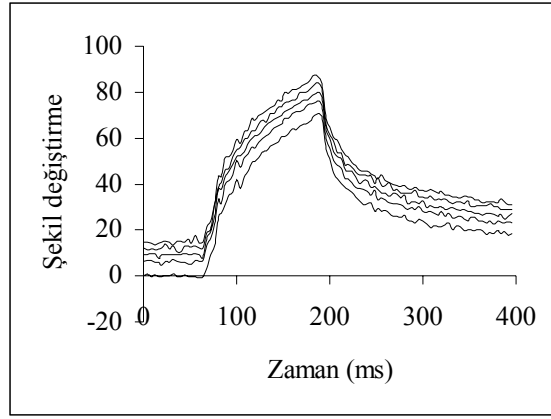
Numune	No	Yükseklik (mm)	W _{kuru} (gr)	W _{doygun} (gr)	W _{suda} (gr)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{ma} (%)	V _f (%)
A	1	64,5	1244,58	1252,14	736,92	2,416	2,506	3,618	15,447	76,574
	2	64,3	1247,75	1255,42	738,22	2,413	2,506	3,743	15,556	75,939
	3	64,0	1250,30	1256,38	738,03	2,412	2,506	3,760	15,571	75,852
	Ort.					2,413	2,506	3,707	15,525	76,122
B	1	64,4	1249,40	1255,28	736,98	2,411	2,503	3,689	15,752	76,582
	2	63,9	1250,71	1257,32	738,79	2,412	2,503	3,631	15,701	76,877
	3	64,1	1247,38	1253,94	736,20	2,409	2,503	3,740	15,797	76,322
	Ort.					2,411	2,503	3,687	15,750	76,593
C	1	64,2	1251,54	1257,45	738,83	2,413	2,504	3,610	15,708	77,015
	2	64,3	1251,26	1258,63	739,84	2,412	2,504	3,664	15,754	76,746
	3	64,0	1249,38	1255,39	737,14	2,411	2,504	3,708	15,793	76,521
	Ort.					2,412	2,504	3,661	15,752	76,761
D	1	64,2	1251,29	1257,30	738,50	2,412	2,504	3,693	15,786	76,605
	2	63,9	1250,28	1256,73	738,11	2,411	2,504	3,737	15,824	76,382
	3	63,9	1253,90	1259,82	739,95	2,412	2,504	3,691	15,784	76,617
	Ort.					2,412	2,504	3,707	15,798	76,535
AA	1	64,3	1247,35	1255,26	738,96	2,416	2,506	3,606	15,436	76,639
	2	64,8	1250,27	1258,40	740,67	2,415	2,506	3,647	15,472	76,427
	3	64,2	1249,70	1257,10	739,20	2,413	2,506	3,723	15,538	76,042
	Ort.					2,415	2,506	3,659	15,482	76,369
BB	1	63,8	1250,53	1256,81	738,20	2,411	2,503	3,659	15,726	76,731
	2	63,9	1253,37	1259,90	740,53	2,413	2,503	3,582	15,658	77,125
	3	64,0	1251,49	1258,03	738,91	2,411	2,503	3,680	15,744	76,626
	Ort.					2,412	2,503	3,640	15,710	76,827
CC	1	64,2	1254,37	1260,76	741,08	2,414	2,504	3,589	15,689	77,122
	2	64,5	1251,62	1258,12	739,04	2,411	2,504	3,690	15,777	76,614
	3	64,2	1252,86	1259,11	740,21	2,414	2,504	3,561	15,664	77,268
	Ort.					2,413	2,504	3,613	15,710	77,001
DD	1	64,0	1252,30	1258,41	739,60	2,414	2,504	3,617	15,719	76,989
	2	64,3	1251,65	1256,93	738,32	2,413	2,504	3,630	15,731	76,924
	3	64,0	1255,25	1261,50	740,66	2,410	2,504	3,767	15,850	76,236
	Ort.					2,412	2,504	3,671	15,767	76,716

5.6.1. Esneklik Modülü Deneyi ve Sonuçları

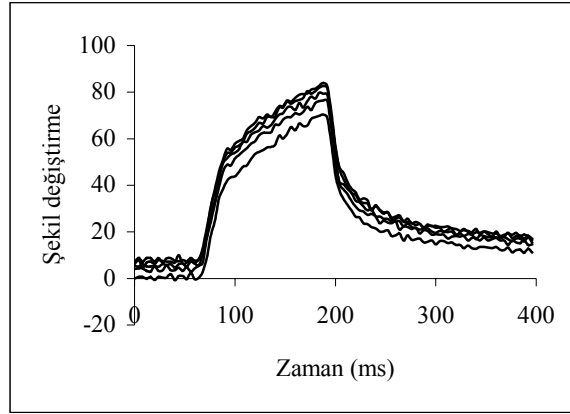
Fiziksel özelliklerinin standartlara uygun olduğu numuneler ilk önce esneklik modülü deneyine tabi tutulmuşlardır. Şekil 5.37’de esneklik modülü deney düzeneği verilmiştir. Deney 25°C’de deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. Maksimum deformasyon 7 μ , yükleme periyodu 3 sn, yükün yükselme zamanı (rise time) 0,124 sn olarak alınmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 2 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçecek sensörler (LVDT) ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı ve poisson oranı (0,35) bilgisayara girilmiş, kabin içinde, referans numunesinin içinde ve yanında bulunan sıcaklık ölçen sensörlerin aynı değeri göstermesinden sonra deneye başlanmıştır. Yükleme başlığı pünomatik olarak çalışan cihaz, ilk önce numunede 7 μ deformasyon oluşturacak yük değerini ayarlamak için 5 adet deneme yüklemesi yapmaktadır. Deneme yüklemesinden sonra gerekli olan yükü ayarlayan cihaz, gerçek yüklemeleri yapmakta ve her darbede 7 μ deformasyon oluşması için gerekli yük değerini kaydetmektedir. Sonuçta 5 yüklemenin ortalama değerini ve standart sapmalarını vermektedir. Deneylerde standart sapması %10’dan fazla olan numuneler iptal edilmiştir. Şekil 5.38 – 5.40’da örnek olarak AA, BB, CC numunelerinin 0-400 ms arası için birim şekil değiştirme- zaman ilişkileri verilmiştir. Tablo 5.16’da numunelerin bilgisayar tarafından hesaplanan esneklik modülü değerleri verilmiştir.



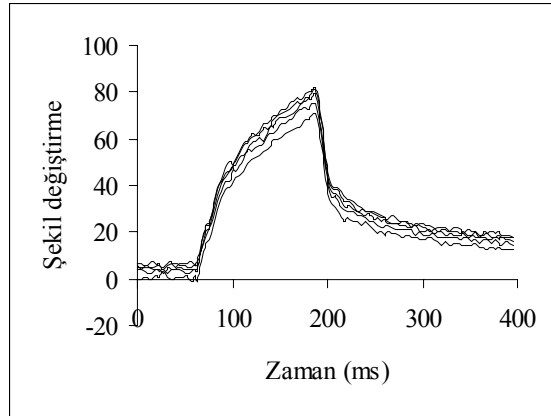
Şekil 5.37. Esneklik modülü deneyi aleti.



Şekil 5.38. AA numuneleri birim şekil değıştirme – Zaman ilişkisi.



Şekil 5.39. BB numuneleri birim şekil değıştirme – Zaman ilişkisi.

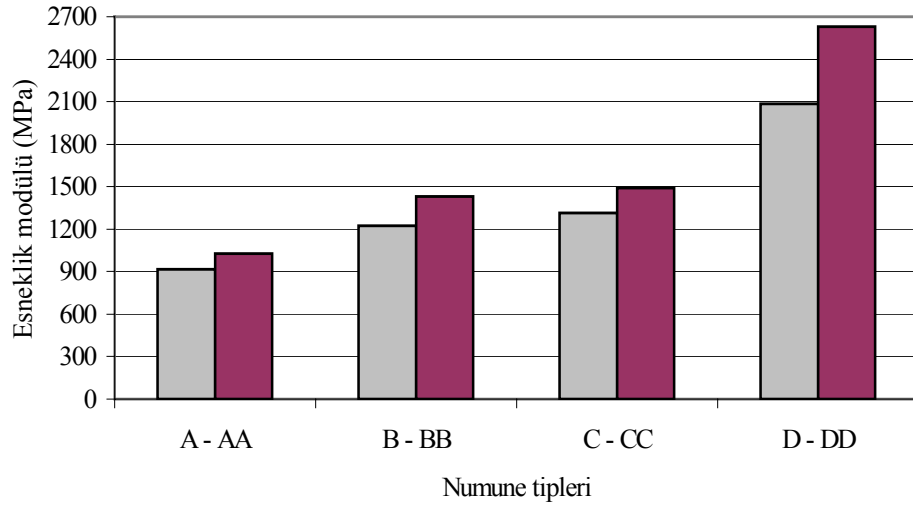


Şekil 5.40. CC numuneleri birim şekil değıştirme – Zaman ilişkisi.

Kontrol numuneleri ve iki aşamada karıştırılarak hazırlanmış olan numunelerin esneklik modülü değeri Şekil 5.41’de, karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.16. Numunelerin esneklik modülü değerleri.

Numune	No	Yükseklik (mm)	Esneklik Modülü (Mpa)
A	1	64,5	956
	2	64,3	887
	3	64,0	912
	Ort.		918
B	1	64,4	1252
	2	63,9	1230
	3	64,1	1192
	Ort.		1224
C	1	64,2	1288
	2	64,3	1297
	3	64,0	1359
	Ort.		1314
D	1	64,2	2135
	2	63,9	2054
	3	63,9	2068
	Ort.		2085
AA	1	64,3	1004
	2	64,8	1025
	3	64,2	1051
	Ort.		1026
BB	1	63,8	1455
	2	63,9	1410
	3	64,0	1432
	Ort.		1432
CC	1	64,2	1525
	2	64,5	1484
	3	64,2	1462
	Ort.		1490
DD	1	64,0	2592
	2	64,3	2633
	3	64,0	2658
	Ort.		2627



Şekil 5.41. Kontrol ve iki aşamalı numunelerde esneklik modülü değişimi.

Şekil 5.41 incelendiğinde tek aşamalı olarak karıştırılan kontrol numunelerinde (A,B,C,D) düşük penetrasyonlu ve yumuşama noktası yüksek asfalt çimentosunun kullanılması ile esneklik modülü değerlerinin arttığı, % 5 SBS katkılı asfalt çimentosu ile hazırlanmış numunenin (D) en yüksek esneklik modülü değerine sahip olduğu görülmektedir. İki aşamalı karıştırma sistemi ile hazırlanan numunelerin esneklik modülü değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. İki aşamalı karıştırma sistemi A,B,C ve D numunelerinin esneklik modülü değerlerinde sırasıyla %11,7 ; %17 ; %13,4 ; %25,9 oranlarında artış sağlamıştır. İki aşamalı karıştırma sistemi ile en fazla rijitlik artışının SBS katkılı asfalt çimentosu ile hazırlanan numunelerde (D), ikinci olarak ise 75-100 asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanan numunelerde (B) olduğu tespit edilmiştir.

5.6.1.1. Farklı Bağlayıcılarla Hazırlanmış İki Aşamalı Numunelerin Esneklik Modülü Deneyi.

Değişik penetrasyonlu asfalt çimentolarının kombinasyonları ile oluşturulmuş iki aşamalı numunelerde asfalt çimentolarının kullanılış sırasına göre bir ilişki bulmak amacıyla 6 farklı kombinasyonda AB, AC, BA, BC, CA, CB numuneleri hazırlanmış ve esneklik modülü deneyi yapılmıştır.

“AB” numunelerinin hazırlanması: Birinci aşamada 160°C’deki kaba agreg, optimum bağlayıcı oranı %5,23 olan 145°C’deki AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %20’si ile karıştırılarak 140 °C’deki etüvde 1 saat bekleme bırakılmıştır. İkinci aşamada ince agreg + filler, optimum bağlayıcı oranı %5,39 olan 150°C’deki AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %80’i ile ilk önce 30 sn karıştırılmış daha sonra etüvde 1 saat bekletilen üzeri asfalt kaplı kaba agreg ilave edilerek 1 dak. daha karıştırılmıştır.

“AC” numunelerinin hazırlanması: Birinci aşamada 160°C’deki kaba agregası, optimum bağlayıcı oranı %5,23 olan 145°C’deki AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %20’si ile karıştırılarak 145 °C’deki etüvde 1 saat beklemeye bırakılmıştır. İkinci aşamada ince agregası + filler, optimum bağlayıcı oranı %5,45 olan 155°C’deki AC 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %80’i ile ilk önce 30 sn karıştırılmış daha sonra etüvde 1 saat bekletilen üzeri asfalt kaplı kaba agregası ilave edilerek 1 dak. daha karıştırılmıştır.

“BA” numunelerinin hazırlanması: Birinci aşamada 160°C’deki kaba agregası, optimum bağlayıcı oranı %5,39 olan 150°C’deki AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %20’si ile karıştırılarak 135 °C’deki etüvde 1 saat beklemeye bırakılmıştır. İkinci aşamada ince agregası + filler, optimum bağlayıcı oranı %5,23 olan 145°C’deki AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %80’i ile ilk önce 30 sn karıştırılmış daha sonra etüvde 1 saat bekletilen üzeri asfalt kaplı kaba agregası ilave edilerek 1 dak. daha karıştırılmıştır.

“BC” numunelerinin hazırlanması: Birinci aşamada 160°C’deki kaba agregası, optimum bağlayıcı oranı %5,39 olan 150°C’deki AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %20’si ile karıştırılarak 145 °C’deki etüvde 1 saat beklemeye bırakılmıştır. İkinci aşamada ince agregası + filler, optimum bağlayıcı oranı %5,45 olan 155°C’deki AC 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %80’i ile ilk önce 30 sn karıştırılmış daha sonra etüvde 1 saat bekletilen üzeri asfalt kaplı kaba agregası ilave edilerek 1 dak. daha karıştırılmıştır.

“CA” numunelerinin hazırlanması: Birinci aşamada 160°C’deki kaba agregası, optimum bağlayıcı oranı %5,45 olan 155°C’deki AC 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %20’si ile karıştırılarak 135 °C’deki etüvde 1 saat beklemeye bırakılmıştır. İkinci aşamada ince agregası + filler, optimum bağlayıcı oranı %5,23 olan 145°C’deki AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %80’i ile ilk önce 30 sn karıştırılmış daha sonra etüvde 1 saat bekletilen üzeri asfalt kaplı kaba agregası ilave edilerek 1 dk daha karıştırılmıştır.

“CB” numunelerinin hazırlanması: Birinci aşamada 160°C’deki kaba agregası, optimum bağlayıcı oranı %5,45 olan 155°C’deki AC 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %20’si ile karıştırılarak 140 °C’deki etüvde 1 saat beklemeye bırakılmıştır. İkinci aşamada ince agregası + filler, optimum bağlayıcı oranı %5,39 olan 150°C’deki AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %80’i ile ilk önce 30 sn karıştırılmış daha sonra etüvde 1 saat bekletilen üzeri asfalt kaplı kaba agregası ilave edilerek 1 dak. daha karıştırılmıştır.

Tablo 5.17’de farklı bağlayıcılarla hazırlanmış iki aşamalı karıştırma sisteminin özeti verilmiştir. Tablo 5.18’de hazırlanan numunelerin fiziksel özellikleri ve esneklik modülü değerleri verilmiştir.

Tablo 5.17. Farklı bağlayıcılarla hazırlanmış numunelerde iki aşamalı karıştırma sistemi.

Numune	I.Aşama				II.Aşama		
	Bağlayıcı cinsi	Bağlayıcı oranı (%)	Bağlayıcı sıcaklığı (°C)	Kür sıcaklığı (°C)	Bağlayıcı cinsi	Bağlayıcı oranı (%)	Bağlayıcı sıcaklığı (°C)
AB	AC 100-150	1,046	145	140	AC 75-100	4,312	150
AC	AC 100-150	1,046	145	145	AC 50-70	4,360	155
BA	AC 75-100	1,078	150	135	AC 100-150	4,184	145
BC	AC 75-100	1,078	150	145	AC 50-70	4,360	155
CA	AC 50-70	1,090	155	135	AC 100-150	4,184	145
CB	AC 50-70	1,090	155	140	AC 75-100	4,312	150

Tablo 5.18. Farklı bağlayıcılarla hazırlanmış iki aşamalı numunelerin fiziksel özellikleri ve esneklik modülü değerleri..

Numune	No	W _{kuru} (gr)	W _{doygun} (gr)	W _{suda} (gr)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{ma} (%)	V _f (%)	Esneklik modülü (Mpa)
AB	1	1244,20	1250,56	733,44	2,406	2,500	3,759	15,959	76,333	1114
	2	1245,70	1253,75	735,53	2,404	2,500	3,848	16,036	75,895	1129
	3	1246,82	1253,91	735,30	2,404	2,500	3,834	16,024	75,964	1151
	Ort.				2,405	2,500	3,814	16,006	76,064	1131
AC	1	1245,26	1252,76	734,80	2,404	2,500	3,834	16,063	75,912	1184
	2	1250,68	1258,04	738,05	2,405	2,500	3,792	16,027	76,116	1163
	3	1247,94	1254,10	735,45	2,406	2,500	3,755	15,995	76,300	1150
	Ort.				2,405	2,500	3,793	16,028	76,109	1165
BA	1	1245,63	1252,35	734,41	2,405	2,502	3,878	15,919	75,522	1178
	2	1245,74	1253,08	736,11	2,410	2,502	3,689	15,754	76,464	1229
	3	1251,07	1257,99	738,27	2,407	2,502	3,789	15,841	75,964	1213
	Ort.				2,407	2,502	3,785	15,838	75,984	1206
BC	1	1250,20	1257,87	738,09	2,405	2,500	3,790	16,053	76,340	1325
	2	1243,58	1250,24	733,04	2,404	2,500	3,822	16,081	76,182	1310
	3	1249,75	1257,60	738,17	2,406	2,500	3,760	16,027	76,489	1287
	Ort.				2,405	2,500	3,791	16,053	76,337	1307
CA	1	1248,51	1256,80	738,41	2,408	2,502	3,740	15,808	76,206	1186
	2	1240,47	1247,83	732,93	2,409	2,502	3,711	15,784	76,348	1231
	3	1251,23	1258,76	739,05	2,408	2,502	3,775	15,839	76,030	1241
	Ort.				2,408	2,502	3,742	15,81	76,195	1219
CB	1	1248,55	1256,33	737,70	2,407	2,499	3,665	15,948	76,818	1284
	2	1247,69	1254,28	735,30	2,404	2,499	3,797	16,063	76,166	1242
	3	1250,70	1257,66	738,14	2,407	2,499	3,665	15,948	76,821	1258
	Ort.				2,406	2,499	3,709	15,986	76,601	1261

Değişik penetrasyonlu asfalt çimentolarının kombinasyonları ile oluşturulmuş iki aşamalı numunelerde asfalt çimentolarının kullanılış sırasına göre bir ilişki bulmak amacıyla daha önce esneklik modülü tespit edilmiş olan AA, BB ve CC numuneleri ile AB, AC, BA, BC, CA, CB numunelerinin esneklik modülü değerlerini içeren aşağıdaki matris oluşturulabilir.

	(AA)	(AB)	(AC)
	(BA)	(BB)	(BC)
	(CA)	(CB)	(CC)

Bu matrisin herhangi bir satırında soldan sağa doğru gidildikçe birinci aşamada kullanılan asfalt çimentosu sabit kalmakta, ikinci aşamada kullanılan asfalt çimentosu ise sertleşmektedir. Bu durumun tam tersi matrisin sütunları için geçerlidir. Herhangi bir sütunda yukarıdan aşağı doğru gidildikçe birinci aşamada kullanılan asfalt çimentosu sertleşmekte ikinci aşamada kullanılan asfalt çimentosu ise değişmemektedir. Bu matriste numunelerin esneklik modülü değerleri yerlerine yazılarak satırlar ve sütunlar da 1.ve 3.değerler arasındaki artış yüzdeleri incelenecek olursa;

1026 (AA)	1131 (AB)	1165 (AC)	→ % 13,5
1206 (BA)	1432 (BB)	1307 (BC)	→ % 8,3
1219 (CA)	1261 (CB)	1490 (CC)	→ % 22,2
↓ % 18,8	↓ % 11,5	↓ % 27,9	

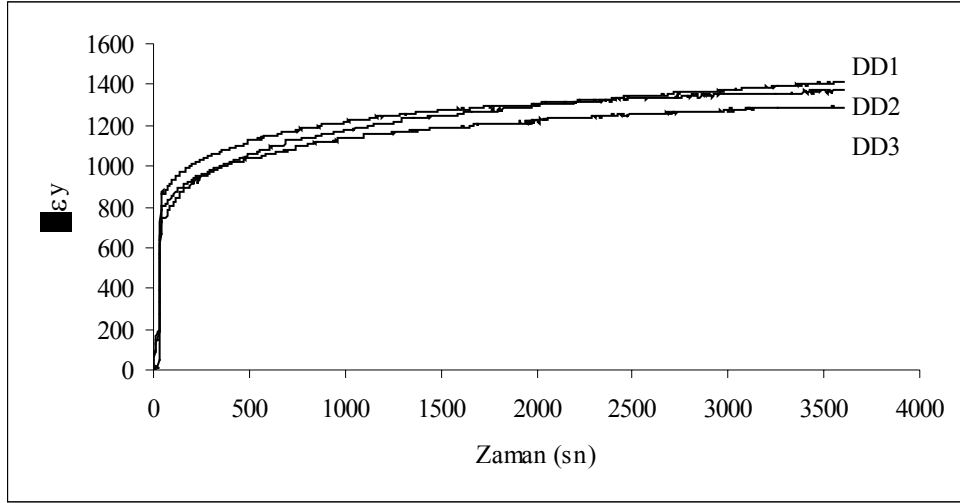
Yukarıdan aşağı doğru olan artışların soldan sağa doğru olan artışlardan daha fazla olduğu dolayısıyla ilk aşamada kullanılan bağlayıcının önemli bir etkiye sahip olduğu kabul edilebilir. Bu deney yöntemi numunenin elastik sınırları içerisinde yapıldığı için karışım içindeki bağlayıcının kopmadan uzama yeteneği olan kohezyon yeteneğini zorlamamaktadır. Dolayısıyla diğerlerine göre daha sert bağlayıcı ile hazırlanmış olan “CC” numunesi en yüksek rijitlik değerini almıştır. Buna karşın “BC” ve “CB” numunelerindeki bağlayıcıların ortalama sertlikleri “BB” numunesindekinden fazla olmasına rağmen “BB” numunesinden daha düşük esneklik modülü değerine sahip olmaları, “BB” numunesinde daha iyi mekanik kenetlenme ve adezyon gerçekleştiğine işaret etmektedir.

5.6.2.Sünme Rijitliği Deneyi ve Sonuçları

Esneklik modülü deneyinde kullanılan numuneler ikinci olarak sünme rijitliği deneyinde kullanılmıştır. Deney, statik ve yük kontrollü olarak 40 °C’de yapılmıştır. Şekil 5.42’de sünme rijitliği deney düzeneği görülmektedir. Deneye başlamadan önce numuneler 2 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek düşey deformasyonu ölçecek sensörler (LVDT) ayarlanmış, numune çapı ve yüksekliği bilgisayara girilmiş, kabin içinde referans numunesinin içinde ve yanında bulunan sıcaklık ölçen sensörlerin aynı değeri göstermesinden sonra deneye başlanmıştır. Cihaz, ilk önce numunede 10 kPa gerilme oluşturacak yükleme ile 10 dakika hazırlık yüklemesi yapmıştır. Bu süre sonunda sensörlerde meydana gelen değişim, bilgisayar tarafından otomatik olarak sıfırlanıp ve gerilme değeri 100 kPa’a çıkartılıp 1 saat sürecek deney başlamaktadır. 1 saat süre içerisinde bilgisayar her 4 saniyede düşey deformasyonları kaydetmekte ve sonuçta sünme rijitliği değerini vermektedir. Şekil 5.43’de örnek olarak DD numunelerin birikimli düşey birim şekil değiştirme ve zaman ilişkisi verilmiştir.



Şekil 5.42. Sünme rijitliği deneyi.

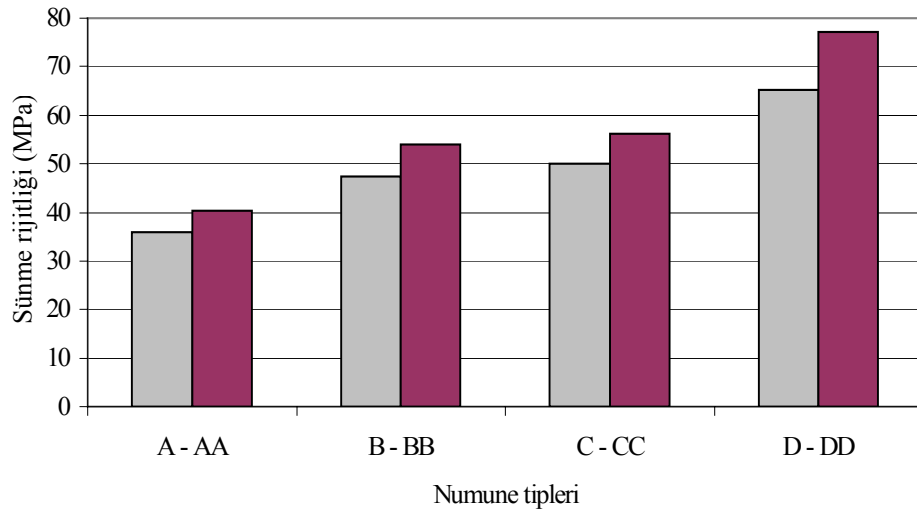


Şekil 5.43. “DD” numuneleri şekil değiştirme – Zaman ilişkisi.

Şekil 5.43’de numunelerin ilk başta çok hızlı düşey deformasyon yaptığı daha sonra hava boşluğu azalarak sıkışan numunelerin az miktarlarda deformasyon yaparak sünme özelliklerini sergilediği görülmektedir. Tablo 5.19’da bütün numunelerin sünme rijitlikleri ve ortalama değerleri, Şekil 5.44’de ise kontrol numuneleri ve iki aşamada karıştırılarak hazırlanmış numunelerin sünme rijitliği değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.19. Numunelerin sünme rijitliği değerleri.

Numune	No	Yükseklik (mm)	Sünme Rijitliği (Mpa)
A	1	64,5	34,83
	2	64,3	35,78
	3	64,0	37,41
	Ort.		36,01
B	1	64,4	49,14
	2	63,9	47,83
	3	64,1	45,04
	Ort.		47,34
C	1	64,2	52,75
	2	64,3	47,60
	3	64,0	49,76
	Ort.		50,04
D	1	64,2	63,22
	2	63,9	65,70
	3	63,9	66,95
	Ort.		65,29
AA	1	64,3	38,87
	2	64,8	42,23
	3	64,2	39,63
	Ort.		40,24
BB	1	63,8	53,49
	2	63,9	56,28
	3	64,0	52,31
	Ort.		54,03
CC	1	64,2	58,44
	2	64,5	56,36
	3	64,2	53,89
	Ort.		56,23
DD	1	64,0	79,01
	2	64,3	78,12
	3	64,0	74,47
	Ort.		77,20



Şekil 5.44. Kontrol ve iki aşamalı numunelerde sünme rijitliği değişimi.

Şekil 5.44 incelendiğinde tek aşamalı olarak karıştırılan kontrol numunelerinde (A,B,C,D) düşük penetrasyonlu ve yumuşama noktası yüksek asfalt çimentosunun kullanılması ile sünme rijitliği değerlerinin arttığı, % 5 SBS katkılı asfalt çimentosu ile hazırlanmış numunenin (D) en yüksek sünme rijitliği değerine sahip olduğu görülmektedir. İki aşamalı karıştırma sistemi ile hazırlanan numunelerin sünme rijitliği değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. İki aşamalı karıştırma sistemi A,B,C ve D numunelerinin sünme rijitliği değerlerinde sırasıyla %11,7 ; %14,1 ; %12,3 ; %18,2 oranlarında artış sağlamıştır. Numunelerin uzun süreli deformasyon davranışı hakkında bilgi veren bu deney yönteminde diğerlerine göre daha sert ve yumuşama noktası yüksek bağlayıcı ile hazırlanmış olan DD numunesi en yüksek sünme rijitliği değerini almıştır. İki aşamalı karıştırma sistemi ile en fazla rijitlik artışının SBS katkılı asfalt çimentosu ile hazırlanan numunelerde (D) ikinci olarak ise 75-100 asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanan numunelerde olduğu tespit edilmiştir.

5.7.Yorulma Deneyi ve Sonuçları

Son olarak karışımların, performansını en iyi şekilde yansıtan yorulma davranışı incelenmiştir. İki aşamalı karıştırma sisteminin etkileri, ülkemizde en çok kullanılan asfalt çimentosu olan AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile üretilen karışımlar ve % 5 SBS katkılı AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile hazırlanan karışımlar üzerinde araştırılmıştır. Deney, gerilme kontrollü yapılmak üzere 200kPa, 150kPa ve 125kPa değerlerinde üç farklı gerilme seviyesi uygulanmıştır. Şekil 5.45’de deney aleti görülmektedir.



Şekil 5.45. Yorulma deneyi.

Ülkemizdeki tek dingilli bir kamyon için yasal yükleme haddi $P=11,5$ ton, lastik basıncının da $q=7$ kg/cm² olduğu kabul edilirse standart bir dingil yükü, kaplamaya değdiği yüzeyde, yarıçapı Formül 5.4 ile hesaplanan dairesel bir alan oluşturmaktadır. Bu dairenin altında herhangi bir noktadaki yanal çekme gerilmesi formül 5.5 ile hesaplanmaktadır.

$$a = \sqrt{P / q\pi} \quad (5.4)$$

$$\sigma_r = q[2v A + C + (1-2v) F] \quad (5.5)$$

Burada σ_r kaplama altındaki yanal çekme gerilmesi, v , poisson oranı, A, C ve F yükün eksenden olan uzaklık ve derinliğine bağlı olarak belirlenen katsayılarıdır (Ahlvin-Ulery). Formül 5.4 ve 5.5'den 7 cm kalınlığında esnek bir kaplamada yük ekseninde ve kaplama tabanındaki gerilme $1,49$ kg/cm² $\cong 150$ kPa olarak hesaplanmaktadır.

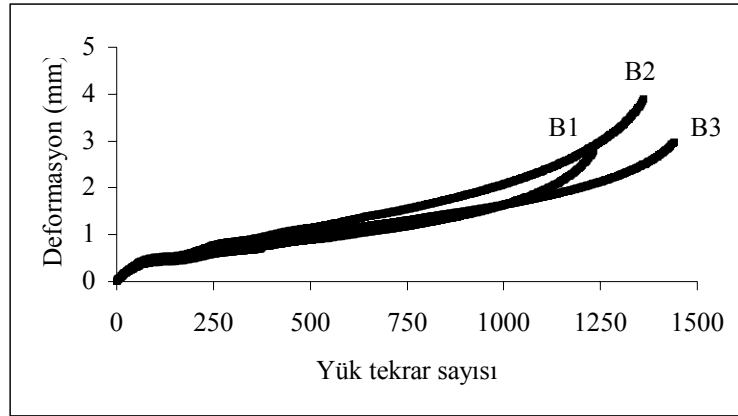
Yorulma ömür diyagramlarının oluşturulabilmesi için 150 kPa değerinin altında ve üstünde 125 kPa ve 200 kPa olmak üzere iki gerilme değeri daha uygulanmıştır. 200 kPa ve 150 kPa gerilme seviyeleri ve dört farklı numune tipinin (B,BB,D,DD) her biri için üçer, 125 kPa

gerilme seviyesi için ise ikişer numune olmak üzere toplam 32 numune hazırlanmıştır. Numuneler optimum bitüm muhtevasında her iki yüzüne 75 darbe uygulanarak hazırlanmıştır. Tablo 5.20’de deneye tabi tutulacak numunelerin fiziksel özellikleri verilmiştir.

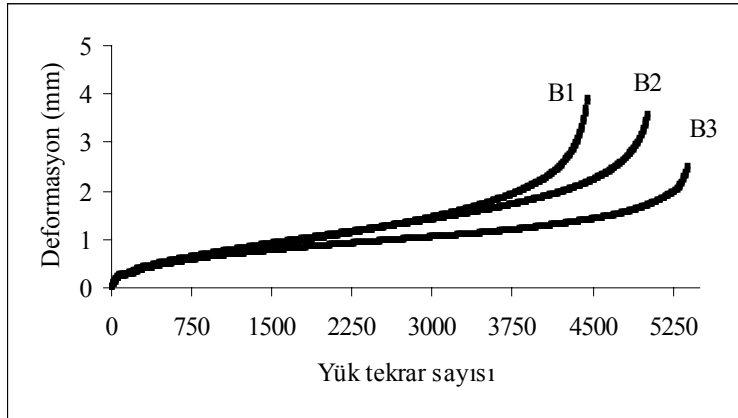
Tablo 5.20. Yorulma deneyinde kullanılacak numunelerin fiziksel özellikleri.

Numune tipi	Gerilme (kPa)	No	Yükseklik (mm)	W _{kuru} (gr)	W _{doygun} (gr)	W _{suda} (gr)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{ma} (%)	V _f (%)
B	125	1	64,3	1254,88	1260,20	737,35	2,400	2,502	4,071	16,127	74,754
		2	64,9	1242,29	1248,15	731,17	2,403	2,502	3,956	16,025	75,317
		3									
		Ort.					2,402	2,502	4,013	16,076	75,035
	150	1	64,1	1251,84	1257,96	736,85	2,402	2,502	3,984	16,051	75,177
		2	64,1	1250,65	1256,94	735,80	2,400	2,502	4,081	16,135	74,707
		3	64,5	1257,01	1262,97	739,95	2,403	2,502	3,940	16,012	75,394
		Ort.					2,402	2,502	4,002	16,066	75,093
	200	1	64,3	1254,06	1260,74	739,80	2,407	2,502	3,783	15,874	76,171
		2	64,4	1255,80	1262,15	740,07	2,405	2,502	3,859	15,941	75,790
		3	64,4	1255,84	1261,46	739,13	2,404	2,502	3,902	15,979	75,578
		Ort.					2,406	2,502	3,848	15,932	75,846
BB	125	1	64,5	1251,62	1258,47	738,13	2,405	2,502	3,859	15,941	75,792
		2	64,0	1249,05	1257,95	738,57	2,405	2,502	3,879	15,959	75,693
		3									
		Ort.					2,405	2,502	3,889	15,950	75,742
	150	1	64,8	1254,12	1260,89	739,18	2,404	2,502	3,920	15,994	75,491
		2	65,0	1253,69	1260,70	738,90	2,403	2,502	3,970	16,038	75,249
		3	65,0	1253,34	1260,27	739,35	2,406	2,502	3,834	15,919	75,915
		Ort.					2,404	2,502	3,908	15,984	75,552
	200	1	65,0	1255,45	1264,00	741,79	2,404	2,502	3,910	15,986	75,539
		2	65,0	1259,59	1267,52	743,72	2,405	2,502	3,886	15,965	75,659
		3	64,5	1252,26	1260,61	739,96	2,405	2,502	3,867	15,948	75,752
		Ort.					2,405	2,502	3,888	15,966	75,650
D	125	1	64,7	1253,94	1260,23	738,94	2,405	2,505	3,963	16,002	75,236
		2	64,1	1252,96	1259,04	737,18	2,401	2,505	4,143	16,16	74,364
		3									
		Ort.					2,403	2,505	4,053	16,081	74,800
	150	1	65,0	1252,53	1258,63	736,83	2,400	2,505	4,165	16,179	74,259
		2	64,9	1251,33	1257,65	736,49	2,401	2,505	4,139	16,156	74,382
		3	64,8	1250,81	1254,76	734,15	2,403	2,505	4,078	16,103	74,678
		Ort.					2,401	2,505	4,127	16,146	74,440
	200	1	64,9	1252,87	1260,34	739,17	2,404	2,505	4,023	16,055	74,944
		2	65,0	1241,97	1246,55	729,64	2,403	2,505	4,074	16,099	74,697
		3	64,9	1252,32	1259,18	738,75	2,406	2,505	3,928	15,972	75,404
		Ort.					2,404	2,505	4,008	16,042	75,015
DD	125	1	64,8	1253,01	1261,46	740,15	2,404	2,505	4,038	16,068	74,870
		2	64,8	1250,77	1258,69	738,28	2,403	2,505	4,044	16,073	74,842
		3									
		Ort.					2,403	2,505	4,041	16,070	75,856
	150	1	65,0	1249,44	1256,19	737,51	2,409	2,505	3,826	15,883	75,911
		2	64,8	1249,98	1257,60	737,34	2,403	2,505	4,077	16,102	74,682
		3	64,8	1246,64	1253,90	735,78	2,406	2,505	3,938	15,981	75,359
		Ort.					2,406	2,505	3,947	15,988	75,317
	200	1	64,8	1252,07	1260,20	739,47	2,404	2,505	4,003	16,038	75,040
		2	64,5	1248,51	1256,42	736,11	2,400	2,505	4,199	16,209	74,096
		3	65,0	1251,33	1257,25	737,22	2,406	2,505	3,931	15,974	75,394
		Ort.					2,403	2,505	4,044	16,073	74,843

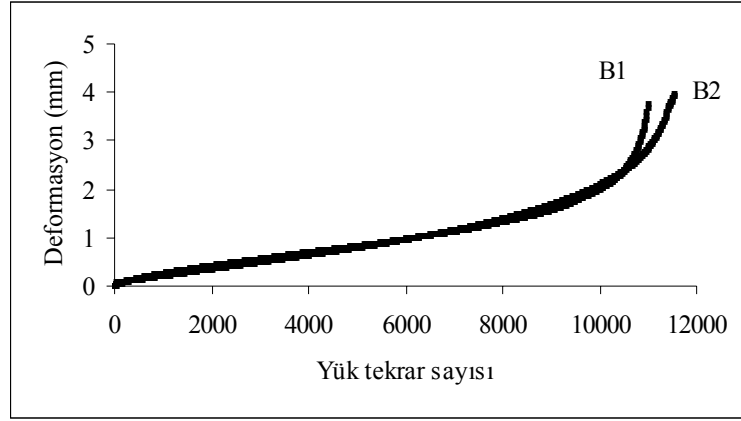
Deney 25°C’de yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 2 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT’ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Yükleme periyodu 1 sn olarak alınmış bu sürenin 0,9 sn’si dinlenme periyodu (rest period), 0,1 sn’si ise yük etki süresi olarak ayarlanmıştır. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmiştir. Şekil 5.46-5-57’da yük tekrarı ve bu esnada oluşan birikimli düşey deformasyon arasındaki ilişkiler verilmiştir.



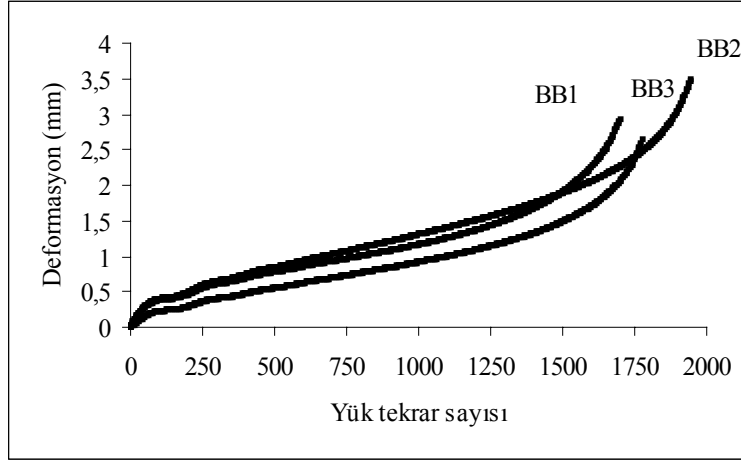
Şekil 5.46. B₂₀₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.



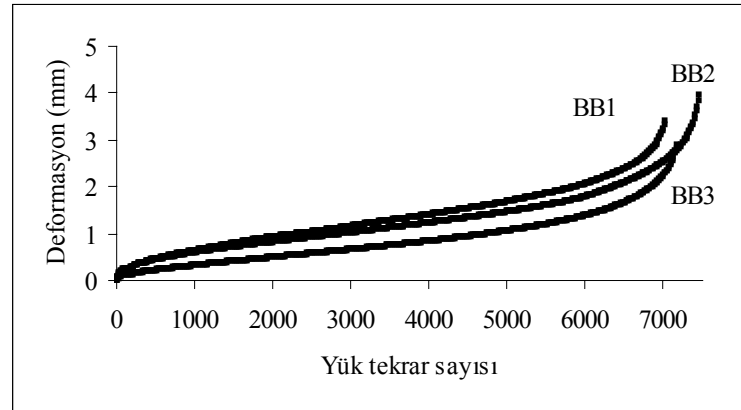
Şekil 5.47. B₁₅₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.



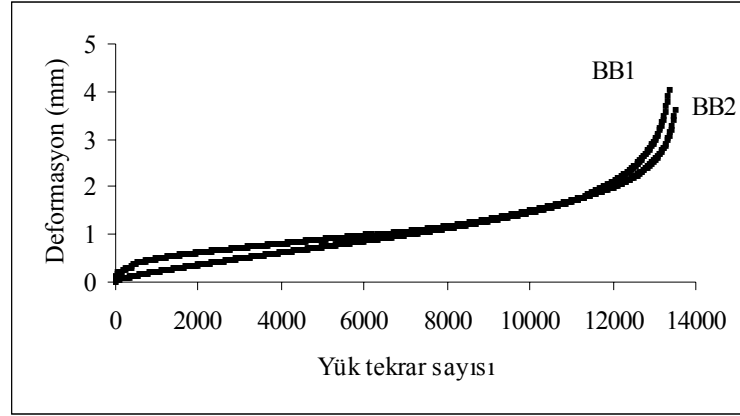
Şekil 5.48. B₁₂₅ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.



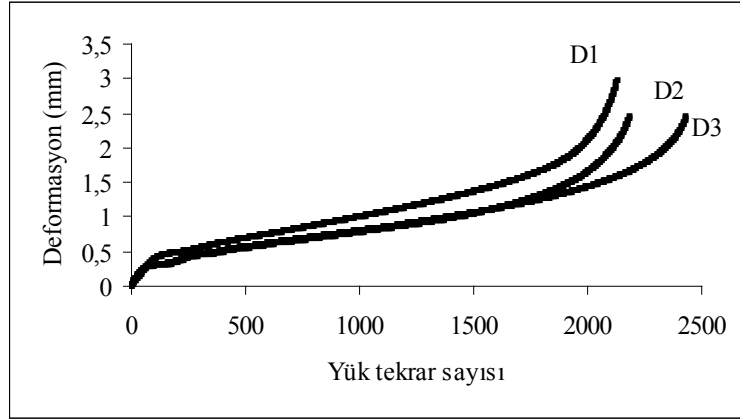
Şekil 5.49. BB₂₀₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.



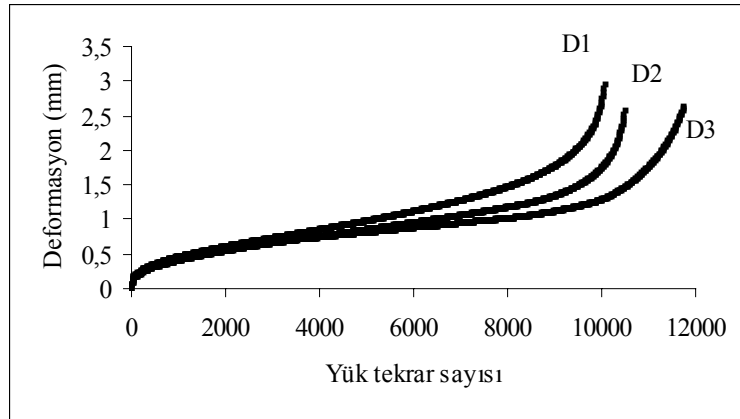
Şekil 5.50. BB₁₅₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.



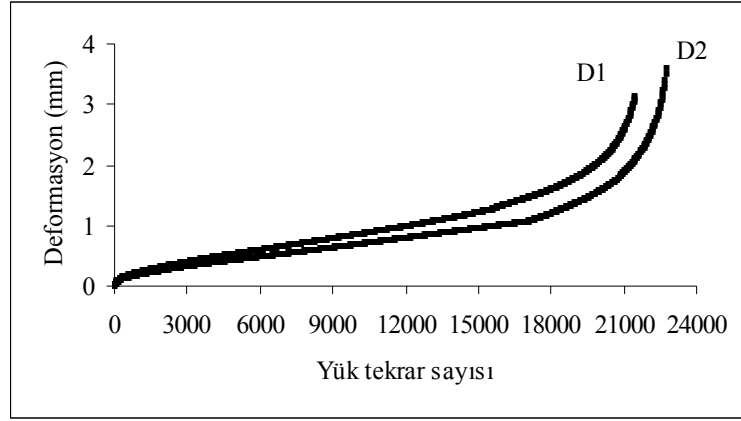
Şekil 5.51. BB₁₂₅ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.



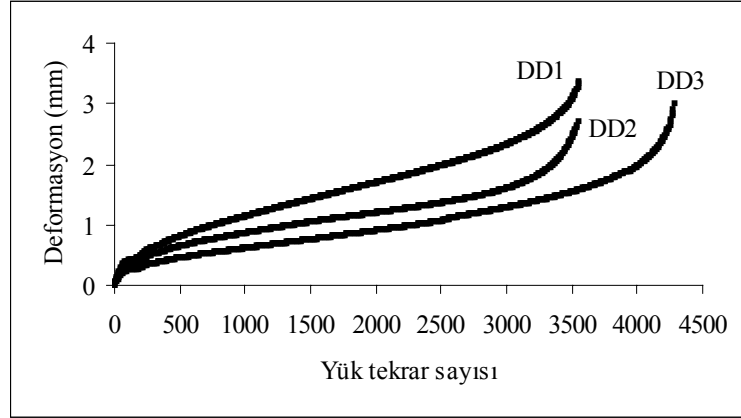
Şekil 5.52. D₂₀₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.



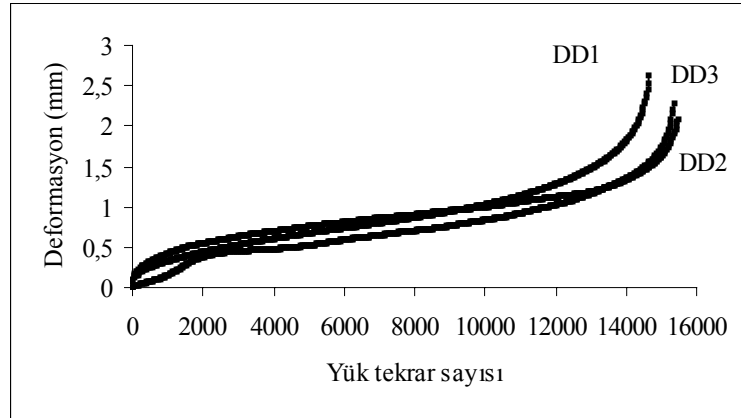
Şekil 5.53. D₁₅₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.



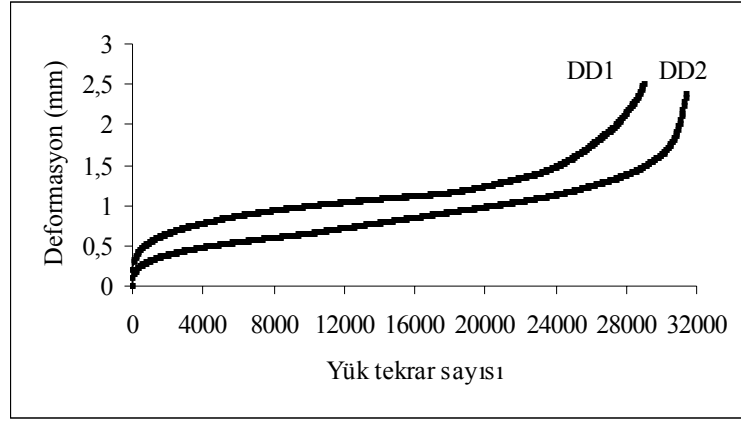
Şekil 5.54. D₁₂₅ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.



Şekil 5.55. DD₂₀₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.



Şekil 5.56. DD₁₅₀ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.



Şekil 5.57. DD₁₂₅ numuneleri yük tekrar sayısı – Deformasyon ilişkisi.

Şekil 5.46-5.57’de görüldüğü üzere bütün numuneler ilk önce sıkışarak fazla deformasyon yapmış daha sonra sabit bir artışla deformasyon artışı devam etmiştir. Çatlak oluşuktan sonra deformasyon artışı yükselerek uygulanan gerilme seviyesine göre farklı deformasyon ve yük tekrar sayılarında numuneler kırılmıştır. Deney, gerilme kontrollü yapıldığı için çatlak oluşuktan sonra çatlak ilerleyişi hızlı bir şekilde devam etmiş ve özellikle yüksek gerilme seviyelerinde çatlak oluşuktan sonra numuneler, kısa bir süre içerisinde kırılmıştır. Şekil 5.58’de deney sonrası numunelerde oluşmuş birkaç çatlak şekli görülmektedir. Tablo 5.21’de gerilme seviyelerine göre yük tekrar sayıları ve ortalama değerler verilmiştir.

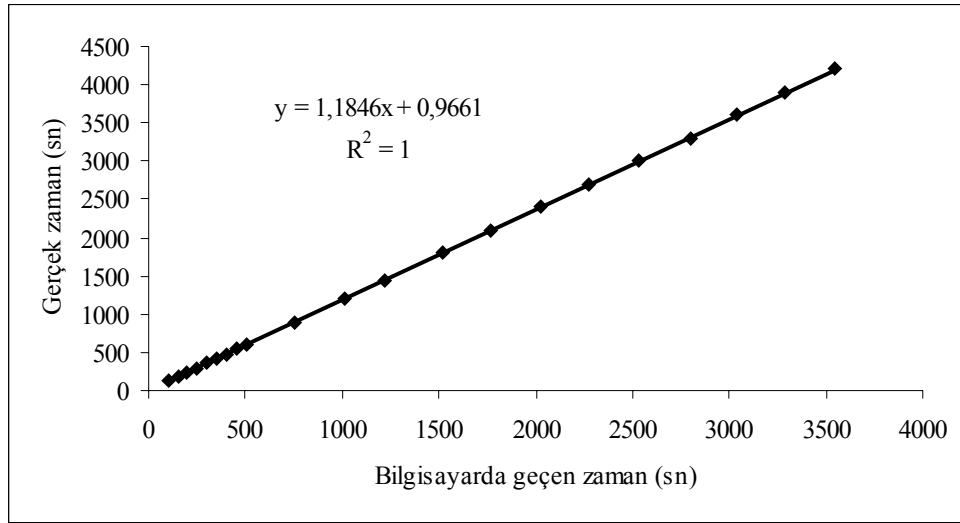


Şekil.5.58. Yorulma deneyi sonrası kırılmış numuneler.

Tablo 5.21. Numunelerin gerilme seviyelerine göre yük tekrar sayıları.

Gerilme (kPa)	Numune No	Yük tekrar sayısı			
		B	BB	D	DD
200	1	1231	1696	2128	3556
	2	1362	1942	2182	3547
	3	1438	1774	2431	4282
	Ort.	1343	1804	2247	3795
150	1	4450	7021	10069	14665
	2	5014	7164	10504	15490
	3	5388	7452	11746	15384
	Ort	4951	7212	10773	15179
125	1	11004	13368	21480	29040
	2	11556	13512	22752	31440
	Ort	11280	13440	22116	30240

Deney cihazında yükleme periyodu 1 sn seçildiği takdirde bilgisayarda geçen süre ile gerçek süre arasında bir fark olduğu, deney verilerinin bilgisayara gönderilme işinin yük tekrarı hızına göre yavaş olduğu ve bilgisayarda geçen sürenin gerçeğin gerisinde olduğu tespit edilmiştir. Bilgisayar, yük tekrarı sayısını geçen süreye göre belirttiğinden (10 saniye=10 darbe) bilgisayarla gerçek süre arasındaki bağıntı Şekil 5.59’de bulunup Tablo 5.21’deki değerler düzeltilerek Tablo 5.22’de verilmiştir.

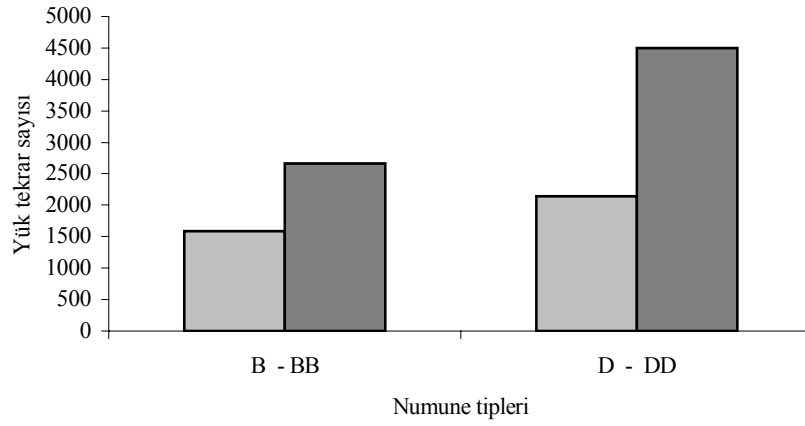


Şekil 5.59. Bilgisayarda geçen zaman – Gerçek zaman ilişkisi.

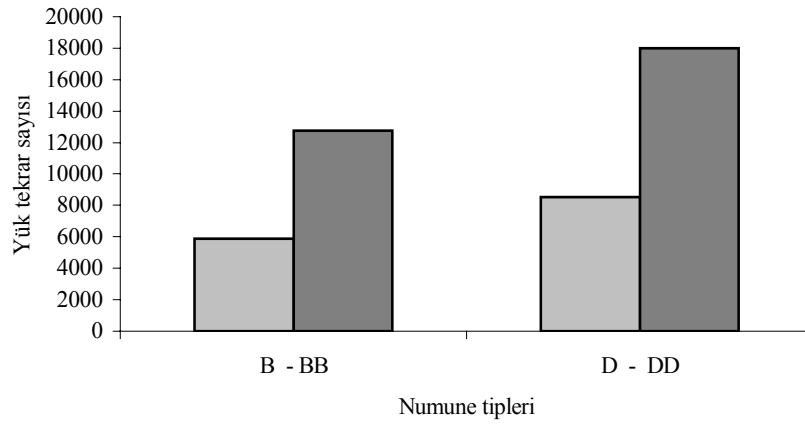
Tablo 5.22. Numunelerin gerilme seviyelerine göre düzeltilmiş yük tekrar sayıları.

Gerilme (kPa)	Numune No	Yük tekrar sayısı			
		B	BB	D	DD
200	1	1459	2010	2522	4213
	2	1614	2301	2586	4203
	3	1704	2102	2881	5074
	Ort.	1592	2138	2663	4497
150	1	5272	8318	11929	17373
	2	5941	8487	12444	18350
	3	6384	8829	13915	18225
	Ort.	5866	8544	12763	17982
125	1	13036	15837	25446	34402
	2	13690	16007	26953	37245
	Ort.	13363	15922	26200	35823

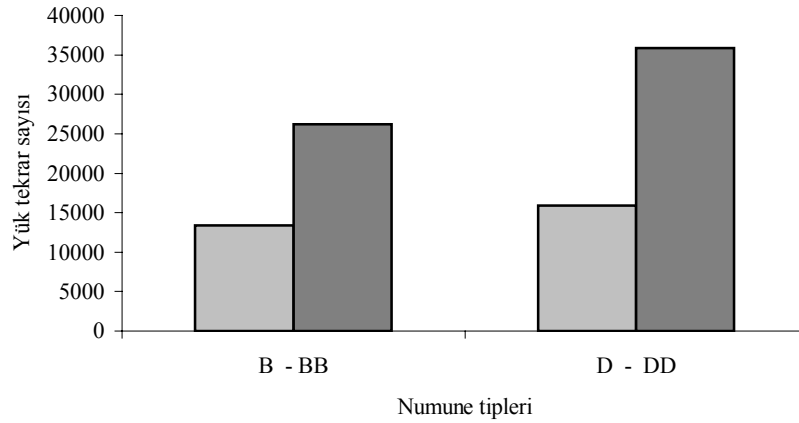
Kontrol numunelerinin ve iki aşamada karıştırılarak hazırlanan numunelerin yük tekrar sayıları 200 kPa, 150 kPa ve 125 kPa gerilme seviyeleri için sırasıyla Şekil 5.60, 5.61 ve 5.62’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.60. 200 kPa gerilme seviyesinde kontrol numuneleri ile iki aşamalı numunelerin yük tekrar sayılarının karşılaştırılması



Şekil 5.61. 150 kPa gerilme seviyesinde kontrol numuneleri ile iki aşamalı numunelerin yük tekrar sayılarının karşılaştırılması.



Şekil 5.62. 125 kPa gerilme seviyesinde kontrol numuneleri ile iki aşamalı numunelerin yük tekrar sayılarının karşılaştırılması

Şekil 5.60 – 5.62’de iki aşamalı olarak hazırlanan numunelerin yük tekrar sayılarının kontrol numunelerinin yük tekrar sayılarından önemli derecede fazla olduğu görülmektedir.

200 kPa gerilme seviyesinde B numunelerinin yük tekrar sayıları iki aşamalı karıştırma sistemi ile % 34,29 D numunelerinin yük tekrar sayıları ise %68,87 oranında artmıştır.

150 kPa gerilme seviyesinde B numunelerinin yük tekrar sayıları iki aşamalı karıştırma sistemi ile % 45,65 D numunelerinin yük tekrar sayıları ise %40,89 oranında artmıştır.

125 kPa gerilme seviyesinde B numunelerinin yük tekrar sayıları iki aşamalı karıştırma sistemi ile % 19,14 D numunelerinin yük tekrar sayıları ise %36,73 oranında artmıştır.

Bu deney ile iki aşamalı karıştırma sisteminin bitümlü sıcak karışımların performansını önemli derecede artırdığı, özellikle SBS katkılı karışımlarda bu iyileşmenin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.63’de kontrol ve iki aşamalı numunelerin yorulma ömür diyagramı bir arada verilmiştir. Burada eksenler logaritmik ölçekte olmak üzere, düşey eksen başlangıç gerilmesini, yatay eksen ise yorulma ömrünü göstermektedir. Deney sonuçları için en uygun bağıntının, Formül 5.6’daki Wöhler bağıntısına uygun üstel bir eşitlik olduğu bulunmuştur.

$$N_f = a \left(\frac{1}{\sigma} \right)^b \quad (5.6)$$

Numunelerin Şekil 5.63’den elde edilen yorulma bağıntıları ve belirlilik katsayıları Formül 5.7-5.10’da verilmiştir.

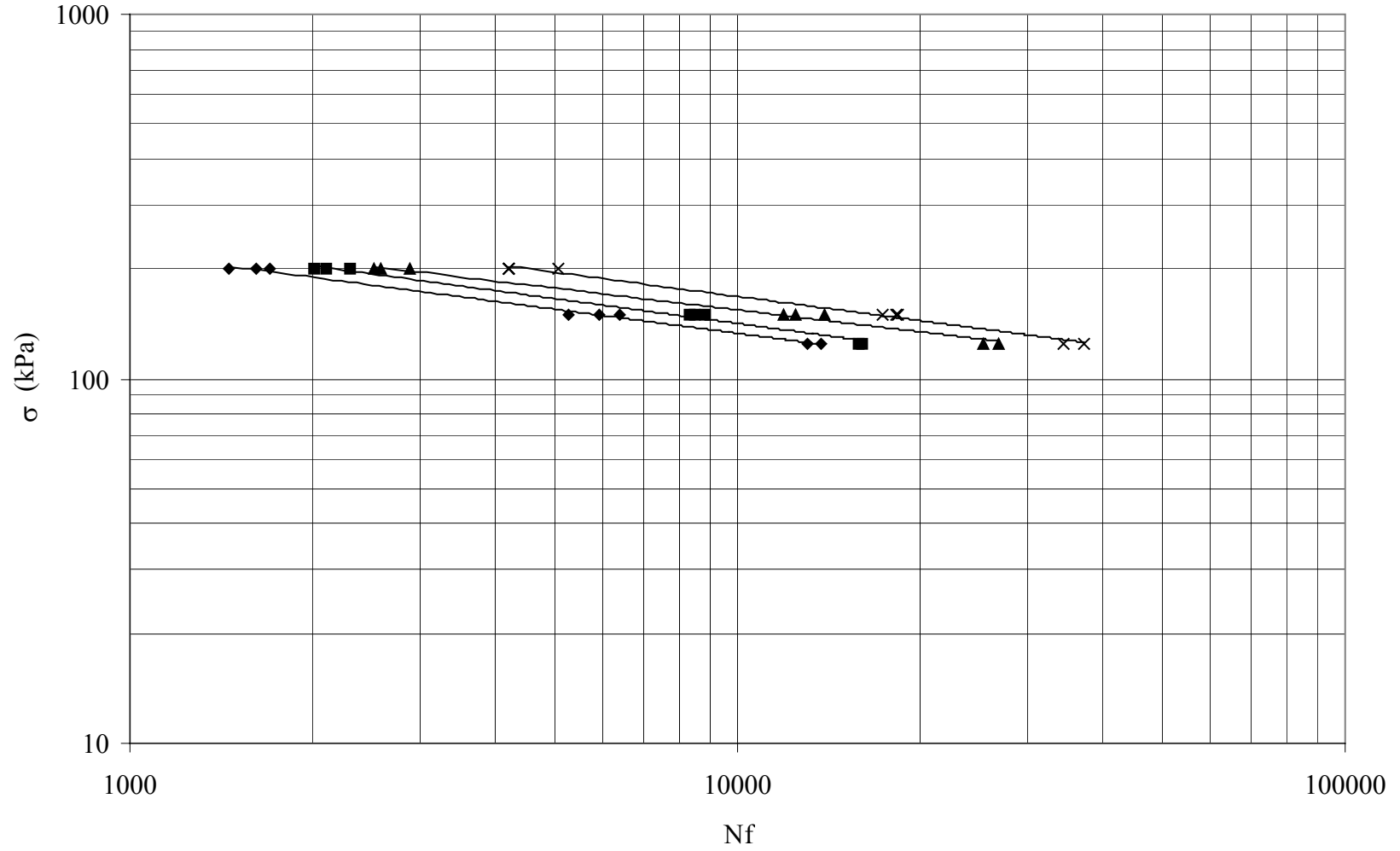
$$B \text{ numunesi için, } N_f = 4.10^{13} \sigma^{-4,5297} \quad R^2 = 0,9945 \quad (5.7)$$

$$BB \text{ numunesi için, } N_f = 3.10^{13} \sigma^{-4,3790} \quad R^2 = 0,9901 \quad (5.8)$$

$$D \text{ numunesi için, } N_f = 8.10^{14} \sigma^{-4,9768} \quad R^2 = 0,9897 \quad (5.9)$$

$$DD \text{ numunesi için, } N_f = 1.10^{14} \sigma^{-0,4997} \quad R^2 = 0,9909 \quad (5.10)$$

Şekil 5.63’de görüldüğü gibi iki aşamada karıştırılarak hazırlanan BB karışımı B karışımından, DD karışımı da D karışımından daha fazla hizmet ömrü sunmaktadır.



Şekil 5.63. Numunelerin yorulma ömrü diyagramı.

6. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÜRETİMİ

Bitümlü sıcak karışımlar, kırılmış ve elenmiş kaba agregası, ince agregası ve mineral fillerin belirli gradasyon limitleri arasında işyeri karışım formülü esaslarına uygun olarak bitümlü bağlayıcı ile bir plentte karıştırılarak elde edilirler. Plentte üretilen bitümlü sıcak karışımın, temeller veya diğer bitümlü kaplamalar ile beton kaplamalar üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde sıcak olarak projesindeki plan, profil ve enkesitlere uygun biçimde serilip sıkıştırılması ile asfalt betonu kaplama teşkil edilir. Asfalt betonu kaplama, aşınma tabakasını, binder tabakasını veya bunların her ikisini birden kapsar. Asfalt betonu üretimi için ilk önce uygun özellikte agregaların üretilmesi gerekir. Agregası, kırma taş, kırılmış çakıl veya bunların karışımından oluşur. Karışım içindeki kırma taş veya kırma çakıl, temiz, sert sağlam ve dayanıklı danelerden olup malzemede kil toprakları, bitkisel maddeler ve diğer zararlı maddeler bulunmaz.

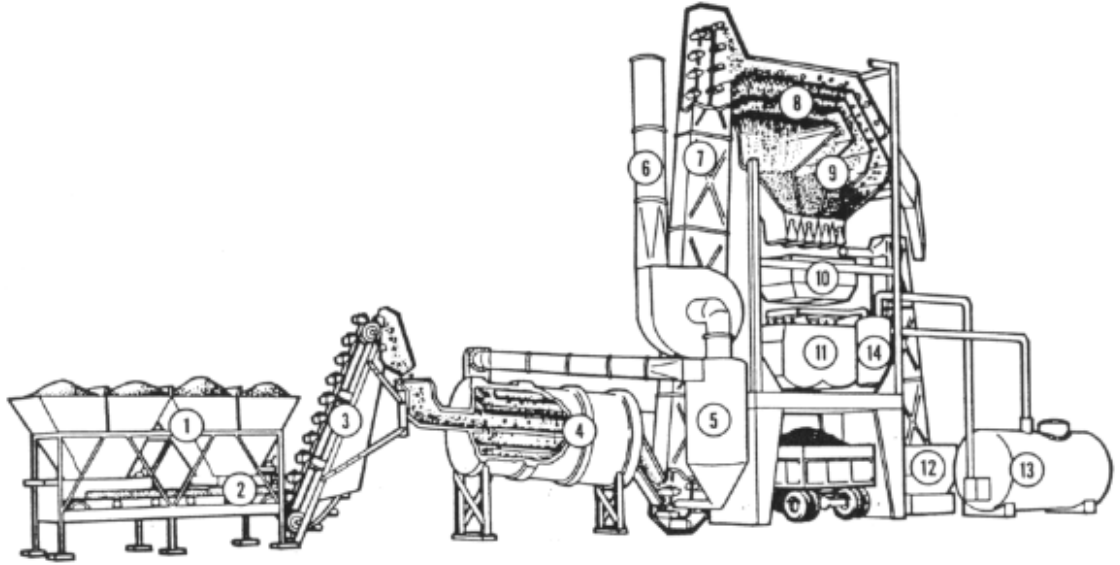
Kaba agregası, agregası karışımının 4,75 mm'lik (No.4) elek üzerinde kalan kısmıdır. BSK'daki kaba agreganın hafif ve orta trafikli yollar için ağırlıkça en az %60'ının, ağır trafikli yollar, otoyolları ve tırmanma şeritleri için % 100'ünün mekanik olarak kırılmış iki veya daha fazla yüzünün bulunması gerekmektedir. İnce agregası 4,75 mm'lik elekten geçip 0,075 mm'lik (No.200) elek üzerinde kalan malzemedir. Mineral filler genel anlamı ile tamamı 0,600 mm (No.30) elekten geçip ağırlıkça en az %70'i 0,075 mm elekten geçen malzeme olarak tanımlanır. Mineral filler taş tozu, mermer tozu, portland çimentosu, sönmüş kireç veya benzeri maddelerden oluşmaktadır. Asfalt betonu üretiminde agregası karışımı, kaba agregası, ince agregası ve mineral fillerini içeren en az üç ayrı dane grubunun düzgün bir derecelenme verecek şekilde belirli oranlarda karıştırılmasından oluşur.

Asfalt betonu aşınma ve binder tabakalarının yapımı için agregası karışımına penetrasyon dereceleri 40-150 arasında olan asfalt çimentosu ilave edilmektedir. Hangi asfalt çimentosunun hangi bölge ve yörede ve hangi tabakada kullanılacağı iklim koşullarına bağlı olarak belirlenmektedir.

Asfalt betonu üretiminde, kullanılacak asfalt, agregası ve karışıma ait gerekli deneyler yapıldıktan sonra işyeri karışım formülü hazırlanır ve plentte üretime geçilir. Bitümlü sıcak karışım plenti, agregaların, kurutulduğu, ısıtıldığı bağlayıcı ile karıştırıldığı mekanik ve elektronik ekipmanlardan oluşmaktadır. En çok kullanılan plent tipleri harman tipi (batch plant) ve kazan tipi (drum plant) plentlerdir.

6.1.Harman Tipi Asfalt Plenti

Harman tipi asfalt plentinde sıcak agrega ve bağlayıcı belirlenen oranlarda bir harman oluşturacak şekilde karıştırıcı içine ilave edilmekte ve karıştırma işleminden sonra bitümlü sıcak karışım mikserden bir harman olarak alınmaktadır. Şekil 6.1’de ayrıntılı bölümleri ile bir harman tipi asfalt plenti verilmiştir.



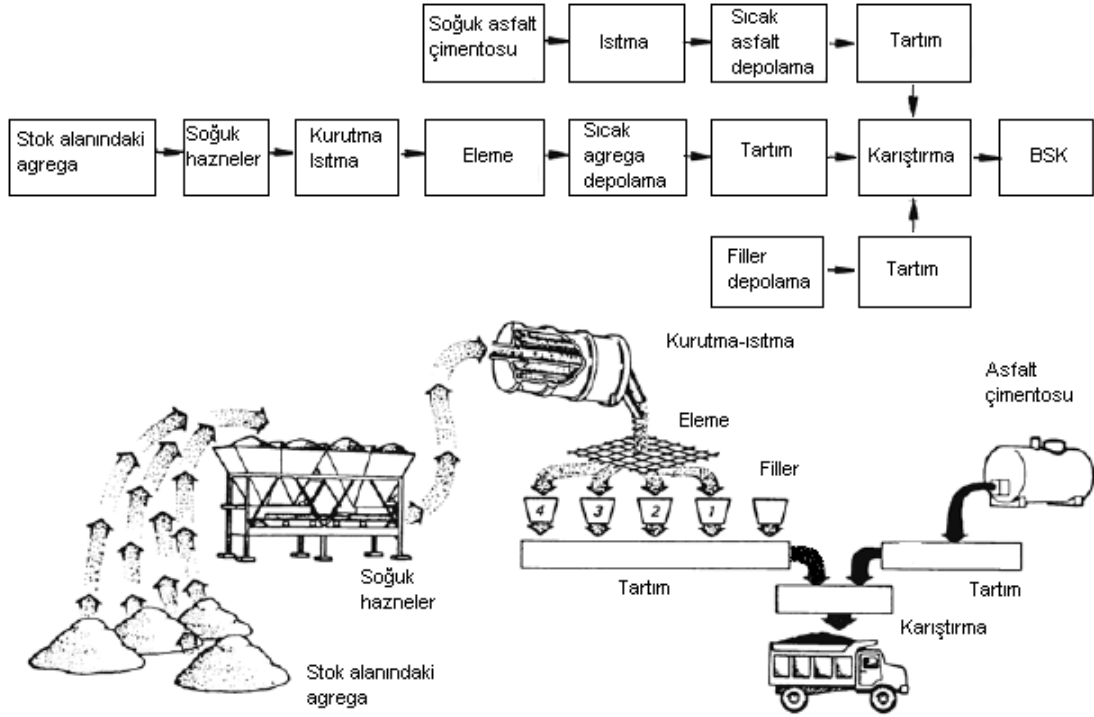
- | | |
|-----------------------------|---|
| 1 – Soğuk agrega depoları | 8 – Eleme ünitesi |
| 2 – Soğuk besleme kapakları | 9 – Sıcak hazneler |
| 3 – Soğuk taşıyıcı | 10 – Ağırlık ölçüm haznesi |
| 4 – Kurutucu (cehennem) | 11 – Karıştırma ünitesi |
| 5 – Toz toplayıcı | 12 – Filler deposu |
| 6 – Baca | 13 – Asfalt çimentosu deposu |
| 7 – Sıcak taşıyıcı | 14 – Asfalt çimentosu ağırlık ölçüm haznesi |

Şekil 6.1. Harman tipi asfalt plenti.

Bir harman tipi asfalt plentinde 6 değişik işlem yürütülmektedir.Bunlar;

1. Agrega depolanması ve soğuk besleme
2. Agrega kurutulması ve ısıtılması
3. Eleme ve sıcak agrega depolama
4. Bağlayıcının ısıtılması ve depolanması
5. Bağlayıcı ve agrega miktarlarının tespiti ve karıştırılması
6. Üretilen bitümlü sıcak karışımın kamyonlara yüklenmesidir.

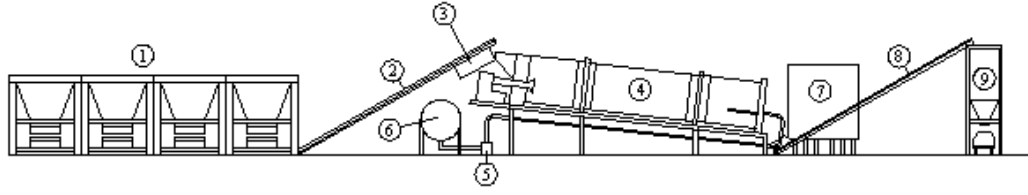
Şekil 6.2’de bu işlemlerin sıralaması şematik olarak verilmiştir.



Şekil 6.2. Harman tipi plant akış şeması.

6.2.Kazan Tipi Asfalt Plenti

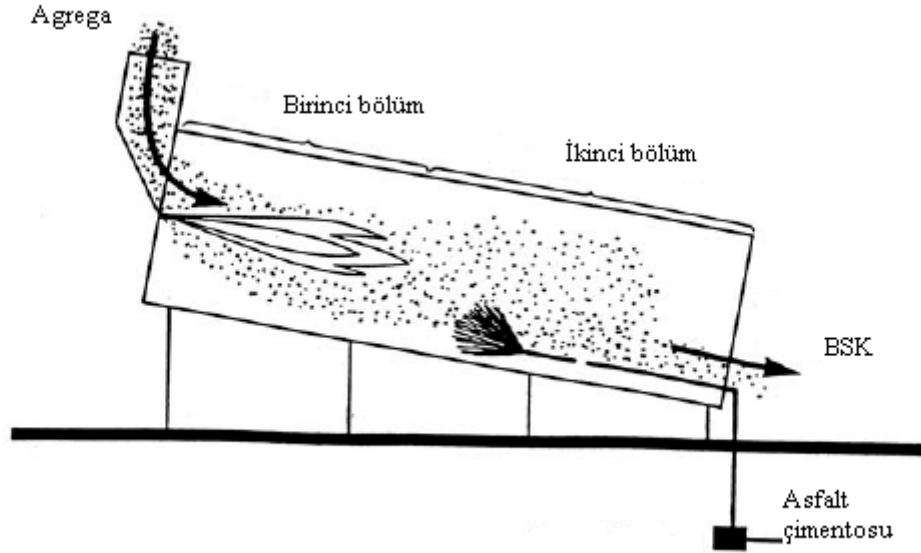
Kazan tipi asfalt plantinde bitümlü sıcak karışım üretimi harman tipi plantlere göre kısmen daha basittir. Kazan tipi plantte, bağlayıcı, agreganın kurutulup ısıtıldığı tambur mikserde doğrudan agregaya ilave edilmekte ve sıcak karışım burada hazırlanmaktadır. Bu tip plantler bir sürekli tip asfalt plenti olup sistemde gradasyon elekleri, sıcak agrega hazneleri, ağırlık kontrol ünitesi ve ayrı bir karıştırıcı yoktur. Agregada gradasyonu soğuk beslemede ayarlanmaktadır. Ayrıca bu tip plantlerde agrega karıştırılırken asfalt çimentosu ilave edildiğinden daha az toz çıkmakta ve sadece bir adet toz toplayıcı kullanılmaktadır. Kazan tipi plantlerde iyi bir karışım elde edilebilmesi için ilk etapta soğuk besleme silolarındaki agrega gradasyonları ve her bir agrega grubu için üniformluk çok iyi ayarlanmış olmalıdır. Şekil 6.3’de bir kazan tipi asfalt plenti şematik olarak verilmiştir.



- | | |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1 – Soğuk besleme siloları | 6 – Asfalt depolama tankı |
| 2 – Soğuk besleme bandı | 7 – Toz toplayıcı |
| 3 – Otomatik tartma sistemi | 8 – Sıcak karışım bandı |
| 4 – Tambur mikser | 9 – Sıcak silo |
| 5 – Asfalt pompası | |

Şekil 6.3. Kazan tipi asfalt plenti.

Kazan tipi plantlerde sistemin en önemli parçası tambur mikserdir. Tambur mikser Şekil 6.4’de görüldüğü gibi iki bölüme ayrılabilir. Birinci yani ısıtıcının olduğu bölümde agrega kurutulmakta ve ısıtılmaktadır. Isıtılan agrega tambur içindeki helezonik kanatlar vasıtasıyla tamburun alt ucuna, ikinci bölüme ilerleyerek burada bağlayıcı ile karıştırılmaktadır.



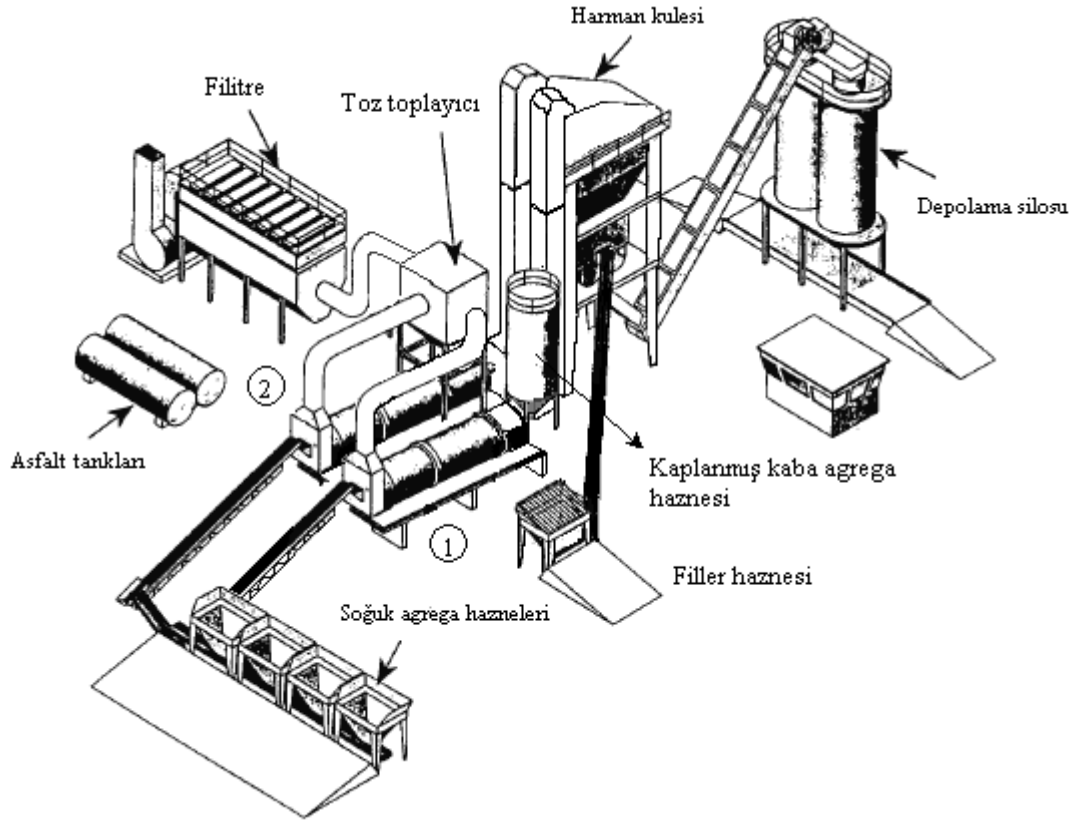
Şekil 6.4. Kazan tipi asfalt plantlerinde tambur.

Asfalt plantlerindeki temel amaç istenilen oranlardaki asfalt ve agregayı sıcak olarak karıştırmaktır. Plantler içinde en iyi sonuç harman tipi plantlerden sağlanır. Bu nedenle yoğun gradasyonlu, yüksek standartlı yollarda harman tipi plantler, açık gradasyonlu veya düşük

standartlı yollarda ise kazan tipi plentler kullanılmaktadır. Asfalt plentlerinden kaliteli bir karışım elde etmek için ilk etapta plentdeki tüm ölçüm cihazları kalibre edilmiş olmalıdır. Daha sonra agraga doğru olarak oranlandırılmalı, kurutulmalı, asfalt püskürtme sistemi üniform püskürtme yapmalı, karıştırıcı kazan ve paletleri uygun çalışıyor olmalıdır.

6.3. İki Aşamalı Karıştırma Sistemi İçin Tasarlanan Asfalt Plenti

Bu çalışmada BSK'ların iki aşamalı karıştırma sistemine uygun olarak üretilibilmeleri için harman ve kazan tipi plentlerin bir arada kullanıldığı bir asfalt plenti tasarlanmıştır. Bu kombine sistemde, kaba agreganın önceden kaplandığı I.aşama işlemi kazan tipi plentte yapılmaktadır. İnce agreg, filler ve kaplanmış kaba agreganın karıştırıldığı II.aşama işlemi ise harman tipi plentte yapılmaktadır. Şekil 6.5'de harman ve kazan tipi plentlerin paralel olarak, Şekil 6.6'da ise seri olarak dizayn edilmiş durumları verilmiştir. Her iki şekilde de kaba agreg 1 nolu tambur mikserde kurutulup ısıtıldıktan sonra aynı mikserde bağlayıcı ilave edilerek ön kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir. Daha sonra kaplanan kaba agreg 1 saatlik kür işlemi için düşey taşıyıcılarla sıcak depoya taşınmaktadır. Kür işlemi sırasında sistemin diğer tarafında ince agreg ve filler, 2 nolu kurutucudan geçip düşey taşıyıcılarla harman kulesindeki eleklerle taşınıp buradan da karıştırma ünitesine gelmektedir. Karıştırma ünitesindeki ince agreg ve filler belirlenen bağlayıcı oranı ile karıştırılmaktadır. Bu esnada kür süresini tamamlayan kaplanmış kaba agreg da düşey taşıyıcılarla karıştırıcıya taşınıp burada ince agreg filler ve kaplanmış kaba agreg bir müddet daha beraber karıştırıldıktan sonra üretim tamamlanmaktadır. İki aşamalı karıştırma sisteminde kaba agreganın kaplanması işlemine 1 saat önce başlanması, kür sırasında geçen zamanı telafi ederek üretimin kesintiye uğramamasını temin edecektir.



Şekil 6.5. Paralel dizayn edilmiş iki aşamalı asfalt plenti.

7.SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında BSK'ların üretiminde yeni bir karıştırma yöntemi olarak iki aşamalı karıştırma sistemi geliştirilmiştir. İki aşamalı karıştırma sistemini değerlendirebilmek için gerek bu yeni yöntemle ve gerekse geleneksel yöntemle hazırlanmış Marshall numunelerine; Marshall stabilite, indirek çekme mukavemeti ve nem hassasiyeti, rijitlik modülü, sünme rijitliği ve yorulma deneyleri uygulanmıştır.

Marshall stabilitesi deneyine göre, kontrol ve iki aşamalı karıştırma sistemi ile hazırlanmış numunelerde, düşük penetrasyonlu ve yumuşama noktası yüksek asfalt çimentosunun kullanılması ile Marshall stabilite ve rijitliği temsil eden stabilite/akma oranlarının arttığı, % 5 SBS katkılı asfalt çimentosu ile hazırlanmış numunelerin en yüksek stabilite ve stabilite/akma değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. İki aşamalı karıştırma sistemi AC 100-150 asfalt çimentosunun kullanıldığı numunelerin stabilite değerlerinde önemli bir iyileştirme yapmamış 75-100, 50-70 ve katkılı 75-100 asfalt çimentosu ile hazırlanmış numunelerin stabilite değerlerinde sırasıyla %14,3 ; %8,2 ; %12,6 oranlarında artış sağlamıştır. İki aşamalı karıştırma sistemi Marshall stabilitesi değerlerine göre en fazla iyileştirmeyi, 75-100 asfalt çimentosunun kullanıldığı numunelerde stabilite/akma değerlerine göre ise katkılı 75-100 asfalt çimentosu ile hazırlanmış numunelerde yaptığı tespit edilmiştir.

İndirek çekme mukavemeti deneyine göre, iki aşamalı karıştırma sistemi kuru olarak test edilen AC 100-150, AC 75-100, AC 50-70 ve %5 SBS katkılı AC 75-100 asfalt çimentoları ile hazırlanmış numunelerin indirek çekme mukavemetlerinde sırası ile %10,2 ; %15,5 ; 12,3 ; %6,8 oranlarında artış sağladığı, koşullandırılarak test edilen numunelerin indirek çekme mukavemetlerinde ise sırası ile %18,5 ; %25,3 ; %20,3 ; %15,8 oranlarında artış sağladığı tespit edilmiştir. İki aşamalı karıştırma sistemi aynı numunelerin indirek çekme mukavemeti oranlarında sırası ile %7,5 ; 8,5 ; %7,2 ; %8,5 oranlarında iyileştirme yaptığı tespit edilmiştir. İki aşamalı olarak hazırlanan koşullandırılmış numunelerin indirek çekme mukavemetlerinin koşullandırılmış kontrol numunelerinden önemli derecede yüksek olması iki aşamalı karıştırma sisteminin suya karşı direnci yüksek bir karışım sunduğuna işaret etmektedir.

Rijitlik modülü ve sünme rijitliği deneylerine göre, kontrol ve iki aşamalı olarak hazırlanan numunelerde düşük penetrasyonlu ve yumuşama noktası yüksek asfalt çimentosunun kullanılması ile rijitlik modülü ve sünme rijitliği değerlerinin arttığı, % 5 SBS katkılı asfalt çimentosu ile hazırlanmış numunelerin en yüksek rijitlik modülü ve sünme rijitliği değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. İki aşamalı karıştırma sistemi AC 100-150, AC 75-100, AC 50-70 ve %5 SBS katkılı AC 75-100 asfalt çimentoları ile hazırlanmış numunelerin rijitlik modülü değerlerinde sırasıyla %11,7 ; %17 ; %13,4 ; %25,9 oranlarında, sünme rijitliği değerlerinde ise

sırasıyla %11,7 ; %14,1 ; %12,3 ; %18,2 oranlarında artış sağladığı tespit edilmiştir. Farklı bağlayıcıların aynı karışımda kullanılması ile hazırlanan numunelerin rijitlik modülü deneyinden, birinci aşamada kullanılan bağlayıcının, önemli bir etkiye sahip olduğu, agregaya iyi yapışabilmesi ve iyi bir mekanik kenetlenme temin etmesi gerektiği tespit edilmiştir.

Son olarak yapılan yorulma deneyinde bağlayıcı olarak ülkemizde en çok kullanılan ve diğer deney yöntemlerinde iyi sonuç veren AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ayrıca % 5 SBS katkılı AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılmıştır. Deneylerde 125, 150 ve 200 kPa gerilme seviyeleri uygulanmıştır. AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile hazırlanan numunelerinin yük tekrar sayılarının, iki aşamalı karıştırma sistemi ile uygulanan gerilme seviyesine göre %19-%34 arasında, katkılı AC 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile hazırlanan numunelerinin yük tekrar sayılarının ise %36-%68 arasında arttığı tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda iki aşamalı karıştırma sistemi ile hazırlanmış numunelerin mekanik özelliklerinin geleneksel yöntemle hazırlanmış numunelerden yüksek olduğu tespit edilmiş, bitümlü sıcak karışımların iki aşamalı karıştırma sistemine uygun olarak üretilmelerini sağlayacak bir asfalt plenti tasarlanmıştır.

KAYNAKLAR

1. <http://www.die.gov.tr>
2. Dikicioğlu,A.E., 2004, Ülkemizdeki sathi kaplamalı ve sıcak karışım kaplamalı yollarda ömür-maliyet ilişkisine genel bakış, 4.Ulusal Asfalt Sempozyumu, 149-153.
3. Çelikten,E., 1996, Adhesion of asphalt emulsions, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
4. Tunç,A.,2001, *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Atlas Yayın Dağıtım, Ankara.
5. Terrel,R.L., and Shute,J.W., 1989, *Summary Report on Water Sensitivity*. SHRP-A/IR-89-003. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
6. Çetinkaya,B.,1992, *Kavramlarla Organik Kimya*.
7. Ioan,I.N., 2005, Louisiana perspective on adhesion and cohesion determination, Pavement Performance Prediction, P3 Symposium.
8. Masson,J.F., Lauzier, C., Collins, P.,Lacasse, M.A., 1998, Sealant degradation during the crack sealing of pavements , Journal of Materials in Civil Engineering 10, 250-255.
9. Masson,J.F., and Lacesse, M.A., A review of adhesion mechanisms at the crack sealant/asphalt concrete interface, Institute for Research in Construction National Research Council of Canada.
10. Malkoç,G., 2000, Asfalt çimentosunun kimyasal yapısı, modifikasyona etkisi ve bu kapsamda ülkemiz ürünlerinin değerlendirilmesi, III. Asfalt Sempozyumu, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
11. Plancher,H., Dorrence, S., Petersen, J.C., 1977, Identification of chemical types in asphalts strongly absorbed at the asphalt–aggregate interface and their relative displacement by water. *Proc.*, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, pp. 151–175.
12. Thomas,K., McKay,J., Branthaver,J.F., 2002, Asphalt chemistry and its relationship to moisture damage, Moisture Damage Symposium, Laramie, WY.
13. Huang,S.C., Robertson, R.E., Branthaver,J.F.,2003, Physico-chemical characterization of asphalt-aggregate interactions under the influence of freeze-thaw cycles, TRB Annual Meeting.
14. Robertson,R.E., 2000, Chemical properties of asphalts and their effects on pavement performance, Transportation Research Circular 499, TRB National Research Council, Washington, D.C.
15. Siddiqui,M.N., Ali,M.F., Baig,M.G.,2004, Chemistry of bonding between asphalt and aggregates, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Chemindex.
16. Logaraj,S., 2002, Chemistry of asphalt aggregate interaction – influence of additives, Moisture Damage Symposium, Laramie, WY.

17. Kiggundu,B.M., Bagampadde U.,Mukunya, J.S., 2002, Exploratory stripping studies on bituminous mixtures in Uganda, Water Damage Symposium, Laramie, WY.
18. Bagampadde,U., Isacson,U., Kiggundu,B.M., 2005, Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures, International Journal of Pavement Engineering Volume6, Number 4.
19. Yoon,H.H., Tarrer,A.R., 1988, Effect of aggregate properties on stripping, Transportation Research Record 1171, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 37–43.
20. Cheng,D.Z., Little,D.N., Lytton,R.L., Holste,J.C., 2001, Surface free energy measurement of aggregates and its application on adhesion and moisture damage of asphalt–aggregate system, Proc., 9th International Center for Aggregate Research Symposium, Austin, Tex.
21. Epps,J.A., Berger,E., Anagnos,J.N., 1992, Treatments, Moisture sensitivity of asphalt Pavements:A National Seminar.
22. Kennedy,T.W., Ping,W.V., 1991, Evaluation of effectiveness of antistripping additives in protecting asphalt mixtures from moisture damage, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, from the Proceedings of Technical Sessions, Volume 60.
23. Collins,R., 1988, Status report on the use of hydrated lime in asphaltic concrete mixtures in Georgia, Georgia DOT, Materials and Research.
24. Aschenbrener,T., Far,N., 1994, Influence of compaction temperature and anti-stripping treatment on the results from the Hamburg Wheel-Tracking device, Rpt CDOT-DTDR-94-9, Colorado Department of Transportation.
25. Kim,O.X., Bell,C.A., Hicks,R.G., 1995, The effect of moisture on the performance of asphalt mixtures, ASTM STP-899.
26. Little,D.N., Epps,J.A., 2001, The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt, National Lime Association.
27. Paul,H.R., Compatibility of aggregate, asphalt cement and antistrip material, Ltrc Research Project no. 85-1b Ltrc report no. 292.
28. Aksoy,A., Şamlıoğlu,K., Tayfur,S., Özen,H.,2005, Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures, Construction and Building Materials 19 , 11–18.
29. Shuler,S., Douglas,I., 1990, Improving durability of open-graded friction courses, Transportation Research Record, 1259, 35–41.
30. Kandhal,P.S., 1992, Moisture susceptibility of hma mixes: identification of problem and recommended solutions, NCAT report no. 92-1.
31. Kerh,T., Wang,Y.M., Lin,Y.,2005, Experimental evaluation of anti-stripping additives mixing in road surface pavement materials, American Journal of Applied Sciences 2 (10), 1427-1433.

32. Katinpong,K., Bahia,H., 2005, Relating adhesion and cohesion of asphalts to the effect of moisture on laboratory performance of asphalt mixtures, Bituminous Binders 2005 Transportation Research Record (1901), 33-43.
33. Yamaguchi,K., Sasaki,I., Nishizaki,I., Meiarashi,S., Moriyoshi,A., 2005, Reinforcing effects of carbon black on asphalt binder for pavement, Journal of the Japan Petroleum Institute, Vol. 48, No. 6, 373-379.
34. Kandhal,P.S., 1989, Lubold,C.W., Roberts,F.R., Water damage to asphalt overlays: case histories, Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists in Nashville, Tennessee.
35. Lavin,P., 2002, The effects of dusty agregates towards stripping in asphalt pavements, The Asphalt Institute Spring Meeting, Texas.
36. David,R., Johnson,E.I., 2002, Rehabilitation techniques for stripped asphalt pavements, Western Transportation Institute Civil Engineering Department Montana State University .
37. Little,D.N., David,R., Jones,I.V., Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements, Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar.
38. Majidzadeh,K., Brovold,F.N.,1968, Effect of water on bitumen- aggregate mixtures, State-of-the-Art, Highway Research Board Special Report No. 98, Washington, DC.
39. Tarrer,A.R., Wagh,V.,1991, The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding, Strategic Highway Research Program National Research Council Washington, D.C.
40. Fromm,H.J., 1974, The mechanisms of asphalt stripping from aggregate surfaces, Proc. Assoc. of Asphalt Paving Technologists, Vol. 43,191-223.
41. Terrel,R.L., Al-Swailmi,S., 1993, The role of pessimum voids concept in understanding moisture damage to asphalt concrete mixtures, Annual Meeting of the Transportation Research Board.
42. Taylor,M.A., Khosla,N.P.,1983, Stripping of Asphalt Pavements, State of the Art. Transportation Research Record 911.
43. Scott,J.A.N., 1978, Adhesion and disbonding mechanisms of asphalt used in highway construction and maintenance, Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 47, 19–48.
44. Kennedy,T.W., Roberts,F.L., Lee,K.W., 1984, Evaluating moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas boiling test, Transportation Research Record 968, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 45—54.
45. Tarrer,A.R., 1996, Use of hydrated lime to reduce hardening and stripping in asphalt mixtures, 4th Annual International Center for Aggregate Research Symposium, Atlanta, Ga.

46. Soloimanian,M.,Harvey,J.,Tahmoressi,M.,Tandon,V.,Test methods to predict moisture sensitivity of hot-mix asphalt pavements, Moisture sensitivity of asphalt Pavements:A National Seminar.
47. AASHTO T-182-84, 2002, Standard method of test for coating and stripping of bitumen-aggregate mixtures.
48. ASTM D-3625-96, 2001, Standard practice for effect of water on bituminous-coated aggregate using boiling water.
49. Curtis,C.W., Ensley,K., Epps,J., 1993, Fundamental Properties of Asphalt–Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption, SHRP-A-341. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
50. Cheng, D., Little,D.N., Lytton,R.L., Holtse,J.C., 2002, Use of surface free energy properties of asphalt–aggregate system to predict damage potential, Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists.
51. AASHTO T-283-03, Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage.
52. Aschenbrener,T. 1995, Evaluation of the Hamburg Wheel-Tracking Device to predict moisture damage in hot-mix asphalt., Transportation Research Record 1492, Transportation Research Board, Washington, DC, 193-201.
53. AASHTO TP34, 2002, Improved conditioning procedure for predicting the moisture susceptibility of hma pavements.
54. West,R.C., Zhang,J., Cooley,A.,2004, Evaluation of the asphalt pavement analyzer for moisture sensitivity testing, NCAT Report 04.
55. Kiggundu,B.M., Roberts,F.L., 1988, Stripping in hma mixtures: State-of-the-art and critical Review of test methods, NCAT Report 88.
56. Kim,S., Coree,B.J., 2005, Evaluation of hot mix asphalt moisture sensitivity using the nottingham asphalt test equipment, IHRB Project TR-483.
57. Mallick,R.B., Pelland,R., Hugo,F.,2005, Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt, The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 6, No. 2, 125–136.
58. Ullidtz,P.,1987, *Pavement Analysis*, Elsevier, Amsterdam.
59. Kuloğlu,N.,2001, Bitüm ve bitümlü sıcak karışımların rijitliğine etki eden parametreler, Turk J Engin Environ Sci, 25, 61-67.
60. Hınıslioğlu,S., 1998, An investigation on the Marshall and resilient characteristics of asphalt concrete with bituminous binder modified with high density polyethylene, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
61. Schmidt,R.J., 1972, Practical method for measuring the resilient modulus of asphalt treated mixes, Highway Research Record No.404, Highway Research Board, Washington,D.C.

62. ASTM D 4123-82, Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures.
63. Monismith,C.L., 1976, Rutting prediction in asphalt concrete pavements, Transportation Research Record No.616, 2-8.
64. Karayolları Genel Müdürlüğü, *Türkiyede asfalt betonu kaplamalar ve alternatifleri*, sayı 65, cilt 16.
65. BS 598 , Part 111, 1995, Method for determination of resistant to permanent deformation of bituminous mixes subjected to unconfined uniaxial loading.
66. BS DD-226, 1996, Method for determining resistant to permanent deformation of bituminous mixes subjected to unconfined dynamic loading.
67. ASTM D 3497, Test methods for dynamic modulus of asphalt concrete mixtures.
68. Aschenbrener,T., Terrel,R.L., Zamora,R., 1994, Comparison of the Hamburg Wheel-Tracking device and the environmental conditioning system to pavements of known stripping performance, (CDOT-DTD-R-94-1) Colorado Department of Transportation, Denver, CO.
69. Harvey,J.T., Deacon,J.A.,Tsai.B.,Monismith,C.L., 1995, Fatigue performance of asphalt concrete mixes and its relationship to asphalt concrete pavement performance in California, California Department of Transportation, Report no: RTA-65W485-2.
70. Pellinen,T.K., Christensen,D.W., Rowe,G.M., Sharrock,M.,2004, Fatigue transfer functions – how do they compare?, TRB 2004 Annual Meeting CD-ROM.
71. Emeritus C.A., O’Flaherty,A.M, 2002, *Highways, The Location, Design, Construction and Maintenance of Road Pavements*, Fourth edition, Butterworth Heinemann.
72. Huang,Y.H., 2004, *Pavement Analysis and Design*, Pearson Education, Inc.
73. Francken,L.,1998, *Bituminous Binders and Mixes*, Report of RILEM Technical Committee 152-PBM, London and New York.
74. Tığdemir,M.,1999, Bitümlü malzemelerin mekanik özelliklerinin parametrik incelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
75. ASTM D4867, 1996, Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures.
76. STP 204-15, 2000, Stripping potential and splitting tensile strength.
77. Al Quadi, I.L and all, 1994 Asphalt Portland cement concrete composite, Laboratory Evaluation, Vol 120, pp. 94-107, ASCE.
78. A Guide to the Design of Hot Mix Asphalt in Tropical and Sub-Tropical countries, 1987, Committee of State Road Authorities, South Africa.

ÖZGEÇMİŞ

Baha Vural KÖK, 1978 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlkokulu Elazığ Dumlupınar İlkokulu'nda, ortaokulu ve liseyi Elazığ Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır.

1996 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazanmış birinci sınıfın ikinci yarıyılı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne yatay geçiş yapmıştır. 2000 yılında aynı bölümden bölüm birincisi olarak mezun olmuştur. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programını kazanmış ayrıca İnşaat Mühendisliği Bölümüne araştırma görevlisi olarak atanmıştır. 2002 yılında İnşaat Anabilim Dalında yüksek mühendis unvanı almıştır. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Doktora Programını 2002 yılında kazanarak doktora programına başlamıştır.

KÖK, halen Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.