

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

KAĞIT ÜRETİMİNDE ELDE EDİLEN AĞAÇ YAĞI KATRANIN
ASFALT MODİFİKASYONUNDA KULLANABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI

Perviz AHMEDZADE

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

114365

Bu Tez, Tarihinde, Aşağıda belirtilen Jüri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu
İle Başarılı/Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

114365

Doç. Dr. Necati KULOĞLU
(Danışman)

Prof. Bekir YILDIRIM
(Jüri Üyesi)

Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN
(Jüri Üyesi)

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

ÖZET**DOKTORA TEZİ****KAĞIT ÜRETİMİNDE ELDE EDİLEN AĞAÇ YAĞI KATRANIN ASFALT
MODİFİKASYONUNDA KULLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Perviz AHMEDZADE

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2001, Sayfa : 84

Bu çalışmanın amacı Dalaman-Muğla Selüloz Kağıt (SEKA) fabrikasında kağıt üretiminden elde edilen ağaç yağının (Tall oil) tasfiyesi sırasında atık malzeme olarak alınan ağaç katranının (AK) (Tall oil pitch) bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliğini ortaya koymaktır. Bu çalışmada öncelikle bitüm ile modifikasyonda kullanılan AK'nın karıştırma sıcaklıklarının uygunlukları araştırılmış ve kimyasal yapıları incelenmiştir. Bitüm ve bitüme %1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oranlarında AK katkı maddesi ilavesi ile oluşturulan bağlayıcılar üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Daha sonra modifiye edilmiş bağlayıcılardan Marshall numuneleri hazırlanarak bu numunelerin Marshall stabilitesi, akma, boşluk oranları, teorik ve pratik yoğunluklar bulunmuş ve saf asfalt çimentosunu içeren numunelerin değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca %8 AK katkılı bitüm içeren Marshall numuneler oluşturularak, numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti ve yorulma deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda, %8 AK katkılı numunelerin Marshall stabilite değeri %17 oranında, R_{20} , R_{50} , R_s , R_D değerleri sırasıyla %10, %7, %15, %18 oranlarında ve yorulma ömrü değerleri 90kg, 100kg, 110kg'lık yüklemelerde, sırasıyla %35, %48, %37 oranlarında, katkısız bitüm içeren numunelerinin değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Sonuç olarak AK'nın asfalt betonu üzerinde olumlu yönde etkisi olduğu ve bitüm modifikasyonunda kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler : Asfalt çimentosu, Ağaç katranı, Modifiyer, Kaplama Karışımları

ABSTRACT

PhD Thesis

**INVESTIGATION OF TALL OIL PITCH OBTAINED FROM PAPER
PRODUCTION IN THE ASPHALT MODIFICATION**

Perviz AHMEDZADE

Firat University

Graduate School of Science and Technology

Department of Civil Engineering

2001, Page : 84

The aim of this study is to show that bitumen modification can be carried out with the waste product of Tall Oil of SEKA paper factory in Dalaman-Muğla which is called Tall Oil Pitch (TOP). Initially, in the study heating condition and chemical structure was examined for the TOP which was going to be used for bitumen modification. After adding the TOP to the bitumen at rates of 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7% and 8%, penetration, softening point, ductility and specific gravity tests were carried out. Later, Marshall samples were prepared by using the modified binder. Marshall stability, flow, void rates, theoretical and practical densities test results were compared with the pure asphalt cement test results. Marshall tests, fatigue tests, uniaxial tests were carried out on samples containing 8% with and without modified asphalt cement. Tests results has shown that Marshall stability values were increased at about 17%; R_{20} , R_{50} , R_s , R_d values increased respectively at about 10%, 7%, 15% and 18%, fatigue life for 90 kg, 100 kg and 110 kg were also increased 35%, 48% and 37% respectively with respect to pure bitumen values.

Finally it has been found that the TOP has positive effects on bitumen and could be used for bitumen modification.

Key Words : Asphalt Cement, Tall oil pitch, Modifier, Paving Mixtures

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın planlanmasında ve yürütülmesinde çalışmalarım süresi içinde benden destek ve ilgisini esirgemeyen, bilgi ve hoşgörülerinden yararlandığım, danışman hocam Sayın Doç. Dr. Necati KULOĞLU'na sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmamın gerçekleşmesinde katkıda bulunan ve imkan sağlayan F.Ü. Fen. Edebiyat Fak. Kimya Bölümü'nden Sayın Prof. Dr. Misir AHMEDZADE'ye, F.Ü. Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Sayın Prof. Bekir YILDIRIM'a ve Malzeme Laboratuvarı teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e, S.D.Ü. Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Sayın Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Mesut TIĞDEMİR'e, ayrıca çalışmanın her safhasında maddi ve manevi katkılarını esirgemeyen aileme de teşekkürü bir borç bilirim.

Perviz AHMEDZADE

Elazığ, Ağustos-2001

İÇİNDEKİLER

ÖZET	II
ABSTRACT.....	III
TEŞEKKÜR.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
RESİMLER LİSTESİ.....	IX
TABLolar LİSTESİ.....	X
SİMGELER LİSTESİ.....	XI
 1. GİRİŞ	 1
 2. POLİMERLERİN VE SANAYİ ATIKLARININ SICAK ASFALT	
KARIŞIMLARDA KULLANILMASI.....	4
2.1. Polimerler ve Ağaç Katranının Bitüm Modifikasyonunda Kullanılması...	4
2.2. Sanayi Atıklarının Agrega Malzemesi Olarak Sıcak	
Asfalt Karışımlarında Kullanılması	9
 3. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARININ TEST YÖNTEMLERİ.....	15
3.1. Laboratuvar çalışması.....	17
3.1.1. Penetrasyon Deneyi.....	17
3.1.2. Yumuşama noktası deneyi.....	18
3.1.3. Düktilite deneyi.....	19
3.1.4. Özgül ağırlık deneyi.....	21
3.1.5. Nükleer manyetik rezonans spektroskopisi (^1H NMR).....	21
3.1.6. Kızılötesi spektroskopisi (IRS).....	22
3.1.7. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC).....	23
3.1.8. Termogravimetrik metod (TGA).....	23
 4. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA UYGULANAN	
TEST YÖNTEMLERİ.....	24

4.1. Asfalt-Agrega Karışımı Yorulma Davranışı.....	24
4.1.1. Giriş.....	24
4.1.2. Yorulma Hipotezleri.....	25
4.1.3. Yükleme modu.....	26
4.1.4. Yorulma davranışı.....	27
4.1.5. İndirekt Çekme Testinde Kontrollü Deformasyon Artması ve Bozulma Durumları.....	29
4.1.6. Test limitleri.....	33
4.1.7. Test Şartları.....	34
4.2. Laboratuar Çalışması.....	34
4.2.1. Marshall Metodu deneyi.....	35
4.2.2. Serbest Basınç Mukavemeti Deneyi.....	39
4.2.3. Yorulma deneyi.....	41
 5. AĞAÇ KATRANI İLE BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MODİFİKASYONU.....	45
5.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	45
5.2. Bağlayıcılar ve Bitümlü Karışımlarla Yapılan Laboratuar Çalışmalarının Sonuçları.....	53
5.2.1. Penetrasyon Deney Sonuçları.....	53
5.2.2. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları.....	54
5.2.3. Düktilite Deney Sonuçları.....	55
5.2.4. Özgül Ağırlık Deney Sonuçları.....	56
5.2.5. Marshall Metodu Deney Sonuçları.....	57
5.2.6. Serbest Basınç Mukavemeti Deneylerinin Sonuçları.....	68
5.2.7. Yorulma Deney Sonuçları.....	73
 6. SONUÇ.....	78
 KAYNAKLAR.....	80
 EKLER	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 4.1. 3.1. Yükleme Modları (Porter, 1975).....	27
Şekil 4.1.3.2. Test modlarının karşılaştırılması (Porter, 1975).....	27
Şekil 4.1.4.1. Kontrollü gerilme ve kontrollü birim şekil değiştirme yorulma ömür çizgileri (Brown 1978).....	28
Şekil 4.1.5.1. 20°C’de tekrarlı yorulma testlerindeki düşey şekil değiştirmeler (SHRP A 404-A).....	29
Şekil 4.1.5.2. Sousa ve arkadaşları tarafından verilen 20°C’de bazı numunelerinin bozulma diyagramı (SHRP A404-A).....	30
Şekil 4.1.5.3. 4°C’de tekrarlı yorulma testlerindeki düşey şekil değiştirmeler (SHRP A 404-A).....	30
Şekil 4.1.5.4. Sousa ve arkadaşları tarafından verilen 20°C’de bazı numunelerinin bozulma diyagramı (SHRP A404-A).....	31
Şekil 4.1.5.5. Hudson ve Kennedy’nin belirlediği çatlak tipleri (SHRP A404-A)	32
Şekil 4.2.3.1. Deney programı akış diyagramı (Tığdemir ,1999).....	44
Şekil 5.1.1. AC 100/150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun TGA eğrisi.....	45
Şekil 5.1.2. AC 100/150 asfalt çimentosunun DSC eğrisi.....	46
Şekil 5.1. 3. AC 100/150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun IRS eğrisi.....	47
Şekil 5.1. 4. AC 100/150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun ⁻¹ H NMR eğrisi....	47
Şekil 5.1.5. AK’nın SEKA fabrikasında elde edilme şekli.....	48
Şekil 5.1.6. Ağaç katranının TGA eğrisi.....	49
Şekil 5.1.7. Ağaç katranının DSC eğrisi.....	50
Şekil 5.1.8. Ağaç katranının IRS eğrisi.....	51
Şekil 5.1.9. Ağaç katranının ⁻¹ H NMR eğrisi	51
Şekil 5.2.1.1. AK % - Penetrasyon ilişkisi.....	54
Şekil 5.2.2.1. AK % - Yumuşama noktası ilişkisi.....	55
Şekil 5.2.4.1. AK % - Özgül ağırlık ilişkisi.....	57
Şekil 5.2.5.1. Bitüm % - Pratik birim ağırlık ilişkisi.....	59
Şekil 5.2.5.2. Bitüm % - Boşluk % ilişkisi	59
Şekil 5.2.5.3. Bitüm % - Agregalar arasındaki boşluk ilişkisi	60
Şekil 5.2.5.4. Bitüm % - Bitümle dolu boşluk yüzdesi ilişkisi.....	60

Şekil 5.2.5.5. Bitüm % - Akma ilişkisi.....	61
Şekil 5.2.5.6. Bitüm % - Stabilite ilişkisi.....	61
Şekil 5.2.5.7. AK % - Pratik birim ağırlık ilişkisi.....	65
Şekil 5.2.5.8. AK % - Boşluk yüzdesi ilişkisi.....	65
Şekil 5.2.5.9. AK % - Agregalar arasındaki boşluk ilişkisi.....	66
Şekil 5.2.5.10. AK % - Bitümle dolu boşluk yüzdesi.....	66
Şekil 5.2.5.11. AK % - Akma ilişkisi.....	67
Şekil 5.2.5.12. AK % - Stabilite ilişkisi.....	67
Şekil 5.2.6.1. Su absorpsiyon yüzdesi değerleri , S.....	70
Şekil 5.2.6.2. 20°C'de serbest basınç mukavemeti değerleri , R_{20}	70
Şekil 5.2.6.3. 50°C'de serbest basınç mukavemeti değerleri , R_{50}	71
Şekil 5.2.6.4. Doygun yüzey-kuru numunenin serbest basınç mukavemet değerleri , R_s	71
Şekil 5.2.6.5. 25 devre donma-çözülme periyotlardan sonra serbest basınç mukavemet değerleri , R_D	72
Şekil 5.2.6.6. Dona karşı dayanıklılık katsayısı değerleri , K_D	72
Şekil 5.2.6.7. Suyu dayanıklılık katsayısı değerleri , K_S	73
Şekil 5.2.6.8. Isıya dayanıklılık katsayısı değerleri , K_I	73
Şekil 5.2.7.1. Birim çekme şekil değiştirme-Yorulma ömrü (yükleme sayısı) ilişkisi (katkısız numuneler).....	76
Şekil 5.2.7.2. Birim çekme şekil değiştirme-Yorulma ömrü (yükleme sayısı) ilişkisi (%8 AK katkılı numuneler).....	76
Şekil 5.2.7.3. Yükleme -Yorulma ömrü (yükleme sayısı) ilişkisi.....	77

RESİMLER LİSTESİ

Resim 3.1.1.1. Penetrasyon cihazı ve numuneler.....	18
Resim 3.1.2.1. Yumuşama noktası cihazı.....	19
Resim 3.1.3.1. Düktilite cihazı.....	20
Resim 4.2.1.1. Karıştırıcı.....	36
Resim 4.2.1.2. Otomatik ayarlı sıkıştırma tokmağı	36
Resim 4.2.1. 3. Elektronik Marshall yükleme ve akma ölçme aygıtı.....	37
Resim 4.2.2.1. Elektronik basınç direnç deney aleti.....	40
Resim 4.2.3.1. Yorulma deneyi için numune sabitleme çerçevesi.....	41
Resim 4.2.3.2. Tekrarlı çekme indirekt yükleme deney aletinin genel görünümü.....	42
Resim 4.2.3.3. Yorulma deney aleti, pnömatik yükleme sistemi ve bilgisayar-kontrol ünitesi	42

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1.1. Ağaç katranının kimyasal bileşimi (Beyşer, 1989).....	7
Tablo 2.1.2. Mineral agrega cinslerinin özellikleri (Beyşer, 1989).....	8
Tablo 2.1.3. Termoplastik betonların fiziko-mekanik özellikleri (Beyşer, 1989)..	8
Tablo 3.1. Standart test yöntemleri (Francen, 1997).....	15
Tablo 3.2. Standart olmayan test yöntemleri (Francen, 1997).....	16
Tablo 5.1.1. Asfalt çimentosunun fiziksel özellikleri.....	45
Tablo 5.1.2. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri.....	52
Tablo 5.1.3. Şartname Tip 1'in gradasyon limitleri.....	52
Tablo 5.2.1.1. Penetrasyon deney sonuçları.....	54
Tablo 5.2.2.1. Yumuşama noktası deney sonuçları.....	55
Tablo 5.2.3.1. Düktilite deney sonuçları.....	56
Tablo 5.2.4.1. Özgül ağırlık deney sonuçları.....	56
Tablo 5.2.5.1. Marshall metodu dizayn değerleri.....	58
Tablo 5.2.5.2. Katkısız ve AK katkılı numunelerinin Marshall metodu deney değerleri.....	63-64
Tablo 5.2.6.1. Serbest basınç mukavemeti deneylerinin sonuçları.....	69
Tablo 5.2.7.1. Yatay deformasyonlar ve yorulma ömrü (yükleme sayısı) değerleri (katkısız numuneler).....	74
Tablo 5.2.7.2. Yatay deformasyonlar ve yorulma ömrü (yükleme sayısı) değerleri (%8 AK katkılı numuneler).....	74
Tablo 5.2.7.3. Birim çekme şekil değiştirme ve yorulma ömrü (yükleme sayısı) değerleri (katkısız numuneler).....	75
Tablo 5.2.7.4. Birim çekme şekil değiştirme ve yorulma ömrü değerleri (yükleme sayısı) (%8 AK katkılı numuneler).....	75
Tablo 5.2.7.5. Yorulma ömrü (yükleme sayısı) değerleri.....	77

SİMGELER LİSTESİ

A	:	Briketin Havadaki Ağırlığı (gr)
B	:	Briketin Sudaki Ağırlığı (gr)
C	:	Briketin Havadaki Doygun-Yüzey Kuru Ağırlığı (gr)
D _p	:	Pratik Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
D _T	:	Teorik Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
E	:	Eğilme Modülü (Mpa)
Endo	:	Endotermik Isı Akışı (mW)
Exo	:	Ekzotermik Isı Akışı (mW)
F	:	Kenetlenme Kuvveti (MPa)
G	:	Bağlayıcının Ağırlığı (gr)
G _{ag}	:	Agrega Karışımının Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)
G _b	:	Bağlayıcının Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)
G _f	:	Filler'in Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)
G _i	:	İnce Agreganın Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)
G _k	:	Kaba Agreganın Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)
K _d	:	Dona Karşı Dayanıklılık Katsayısı
K _I	:	Isıya Dayanıklılık Katsayısı
K _S	:	Suya Dayanıklılık Katsayısı
M _a	:	Briketteki Kuru Agreganın Ağırlığı (gr)
M _b	:	Briketteki Bağlayıcının Ağırlığı (gr)
MF	:	Yüklemeye Mod Faktörü
N _f	:	Yorulma Ömrü (Tekrarlı Yük Sayısı)(adet)
P _f	:	Filler'in Yüzdesi
P _i	:	İnce Agreganın Yüzdesi
P _k	:	Kaba Agreganın Yüzdesi
P _o	:	Piknometre Ağırlığı (gr)
P ₁	:	Piknometre + Saf Su Ağırlığı (gr)
P ₂	:	Piknometre + Etil Alkol Ağırlığı (gr)
P ₃	:	Piknometre + Bağlayıcı + Etil Alkol Ağırlığı (gr)
R _ç	:	Numunenin 20°C'de Çekme Dayanımı (Mpa)

R_d	:	25 Devre Donma-Çözülme Periyotlarından Sonra Numunenin Serbest Basınç Mukavemeti (kg),
R_K	:	Etüvde Kurutulmuş Numunenin Serbest Basınç Mukavemeti (kg)
R_s	:	Doygun-Yüzey Kuru Numunenin Serbest Basınç Mukavemeti (kg)
R_{20}	:	20°C’de Numunenin Serbest Basınç Mukavemeti (kg),
R_{50}	:	50°C’de numunenin serbest basınç mukavemeti (kg)
S	:	Su Absorbsiyon yüzdesi
S_0	:	Karışımın Başlangıç Sertlik Modülü
T	:	Işın Geçirgenliği (%)
V	:	Briketin Hacmi (cm)
V_a	:	Briketteki Agreganın Hacim Olarak Yüzdesi
V_b	:	Briketteki Bağlayıcının Hacim Olarak Yüzdesi
V_f	:	VMA’nın Bağlayıcıla Dolu Boşluk Yüzdesi
V_h	:	Boşluk Yüzdesi
VMA	:	Briketteki Agregalar Arasındaki Boşluk Yüzdesi
W	:	Su Muhtevası Yüzdesi
W_a	:	Kuru Agregaya Göre Bağlayıcı Yüzdesi
W_b	:	Toplam Ağırlığa Göre Bağlayıcı Yüzdesi
δ	:	Kimyasal Kayma (ppm)
ϵ_o	:	Birim Çekme Şekil Değiştirmesi
γ	:	Bağlayıcının Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)
γ_k	:	Kuru Birim Ağırlık (gr/cm ³)
σ_o	:	Başlangıç Çekme Gerilmesi

1. GİRİŞ

Toplam 60 000 km'yi bulan Türkiye karayolu ağında 5000 km'lik devlet ve il yolu ve 1500 km.'lik otoyolun üstyapıda kaplama olarak Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) kullanılmıştır. Otoyol gibi çok maliyet gerektiren yüksek standartlı yollarda toplam maliyetinin % 15-25'lik kısmını bitümlü üstyapı tabakaları, bitümlü tabakaların maliyetinin de % 35-40'nı bitüm maliyeti oluşturmaktadır (Birliker, 1998).

Yol üstyapısının her bir tabakasında kullanılan malzemeler, yolun öngörülen ömür ve konfor seviyesinin sağlanması bakımından büyük önem taşırlar. Esnek yol üstyapısını oluşturan bağlayıcı ve agregaların özellikleri esnek üstyapının performansını etkiler.

Esnek yol üstyapılarının ana malzemelerinden biri olan ve bu çalışmanın da esas konusu olan bitüm, visko-elastik davranış gösteren, termo-plastik bir malzeme olup, trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığa bağlı olarak farklı davranışlar gösterir.

Bitümlü bağlayıcıların yol malzemesi olarak özelliklerinin belirlenmesinde, bilinen yöntemlerle birlikte günümüzün teknolojisinin sağladığı olanaklar da kullanılarak yeni yöntemler kullanılmakta ve bu konuda çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Esnek üstyapı kaplamalarında görülen tekerlek izi, ondülasyon, çatlama, soyulma gibi trafik yükü ve iklim koşullarına bağlı olarak meydana gelen bozulmalara karşı bitümlü bağlayıcılara ve bitümlü karışımlara çeşitli katkı maddeleri eklenerek bitümün modifiye edilmesi konusundaki çalışmalar son yıllarda oldukça yoğunlaşmış olarak birçok ülkede sürdürülmektedir.

Yol üstyapısının kullanılacağı bölgedeki iklim ve coğrafya koşullarına göre uygun bitümün seçilmesinde ve gerekiyorsa modifiye bitümün kullanılmasında, bağlayıcı özelliklerinin klasik yöntemlerle birlikte yeni yöntemlerin de kullanılarak belirlenmesi ve bunların esas alındığı yeni şartnamelerin hazırlanma çalışmaları yapılmaktadır.

Genel anlamda bu şekilde ifade edilebilen, bitümün modifiye edilme sebepleri maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir (Uluçaylı, 1998).

1. Düşük servis sıcaklıklarında daha yumuşak karışımlar elde etmek ve böylece çatlakları azaltmak,

2. Yüksek servis sıcaklıklarında daha sert karışımlar elde etmek ve böylece tekerlek izlerini (oluklanmayı) azaltmak,
3. Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek,
4. Uygulama sıcaklıklarında viskoziteyi düşürerek işlenebilirliği ve sıkışmayı geliştirmek,
5. Karışımların mukavemet ve stabilitesini arttırmak,
6. Karışımların aşınma direncini arttırmak ve çözülmeyi azaltmak,
7. Sertliğini kazanmamış yumuşak karışımların sertleşmesini hızlandırmak,
8. Karışımların yorulma direncini arttırmak,
9. Verimi çok düşük olan asfalt çimentolarının verimini arttırmak,
10. Yaşlanmış (kullanılmış) asfalt bağlayıcıları gençleştirmek,
11. Asfalt bağlayıcıları ve karışımlarını güncelleştirmek,
12. Düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirmek,
13. Agregaların üzerinde daha kalın bağlayıcı filmleri oluşturarak, bağlayıcı ve agregaların birbirine yapışma özelliğini iyileştirip soyulmayı azaltmak,
14. Akmayı yada terlemeyi azaltmak,
15. Kaplama tabakalarının yapısal kalınlıklarını azaltmak,
16. Yapım mevsimini uzatmak,
17. Yaşlanmaya yada oksidasyona karşı dayanımı arttırmak ve uygulama alanlarını zenginleştirmek,
18. Kaplamaların her bakımdan performansını yükseltmek ve uzun vadede ekonomik olmasını sağlamaktır.

Üstyapı kaplamasından beklenen, ancak klasik bağlayıcılar ile sağlanmayan bu özelliklerin sağlanabilmesi, günümüzün teknolojik olanakları da kullanılarak, bağlayıcının yada karışımın katkı maddeleriyle modifiye edilmesi sonucunda mümkün olabilmektedir (Uluçaylı, 1998).

Modifikasyon işlemi genel olarak iki türlü yapılabilmektedir, bunlar:

1. Katkı maddesi bitüme katılarak, ‘modifiye bitüm’ elde edilir.
2. Katkı maddesi, asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılarak, ‘modifiye karışım’ elde edilir.

Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüme çeşitli standart test yöntemleri uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişmelerin tespit edilmesi mümkündür. Böylece,

modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirmesi yapılabilmektedir. Ancak, bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ilave ekipmanlar gerekmemekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması, taşınması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır.

Karışımın modifikasyonunda ise, katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ilave karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma v.s. gibi sorunlarla karşılaşmamakta, ancak bu durumda da karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirmesi pratik olmamaktadır.

Bilindiği gibi bağlayıcı özelliklerin belirlenmesinde uygulanan test yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan test yöntemlere göre daha pratik ve daha kısa sürelerle yapılabilmektedir. Karışıma yönelik testlerde, daha uzun sürelerle, daha fazla işlemlere ve daha kapsamlı test ekipmanlarına gereksinim duyulmakla birlikte üstyapı performansının belirlenmesi ve değerlendirilmesinde daha temsili olmaktadır. Ancak, ülkemizde konuyla ilgili kurumlardaki laboratuvarlarda karışımlara yönelik test imkanlarının gelişmiş ülkelere göre düşük seviyede olduğu bilinmektedir. Karışıma yönelik test imkanlarının ülkemize transfer edilmesi ile gerek klasik üstyapı karışımlarının performanslarının daha sağlıklı bir şekilde tespit edilmesi bakımından gerekse bu karışımların iyileştirilmesi amacıyla kullanılacak katkı maddelerinin amacına uygun seçilmelerinde büyük faydalar sağlanacaktır (Uluçaylı, 1998).

Son yıllarda oldukça yoğunlaşan modifiye bitümler konusundaki araştırmalar ve çalışmalarda bitümlerin polimer maddeleriyle modifiye edilmesi görülmekte ve hatta katkı maddelerinin polimer olanlar yada polimer olmayanlar olarak ikiye ayrıldığı görülmektedir (Kuloğlu, Ahmedzade, 1999; Morrison, 1994). Diğer taraftan, katkı maddesi olarak, bağlayıcı özelliklere sahip doğal maddeler ve sanayi atıkları kullanılmaktadır (Kuloğlu, 1999).

Bu çalışmada, Dalaman-Muğla Selülöz Kağıt (SEKA) fabrikasında kağıt üretimden elde edilen ağaç yağının (Tall Oil) tasfiyesi sırasında atık malzeme olarak alınan Ağaç Katranı (AK) (Tall Oil Pitch) incelenmiş ve onun bitümlü sıcak karışımlarda bir katkı maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

2. POLİMERLERİN VE SANAYİ ATIKLARININ SICAK ASFALT KARIŞIMLARDA KULLANILMASI

2.1. Polimerler ve Ağaç Katranının Bitüm Modifikasyonunda Kullanılması

Son yıllarda, asfaltın reolojik yapısını iyileştirmek amacı ile çeşitli polimerler asfalt bağlayıcılara karıştırılarak kullanılmaktadır.

Polimerlerin asfalt bağlayıcıya ilave edilmesi fikri yeni değildir. Polimerlerle modifiye edilmiş bitüm için ilk patent 1823 yılında ve ikinci patent 1844 yılında verilmiştir. Batı Avrupa'da bilinen çok sayıdaki polimer, asfalt modifikasyonunda kullanılarak incelenmiştir. Bunlar; polietilen, stiren, random ve blok kopolimeri, etilen, vinil asetat kopolimeri, polipropilen, neopren ve diğer polimerlerdir (Zanzotto, 1987).

Asfalt bağlayıcının modifiyesi için siyah karbon ve bir takım polimerler incelenmiştir. Asfaltları siyah karbonla modifiye etme fikri ilk defa 1962'de Martin tarafından ileri sürülmüştür (Martin, 1962). Martin, % 3 oranında siyah karbonu asfalta kattığında asfaltın erime sıcaklığına herhangi bir önemli etkisinin olmadığını gözlemiştir.

Daha sonra siyah karbonun bitüme ilave edilmesi konusunda çalışan ve katkıda bulunan Rostler (1977) olmuştur. Martin'in sonuçlarının iyi olmamasını, siyah karbonun konsantrasyonuna ve bağlayıcıyı çalışılabilir bir viskoziteye getirebilmek için yağ ilavesine bağlamıştır. Asfalt içerisinde siyah karbon dağılımı da incelenmiş olup, siyah karbonun asfalta dağılabilmesi için en küçük zerre çapının 70×10^{-3} mikron olması gerektiği belirtilmiştir.

Monismith (1986) siyah karbonun, kaplama karışımının sertliğini arttırdığını, özellikle yüksek sıcaklıkta normal asfaltda daha iyi olduğunu göstermiştir.

Gregg ve Alkone (1954) polimerlerin bitümün ısı hassasiyetine, viskozite ve penetrasyon derecesine etki ettiğini göstermiştir.

Thompson (1961) yapılan çalışmada neoprini asfalt bağlayıcıya ilave ederek dayanıklılığını artırdığını göstermiştir.

Ali ve diğ.(1994) çalışmalarında polimerle modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, sıcaklığın kaplama karışımının mekanik özellikleri ve modifiyelerin kaplama karışımlarının performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kaplama karışımlarının mekanik özellikleri üzerinde modifiyelerin

etkilerini incelemek için iki deney seti hazırlanmıştır. İlk deneyde kaplama karışımlarının elastik ve viskoelastik özelliklerinde modifiyelerin bağıl etkileri ölçülmüştür. İkinci deneyde, kaplama karışımının yorulma ömrü üzerinde modifiyelerin etkileri belirlenmiştir. Agregası cinsi, agregası gradasyonu, karışım yoğunluğu, hava boşluğu, karıştırma süresi sabit tutulmuştur. Çalışma 4 aşamada yapılmış ve birinci aşamada hiçbir modifiye kullanılmamıştır. Bunu izleyen diğer üç aşamada sırasıyla karbon, lateks ve polimer kullanılmıştır. Bunların bağlayıcı yüzdesi sabit tutulmuş ve 5 değişik sıcaklık altında (-17°C, 5°C, 21°C, 40°C ve 60°C) sıkıştırılmış örnekler test edilmiştir. Bağlayıcı olarak AC-5, AC-10 ve AC-20 asfaltlar kullanılmıştır.

Modifiye edilmiş karışımların kaplama performansına olan etkisini tayin etmek için son dayanıklılık indeksi 2,5 kabul edilmiştir. Sonuçlara göre kaplama kesitlerinin servis ömrü bağlayıcının tipine göre değişmiştir. Asfalt bağlayıcıya siyah karbon veya polimer katıldığında kaplama ömrü büyük derecede artarken, lateks katkı maddesinin daha az bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. (Ali ve diğ.,1994).

Araştırmalar, bütün katkı maddelerinin asfaltın sıcaklık hassasiyetini iyileştirdiğini göstermiştir. Aglan ve diğ. (1994) tarafından yapılan çalışmalara göre, stiren-butadien-stiren (SBS)'nin polimer maddelerin içerisinde en iyilerinden biri olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Katkı maddesi içeren karışımların 60°C (140°F) sıcaklık altında 7 gün bekletildiklerinde yorulma ömrü bekletilmemiş olanlara nazaran gözle görülür bir şekilde azalmıştır. Kontrollü yer değiştirme yorgunluğu altında SBS katkı maddesi en iyi sonucu 0,56°C (33°F) 'de vermiştir. Son yapılan çalışmalarda, özellikle AC-5 asfaltın en faydalı karışımlardan biri olarak düşünüldüğü için gözler SBS (Kraton) üzerine çevrilmiştir.

Deneylede agregası malzemesi olarak kırılmış kireç taşı ve kuvarslı kum kullanılmıştır. Termoplastik elastomerlerin genel grubuna ait olan Kraton modifiyer olarak seçilmiştir. Ağırlık olarak % 6, 10 ve 15'lik üç karışım hazırlanmıştır. Oluklanmış numuneler, eğilme mukavemetini ve eğilme modülü E'yi belirlemek için oda sıcaklığında (21°C) statik eğilme altında test edilmiştir.

Katkı maddelerin oranları yükseltildikçe, hem eğilme mukavemeti hem de eğilme modülü yükselmiştir. Böylece test edilen katkı maddesi oranları içerisinde, sert polisteren son blokların eğilme mukavemetini ve modülünü yükselttiği ortaya çıkmıştır. Kraton oranının % 15'den daha fazla artması malzemeyi sertleştirmiş ve orta

bloklarının üzerinde bulunan polisteren sert blokların çatlak yayılmasına karşı daha az mukavemetli ve daha fazla kırılabilir olmasına neden olmuştur. Pratikte, ağırlık olarak % 6 veya daha az miktarlarda katkı maddesi yaygın bir şekilde kullanılmıştır. % 6 katkı maddesinden daha fazla eklemek ekonomik olarak mümkün olmamasına rağmen, modifiye edilmiş asfalt çimentosu karışımlarının mekanik davranışlarındaki temel değişimleri anlamak için % 10 ve % 15 gibi daha yüksek oranlardaki yüklemeler kullanılmıştır. Ayrıca modifiye edilmiş bağlayıcıların 100 defa büyütürük mikroyapısı incelenmiştir. SEM sonuçlarının incelenmesi neticesinde, hem eğilme statığının hem de eğilme yorulması sonuçlarının tamamıyla birbirlerini destekledikleri görülmüştür. Kraton modifiyelerinin yüzdesi artarken mukavemet ve eğilme modülü de artmıştır. Bu artma polisteren sert blokların ve yumuşak butadien orta blokların sırasıyla yaptıkları katkıdan dolayı olmuştur (Aglan ve diğ., 1994).

Williamson, Gaughan (1992), modifiye bitümlerle imal edilmiş yollardaki plastik deformasyon ve yorulma çatlaklarını incelemişlerdir. Sonuçta, atık kauçuk katkılı modifiye bitümlü karışımlar, en iyi dayanımı göstermişlerdir.

Günümüzde hızlı nüfus artışı, ekonomik kalkınma ve hayat standartlarının yükselmesi ile birlikte ülkelerdeki ulaşım talebi de hızla artmıştır. Bu sektörde kullanılan tabii kaynakların kısıtlı olması nedeniyle malzeme maliyetleri yükselmiştir. Bu nedenle endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması çok yönlü yarar sağlayabilecek bir konu olmuştur. Bu atıkların kullanımı ile, bir taraftan sınırlı tabii kaynakların hızlı tüketimi önlenirken diğer taraftan da atıkların sebep olduğu çevre problemlerine bir ölçüde çözüm getirilmiştir. Ayrıca, alışılmış malzemelerin yerine daha ekonomik ve daha iyi özelliklere sahip malzemelerin üretimi mümkün olabilmektedir.

Bu atıklar bitüm kadar universal bağlayıcı değildir, fakat tatbikat göstermiş ki, bunların özellikleri belli bir istikamette iyileştirildiğinde geleneksel bağlayıcıların yerini tutabilmektedir.

Ülke ve elde edilme şekline bağlı olarak çok çeşitli terkiplerde ağaç katranı vardır ve bu konuda yapılan pek çok araştırmalar mevcuttur (Johnson, 1995; Korhonen, 1996; Uusitalo, 1994).

Örneğin, Rusya'nın kuzey bölgesinde bulunan Solombal, Kotlas ve Segej selüloz-kağıt fabrikalarından elde edilen ağaç katranının kıvamlılığı 40/60 penetrasyonlu

katı asfaltlar ile $C_{60}^5 = 70-130$ sn viskoziteye sahip likit bitümler arasında değişmiştir. Katran bitüme ilave edildiğinde, 0°C ve 25°C deney sıcaklıklarında, bitümün penetrasyonu ve duktilitesi artmıştır. Kimyasal bileşimi Tablo 2.1.1'de verilmiştir (Beyşer, 1989).

Tablo 2.1.1. Ağaç katranının kimyasal bileşimi (Beyşer, 1989)

Kimyasal bileşimi	(%)
Reçine asitler	0,6-16
Doymuş karboksilik asitler	4,23
Yükseltgenmiş ve nötr maddeler	67-86

Ayrıca katranın asitlik sayısı bulunmuştur. Bu değer 27-70 mgr/gr arasında değişmektedir. Atık malzemenin yumuşama noktası $15-43^\circ\text{C}$ ve özgül ağırlığı $0.97-1.03 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır.

Bunun dışında ağaç katranın bir katkı maddesi olarak asfalt betonu üzerinde etkisini daha iyi bir şekilde anlamak için farklı cins agregalardan deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler termoplastik beton olarak adlandırılmıştır. Deneylerde kullanılan katranın yumuşama noktası 22°C ve asitlik sayısı 47.7 mgr/gr olurken, agregaların özellikleri aşağıdaki Tablo 2.1.2.'de verilmiştir. Termoplastik betonların fiziko-kimya özellikleri, silindir şeklinde çapı ve yüksekliği 7cm olan numuneler üzerinde tespit edilmiştir. Numunelerde kullanılan agreganın en büyük tane boyutu 5mm'dir.

Yapılan deneyler sonucunda termoplastik betonların serbest basınç mukavemet değerleri (R_{20} , R_{50} , R_S), kenetlenme (F) ve su absorpsiyonu (S) bulunmuştur. Bulunan sonuçlar Tablo 2.1.3'de verilmiştir (Beyşer, 1989).

Kenetlenme hesap yöntemiyle bulunmuştur :

$$F = \frac{1}{2} \sqrt{R_{20} R_C} \quad (2.1.)$$

Numune içerisinde hava boşluğu agregası cinsine göre %3,3-3,7 arasında değişmektedir. Tablo 2.1.3'e göre mineral agregası içerisinde silisyum dioksit (SiO_2) miktarı azaldıkça, alınan değerlerde bir artış gözlenmiştir. En düşük değerlere granit karışımı numuneler sahiptir. Biraz daha iyi sonucu şist karışımı numuneler vermiştir. Bunun nedeni şist taşlarının oluşumunda bulunan biyotit ve amfibol yüzeylerinde

serbest katyonların K^+ , Mg^{2+} , Fe^{3+} olmasıdır. Bu katyonlar ağaç katranın karboksilik asidi ile reaksiyona girerek gereken tuzları oluşturur. Fiziko-mekanik özelliklerin en iyi değeri, şist ve karbonatlı taşlardan oluşan termoplastik betonlar vermektedir. Bunun sebebi, agregaların büyük ölçüde baz topraklarının ve ağır metallerinin oksitlerinden meydana gelmesidir. Bu tür mineral agregaya kullanıldığı takdirde termoplastik betonların kenetlenme kuvveti (F), asidik taşlardan oluşan termoplastik betonlardan iki kat daha fazladır (Beyşer, 1989).

Tablo 2.1.2. Mineral agregası cinslerinin özellikleri (Beyşer, 1989)

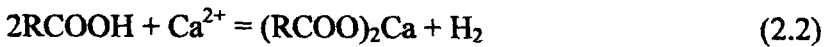
Agrega Cinsi	Mineral bileşimler (%)	Kimyasal bileşimler (%)
Granit	Kuarsit 94	SiO_2 97
	Mikrokuarsit 3	$K_2O + N_2O$ 2,8
	Serisit 2	Metamorfik asidik taş
	Biyotit 1	
Şist	Demir klorit ($FeCl_3$) 60	SiO_2 48
	Plajiolklas 24,9	$K_2O + N_2O$ 3,4
	Şist 7,1	Metamorfik bazı taş
	Kalsit 8	
Kalker	Kalsit 89	SiO_2 2
	Dolomit 11	Tortul karbonatlı taş

Tablo 2.1.3. Termoplastik betonların fiziko-mekanik özellikleri (Beyşer, 1989)

Agrega cinsi	Deneyler			
	R_{20} , (Mpa)	R_{50} , (Mpa)	R_s , (Mpa)	Kenetlenme F, (Mpa)
Granit	1,87	0,31	0,55	0,3
Şist	3,28	1,58	1,33	0,75
Kalker	3,76	2,21	3,42	0,67

Genel olarak mineral agregası ile katran arasındaki kimyasal absorbsiyon reaksiyonları aşağıda gösterilmiştir.

Agrega malzemesi – kalker :



Agrega malzemesi – şist :



Bu reaksiyonlar sonucunda katranın, yüksek karboksilik asitlerden (abietinik, oleik ve onun türevleri) meydana gelen kalsiyum ve demir tuzları, katranın ve mineral agrega arasında kuvvetli adhezyon bağların oluşmasına sebep olduğu görülmektedir (Beyşer, 1989).

2.2. Sanayi Atıklarının Agrega Malzemesi Olarak Sıcak Asfalt Karışımlarında Kullanılması

Sanayi atıkların sıcak asfalt karışımlarda bir bağlayıcı olarak kullanılmasının dışında, bir agrega malzemesi olarak da kullanılması mümkündür.

Örneğin; fosfor cürufu endüstriyel bir atık madde olarak bulunduğu halde yeterli derecede faydalanılmayan bir maddedir. Fosfor cüruflarının yol inşaatında kullanılması halinde diğer agrega malzemelerinden tasarruf sağlanacak ve diğer taraftan, fosfor cürufunun kullanım alanı bulunmuş olacaktır (Julay, 1989).

Fosfor cürufları istihsal şekline bağlı olarak iki gruba ayrılmıştır.

- Dökme fosfor cürufları.
- Granül fosfor cürufları.

Dökme ve granül şeklinde fosfor cüruflar yapı ve özelliklerine göre birbirlerinden farklıdır, fakat kimyasal bileşimleri aynıdır. Fosfor cürufları sağlam bir yapıya sahiptirler ve içindeki silikat, demir, magnezyum oksitleri çok azdır. Ayrıca fosfor cürufunda P_2O_5 miktarı çok azdır.

Petrografik ve röntgen analizleri ile dökme ve granül fosfor cürufun yapısı, mineralojik ve faz yapısı tayin edilmiştir. Fosfor cürufun esas kristal fazı – pseudovolastonittir (α -CaO·SiO₂), miktarı %60-65 arasında değişmektedir. İkinci kristal faz – melinitir (%20-25). Bu faz ikiye ayrılmaktadır : okermanit (2CaO·Mg·2SiO₂) ve galenit (2CaO·Al₂O₃·SiO₂). Ayrıca fosfor cürufunda az miktarda kuspudin ve apatit (%5-7) mevcuttur. Cam ise kristaller arasındaki küçük boşlukları doldurmaktadır. Granül şeklindeki fosfor cürufları esasen renksiz camsı maddelerden oluşur. Bunların miktarı %80-90'dır, kalan kısmı kristallerdir (Julay, 1989).

Fosfor cürufu asfalt beton özelliklerinin incelenmesi için, farklı tip bileşime sahip asfalt beton numuneler üzerinde bir takım deneyler yapılmıştır. Kıyaslama amacıyla aynı deneyler doğal mineral malzeme karışimli asfalt beton numuneleri üzerinde de yapıldı. Bağlayıcı olarak AC 60/90 ve AC 90/120 asfalt çimentoları

kullanılmıştır. Fosfor cürufu asfalt beton numuneler serbest basınç mukavemeti deneyine tabi tutulmuştur. Bulunan serbest basınç mukavemet değerleri, 20°C'de 4,5-4,8 MPa, 0°C'de ise 10,0-11,0 MPa idi. Bu değerler GOST 9128-76 standartlara uymuştur.

Yaz mevsiminde bazı yerlerde hava sıcaklığı 60-70°C'ye çıktığından dolayı, serbest basınç mukavemeti deneyi hem standart deney sıcaklığında (50°C), hem de 70°C'de yapılmıştır. Deney sonuçları, fosfor cürufu asfalt beton numunelerinin 50°C'deki mukavemet değerleri, normal asfalt betonun mukavemet değerlerinden %20 daha büyük olduğunu göstermiştir. Ayrıca 70°C deney sıcaklığında fosfor cürufu asfalt betonların serbest basınç mukavemet değerleri, katkısız asfalt betonların serbest basınç mukavemet değerleri ile hemen hemen aynıdır. Bu da fosfor cürufu asfalt betonların sıcak havalarda, şekil değiştirmeye karşı gerekli dirence sahip olduğunu göstermektedir.

Fosfor cürufun kimyasal bileşiminden dolayı, fosfor cürufu asfalt betonlarda kabarma gözlenmemiş ve su absorpsiyonu, suya dayanıklılık katsayısı (K_s) standartlara uymuştur (GOST 9128-76). Ayrıca asfalt beton numuneler, uzun süreli suya dayanıklılık testine tabi tutulmuştur. Granit ve fosfor cürufu asfalt beton numuneler hazırlanıp 18 ay suda bekletilmiş ve sonuçta granit içerikli numunelerin %54 kadar dayanıklılığı düşerken, fosfor cürufu numunelerde bu düşüş sadece %23 olmuştur.

Bunun dışında, fosfor cürufu asfalt beton numunelerin, soğuğa karşı dayanıklılığını tespit etmek amacıyla donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Deney 0°C, -10°C, -25°C'de yapılmıştır. 75 devre donma-çözülme periyotlar sonunda, soğuğa karşı dayanıklılık maksimum katsayıları (K_D) 1,0-1,13 arasında değişmiştir. Böylece, fosfor cürufu içerisinde açık gözeneklerin negatif bir etki yapmadığını ve bitüm-fosfor cürufu arasındaki sağlam bağların asfalt betonuna büyük korozyon dayanıklılığı verdiği anlaşılmıştır (Julay, 1989).

Yıldırım, Kuloğlu (1993), çalışmalarında Ergani Bakır İşletmeleri Fabrikasının bakır üretiminden artan reverber cürufunun yol üst yapısının temel ve alt temel tabakalarının bir kısmında kullanılabilirliğini araştırmışlardır.

Kuru birim hacim ağırlıkları bakımından, gerek temel tabasında, gerekse alt temel tabakasında cürufu karışımların yüksek değer verdiği görülmüştür. Bunun sonucu olarak ta cürufun temel ve alt temel tabakalarında kullanılması halinde bu tabakaların taşıma gücünü artıracığı anlaşılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda Ergani Bakır İşletmeleri reverber cürufunun, Yollar Fenni Şartnamesinde belirtilen fiziksel özellikleri sağladığı görülmüş ve bu nedenle söz konusu cürufun yol üst yapısının temel ve alt temel tabakalarında kullanılabileceği ortaya konmuştur (Yıldırım, Kuloğlu., 1993).

Diğer bir çalışmada, Ergani Bakır İşletmesi parça cürufunun sıcak bitümlü karışımında agrega olarak kullanılması araştırılmıştır (Yıldırım., Kuloğlu., Akyığıt, 1993).

Bakır İşletmesi cürufu üzerinde, aşınma kaybı deneyi, hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi, özgül ağırlık ve su emme deneyi ve soyulma deneyi yapılmıştır.

Aşınma kaybı: %21.2, donma kaybı: %5.34, kaba agreganın hacim özgül ağırlığı: 4.23 gr/cm³, zahiri özgül ağırlığı: 4.31 gr/cm³, su emme yüzdesi: 0.41, ince agreganın hacim özgül ağırlığı: 4.28 gr/cm³, zahiri özgül ağırlığı: 4.47 gr/cm³, su emme yüzdesi: 1.01, fillerin hacim özgül ağırlığı: 4.08 gr/cm³, soyulma deneyi: %80 olarak bulunmuştur.

Daha sonra Marshall stabilite metodu ile karışım dizaynı yapılmış ve çıkan sonuçlar şartname kriterleri ile karşılaştırılarak sunulmuştur. Bitümlü temel ve binder tabakasında optimum bitüm yüzdesi, şartname ortalama değerinden daha az çıkmıştır. Bu nedenle cüruf kullanılması durumunda bitüm maliyetinden % 15 tasarruf sağlanacağı hesaplanmıştır (Yıldırım., Kuloğlu., Akyığıt, 1997)

Asetilenden karpit kalsiyum elde edildiğinde atık malzeme olarak beyaz renginde ince toz ortaya çıkmaktadır. Bu atık malzemenin %60-65'i 0,071mm'den küçük zerrelere, %30 aktif Cao+MgO, kalan kısım karbon kalsiyum ve mineral tozdur (Gorelikov, 1991).

Asetilen üretim atıkların ince taneli olması ve kimyasal aktifliği, bu maddenin çimento-toprak ve asfalt betonu karışımlarda aktif bir parça olarak yol inşaatında kullanılmasına imkan vermiştir. Asitli kumlu kil toprağını portland çimentosu ile sağlamlaştırmadan önce, toprağa %8-10 miktarda asetilen artıkları ilave edilmiş ve toprağın pH'ı artırılmıştır. Ayrıca atık bileşimindeki kireç, killi toprağın esas kısmını oluşturan alümosilikatlarla etkileşime girmiş, ilave olarak da bir miktar çimentolama maddesi oluşturmuştur. Sonuçta, portland çimentosundan %30 tasarruf sağlanmıştır ve bununla beraber çimento-toprak karışımının dayanıklılığı ve soğuğa karşı mukavemeti hiç düşmemiştir.

Asfalt beton karışımlarda, asetilen atıklarının yardımıyla, bitüm ile agrega malzeme arasındaki kenetlenmeyi artırmak mümkün olduğunu anlaşılmıştır. Araştırmalarda, agrega malzemesine %10, %20, %30, %40 atık malzemesi ilave edilmiştir. Asetilen atıkların içerisinde %22 aktif $\text{CaO}+\text{MgO}$ mevcuttur. En iyi sonuç, asetilen atıkların %10 oranında granite ve %20 oranında kum-uçucu kül karışımına ilave edildiğinde alınmıştır. Asfalt beton dayanıklılığı 1,5-2,0 kat artmış ve su doygunluğu bir dereceye kadar düşmüştür. Bunun nedeni, atık içerisindeki kirecin asidik agrega yüzeylerine etkisi ve ince boyutlu atık malzemenin mineral agrega granülometresini optimize etmesidir. Asetilen atıkların şist mineral agregayla birlikte kullanılması tavsiye edilmemektedir. Çünkü asfalt betonu dayanıklılığında artış gözlenmesine rağmen su doygunluk değerinde de artış olmaktadır.

Yapılan deneyler, asetilen atıkları öğütüldükten sonra No:8 elek üzerinde en fazla %15 oranında kaldığında en büyük etki verdiğini göstermiştir. Bu şekilde atık malzeme içerisinde bulunan $\text{CaO}+\text{MgO}$ aktifliği artmış ve bu onların asfalt betona 2 kat daha az katılmasını sağlamıştır. Asetilen atıkları agregaya ilave edilmeden önce, agrega malzemesi ısıtılmış ve sonra bitümle karıştırılmıştır. Atık içerisindeki $\text{CaO}+\text{MgO}$ oranı detaylı bir şekilde laboratuarda kontrol edilmiştir, çünkü bu değer büyük ölçüde karışıma ilave edilecek atık malzemenin optimum miktarını tayin etmektedir. Bunun dışında, atık malzemenin büyük oranda asfalta katılması sakıncalıdır. Bu durumda asfalt beton yolların “yaşlanma” prosesi hızlanmakta ve yolun ömrü azalmaktadır (Gorelikov, 1991).

Otomobil lastiğinden, su şişelerine; ambalaj sanayiinden, ev aletlerine kadar pek çok alanda plastik kullanılmaktadır. Evlerde kullanıldığımız plastikten yapılmış su ve kola şişeleri, poşetler, plastikten yapılmış ambalaj malzemeleri işlevini tamandıktan sonra atılmaktadır. Çok geniş kullanım alanı olan plastiklerin atıkları da fazla miktarda olmaktadır (Kuloğlu., Namlı , 1996).

Atık plastiklerin çok uzun zamanda yok olması, çevre kirliliği ve insan sağlığı açısından büyük sorunlar meydana getirmektedir. Bunun önlenmesi için bu atık plastiklerin tekrar ekonomiye kazandırılması ve yeni kullanım alanlarında, hiç olmazsa katkı malzemesi olarak kullanılması yoluna gidilmiştir. Çöplüklere atıldıklarında çok uzun zamanda yok olan ve çevre kirlenmesine neden olan evsel plastik atıklarının asfalt betonunda kullanılmasıyla, çevre kirlenmesi önlenecek ve atık plastiğin tekrar

kullanılması ile ekonomiye katkı sağlanacak hem de daha iyi özelliklere sahip asfalt betonu elde edilecektir (Kuloğlu., Namlı , 1996). Bunun için öncelikle evsel plastik atıklardan poşet ve PET şişe türü malzemeler temin edilmiştir. Laboratuarda agrega deneyleri yapıp atık plastik katılmadan kaplama tabakasını meydana getiren binder ve aşınma tabakaları için Marshall Stabilitate deneyi yapıp belirli sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra aşınma tabakası için agregaya belirli oranlarda atık plastik katıp Marshall Stabilitate deneyi yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan deneyler, bitüme poşet katıldığı zaman %3.43, PET katıldığı zaman % 3.50 ve poşet+PET katıldığı zaman %3.30 kazanç sağlandığını göstermiştir. Ayrıca atık plastik katılmadan aşınma tabakasına göre akma miktarı bitüm arttıkça artarken atık plastik katıldığında bağlayıcı miktarı sabit kalmasına rağmen akma azalmıştır (Kuloğlu, Namlı , 1996).

Diğer bir çalışmada, kullanılmış otomobil ve plastik atıkların sıcak asfalt karışım kaplaması üzerinde etkileri araştırılmıştır (Tuncan, Çetin, 1997).

Çalışmada, tek tip kırmataş agrega ve 75-100 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılmıştır. Ayrıca 4-20, 20-200 ve 4-200 nolu elekler arasında kalan lastik parçalarıyla 4-10 nolu elekler arasında kalan plastik parçaları kullanılmıştır. Lastik ve plastik ilave edilen bitüm kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilitesi ve indirekt çekme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca numuneleri su hasarına karşı dayanımları da belirlenmiştir. Bu deneyler sonucunda, lastik parçalarının boyut ve miktarları arttıkça Marshall stabilitesi değerinin azaldığı, akma değerinin ise arttığı görülmüştür. Dolayısıyla, lastikli numuneler daha sünek bir davranış göstermiştir. Küçük boyutlardaki lastik parçaları indirekt çekme dayanımını azaltmıştır. Kullanılan lastik gradasyonları arasında çekme dayanımı yönünden en iyi sonucu 4-200 nolu elekler arasında kalan lastik parçaları vermiştir. Plastik ilaveli numunelerin Marshall stabilitesi ve indirekt çekme dayanımları artmış, akma miktarları ise azalmış. %20 plastik ilavesi indirekt çekme dayanımı %69 oranında artırmıştır. Plastik ilavesi, lastik ilavesine nazaran numunelerin mukavemetini büyük ölçüde artırmıştır (Tuncan., Çetin, 1997).

Linyit kömüründen yararlanarak enerji üretimi yapan Afşin-Elbistan Termik Santralinden atık bir yan ürün olarak elde edilen uçucu külün, sıcak bitümlü

karışımlarda filler olarak değerlendirilmesi yolunda bir çalışma yapılmıştır (Yıldırım., Kuloğlu., 1997).

Çalışmanın esası aynı şartlar altında hazırlanan Afşin-Elbistan uçucu külü, taş tozu ve portland çimentosu filleri bitümlü karışım numunelerinin birbirleri ile mukayesesi temeline dayanmıştır. Stabilité değerleri yönünden uçucu kül, taş tozu ve portland çimentosundan daha yüksek değerler vermiştir. Uçucu külün akma değerleri diğer filler malzemelerin akma değerlerine göre şartnamelerde verilen sınırlar arasında daha fazla kalmıştır.

Alınan sonuçlar Afşin-Elbistan uçucu külünün bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabileceğini göstermiştir. Uçucu kül atık bir malzemedir. Santralden çıkan uçucu kül, linyit üretimi için açılan çukurlara dökülerek üzeri toprak ile kapatılmaktadır. Uçucu külün filler olarak kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların maliyetinin azalacağı hesaplanmış ve böylece çevre kirlenmesinin önleneceği düşünülmüştür (Yıldırım, Kuloğlu, 1997).



3. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARININ TEST YÖNTEMLERİ

Esnek yol üstyapılarında kullanılan bitümlerin özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan çok sayıda geleneksel test yöntemleri bulunmaktadır. Bu test yöntemleri aynı zamanda modifiye bitümlerin özelliklerinin tespiti için de kullanılmaktadır. Ancak, bağlayıcı ile üstyapı karışımının performansı arasındaki ilişkiyi daha doğru bir şekilde ortaya koyabilmek bakımından zamanımızın teknolojik olanaklarından da yararlanarak geleneksel test yöntemlerinde ve test prosedürlerinde değişiklikler yapılabilmektedir (Kuloğlu, 2001).

Tablo 3.1. Standart test yöntemleri (Francken, 1997)

Test tipi	Standart koşullar	Referans
1. Reolojik Testler		
Penetrasyon (dmm)	25°C, 5s, 100g	ASTM D5
Yumaşama noktası, R&B (°C)		ASTM D36
Frass kırılma noktası (°C)		IP 80
Kinematik viskozite (mm ² /s)	135 °C	ASTM D 2170
Dinamik viskozite (Pas)	60 °C	ASTM D 2171
Viskozite (koni ve plaka viskozimetresi ile)		ASTM D 3205
Viskozite (Brofield viskozimetresi ile)		ASTM D 4402
Düktilite (cm)	25 °C, 5cm/dak	ASTM D 113
Çekme testi	23 °C, 50cm/dak	ASTM D 412
Yüzme testi	5 °C	ASTM D 139
2. Yaşlanma Testleri		
İnce film halinde ısıtma testi (TFOT, ağırlıkça %)	163 °C, 5 saat	ASTM D 1754
Dönen ince film halinde ısıtma testi (RTFOT, ağırlıkça %)	163 °C, 75 dak	ASTM D 2872
Dönen Flask	163 °C, 2,5 saat	DIN 52016
3. Çözünürlük Testi		ASTM D 2042
4. Parlama Noktası Testi		
Kleveland açık kap testi (COC test)		ASTM D 92
Prenski-Marten kapalı kap testi		ASTM D 93

Bununla beraber bağlayıcıya ve modifiye bağlayıcıya yönelik testlerde ve özellikle de esnek üstyapı karışımlarının performans özelliklerinin belirlenmesine yönelik testlerde yeni yöntemler geliştirilmekte ve uygulanmaktadır. Bu yöntemler

ASTM, DİN ve bunun gibi diğer standardizasyon otoriteleri tarafından standardize edilmektedir (Francken, 1997).

Aşağıda görülebileceği gibi, literatürlerde çok sayıda test prosedürleri izah edilmektedir. Burada, farklı test yöntemleri, sırasıyla, standart ve standart olmayan test yöntemleri olarak iki gruba ayrılarak verilmektedir. Tablo 3.1. ve 3.2.'de görüldüğü gibi bu farklı gruplar öteki alt gruplara ayrılmaktadır. Verilen test yöntemleri sadece bağlayıcıya yönelik testler olup karışıma yönelik testleri içermemektedir.

Tablo 3.2. Standart olmayan test yöntemleri (Francen, 1997)

1. Uyuşabilirlik Depolama Stabilitesi Testleri 1.1. Tüp testi 1.2. UV flüoresan mikroskopisi 1.3. Kırma testi 2. Reolojik Testler 2.1. Akma Davranışı Testi a. Akma testi b. Görünen Viskozite c. Mutlak dinamik viskozite d. Çift küre yumuşama noktası e. Düşen küre testi 2.2. Elastik özellik testleri a. Elastik geridönüş testi, düktilometre ile. b. Elastik geridönüş testi, silindirik plaka reometresi ile c. Elastik geridönüş testi, ARRB elastometresi ile d. Elastik geridönüş testi, kontrollü germe reometresi ile e. Elastik geridönüş testi, Hopler kıvam ölçeri ile f. Tosiyonel geridönüş testi 2.3. Çekme gerilmesi testleri a. Sertlik ve gevreklik testi b. Sertlik ve gevreklik testi, değiştirilmiş yöntem c. Sertlik ve gevreklik testi, Boussad vd. 'ne göre d. Ekstraksiyon testi e. Zorlama düktilitesi testi f. Direkt çekme testi, Anderson 2.4. Statik mekanik testler a. Sertlik modülü, kaydırma plakası reometresi ile b. Sertlik modülü, kiriş eğme reometresi ile	2.5. Dinamik mekanik testler a. Test Prosedürü Jovanoviç vd'ye göre b. Test prosedürü De Ferraris vd'de göre c. Test prosedürü Cavaliere vd'e göre 3. Adhezyon/Kohezyon Testleri 3.1. Vialit test 3.2. Kırılma sıcaklığı 3.3. Düşme sıcaklığı 3.4. İmalat testi 3.5. Kohezyon testi 3.6. Kaynar su soyulması testi 4. Yaşlanma Testi 4.1. Basınçlı yaşlanma kabı testi 4.2. Yaşlanma testi BRRC'ye göre 5. Kimyasal Analiz Yöntemleri 5.1. Spektroskopik yöntemler a. İnfrared Spektroskopisi b. Nükleer Man. Res. Spekr. 5.2. Kromatografik yöntemler a. Gaz kromatografisi b. Yüksek basınçlı sıvı kromatografisi c. İnce tabaka kromatografisi d. Jel nüfuzu kromatografisi
--	--

3.1. Laboratuvar çalışması

Bu bölümde, bağlayıcı üzerinde laboratuvarda yapılan penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve özgül ağırlık deneyleri verilmektedir.

3.1.1. Penetrasyon Deneyi

Penetrasyon deneyi ile bağlayıcının sertlik veya kıvamı tayin edilir. Bağlayıcının kıvamı arttıkça karışım içerisindeki taşlar birbirine daha kuvvetle bağlanırlar.

Penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır, penetrasyon yükseldikçe asfalt yumuşar.

Numune, aşırı ısınmalara sebebiyet vermeden kolayca dökülebilecek sıcaklığa getirilir. Numune hava kabarcıkları kayboluncaya kadar karıştırılıp numune kabına dökülür. Numune hazırlanmasında TS 118'nin (ASTM D5) öngördüğü hususlardan hareket edilir.

Bundan sonra ağzı kapatılıp tozdan korunarak 21°C-30°C arasında olan bir yerde soğutulur. Numune 1-1.5 saat arasında soğutulduktan sonra taşıma kabı ile birlikte 25°C'lik sıcaklıktaki su banyosuna batırılır. Burada da 1-1.5 saat bekletilir.

Penetrasyon cihazı düzgün bir yere yerleştirilip, gösterge sıfıra getirilir. Numune kabını taşıyan taşıma kabı su ile dolu olarak penetrasyon cihazının tablasına yerleştirilir. 100 gr ağırlıkla yüklenen iğne, numunenin yüzeyine ancak değecek şekilde ayarlanır. Bu ayarlama yandan gönderilen ışık altında, iğne ucunun su içindeki görüntüsü ile birleştiği an tamamlanmış kabul edilir. İğne 5 saniye serbest bırakılıp, zaman bitiminde penetrasyon değeri göstergeden okunur. Kabın kenarından ve birbirlerinden 1'er cm uzaklıkta en az 3 okuma yapılır. Bu okumalar en kısa zamanda arka arkaya yapılır. İğne, her seferinde uygun bir çözücü ile ıslatılmış bezle silinir (Keçeciler ve Akkol, 1979).

Deney sonunda penetrasyon, hesaplanacak penetrasyon toleransından daha büyük farklar bulunmayan en az 3 deney neticesinin ortalamasıdır (Yağız, 1967).

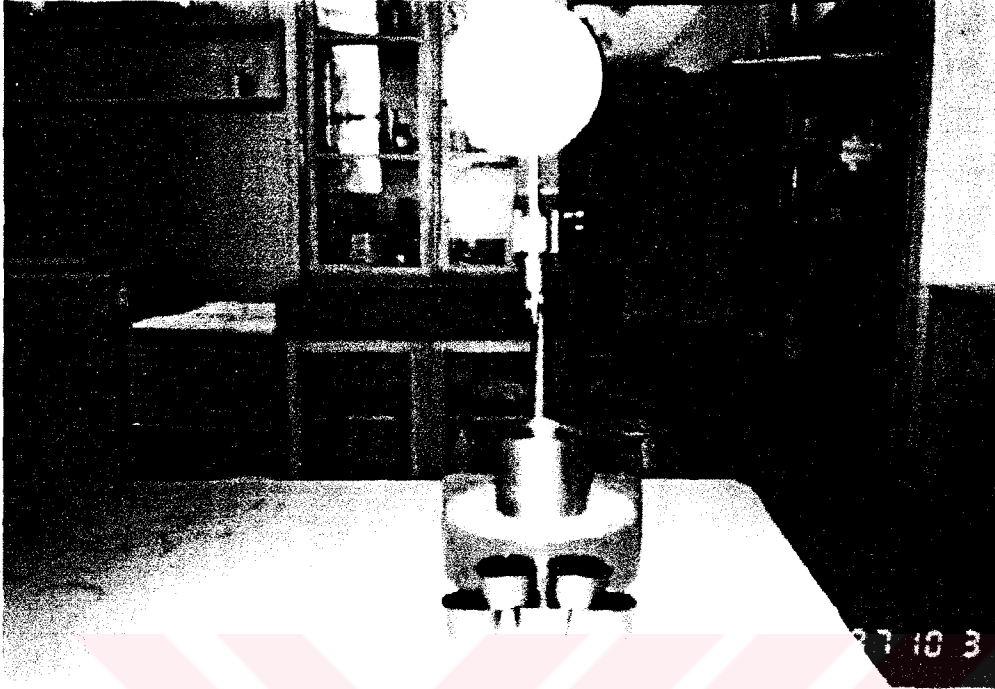
Tolerans şu formülden hesaplanır.

$$\text{Tolerans} = \frac{\text{Ortalama penetrasyon}}{100} + 1 \quad (3.1)$$

Bu metoda göre, muhtelif laboratuvarlar tarafından bulunan neticeler ile bu neticelerin ortalaması arasındaki farklar, en fazla aşağıdaki formülden hesaplanacak en çok fark kadar olacaktır (Yağız, 1967).

$$\text{En çok fark} = \frac{\text{Ortalama penetrasyon}}{100} + 2 \quad (3.2)$$

Bu deneyde kullanılan cihaz Resim 3.1.1.1.'de görülmektedir.



Resim 3.1.1.1. Penetrasyon cihazı ve numuneler

3.1.2. Yumuşama noktası deneyi

Bağlayıcıların sıcaklık değişmelerine karşı olan duyarlılıklarını ölçmek için yumuşama noktası deneyi yapılır.

Halka, yağlanmış bir pirinç levha üzerine oturtulur. Numune eritilerek, halkanın üst düzeyini aşacak şekilde doldurulur. Bir saat süre ile soğutulup, taşan kısım ısıtılmış bir ıspatula ile kesilip alınır. Numunenin hazırlanmasında TS 120'nin (ASTM D92) öngördüğü hususlardan hareket edilir.

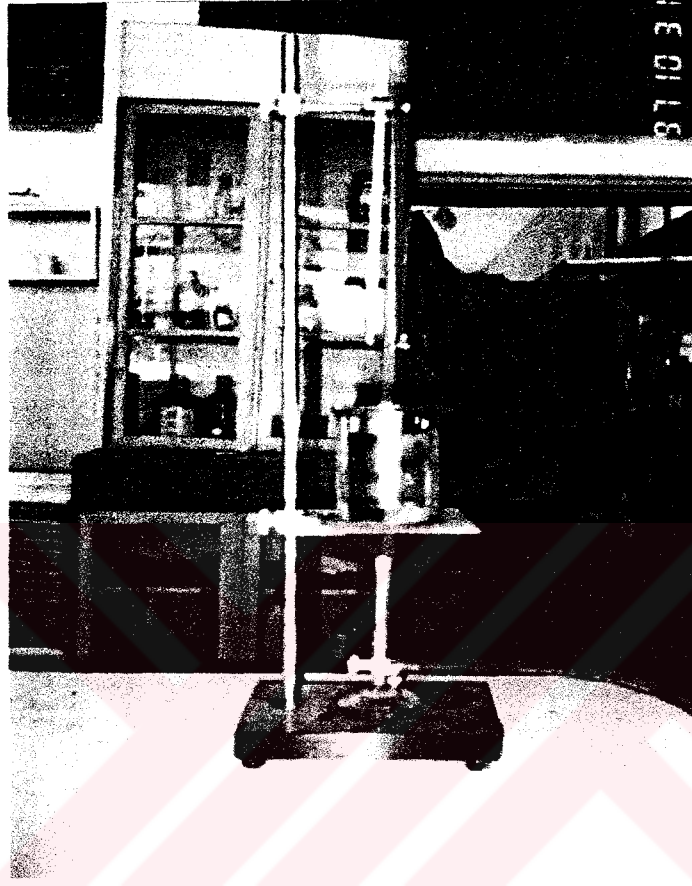
Beher 5°C'ya kadar soğutulmuş saf su ile tabandan yaklaşık 9 cm. yüksekliğe kadar doldurulur. Numuneyi taşıyan halkanın alt yüzü banyonun tabanından 2.5 cm yukarıda olacak şekilde yerleştirilir. Bu arada bilye suya konulur.

2 ila 80°C arasında bölmelenmiş termometre, cıva haznesinin ucu, halkanın alt yüzü ile aynı düzeyde ve halkadan 0,5 cm uzaklıkta bulunacak şekilde banyoya sarkıtılır. Su banyosunun sıcaklığı 15 dakika süreyle 5°C'da sabit tutulur. Sonra bilye uygun bir maşa yardımı ile halka içindeki numunenin tam ortasına yerleştirilir.

Banyonun suyu ilk 3 dakikadan sonra dakikada 5°C yükselecek şekilde ısıtılır. Sıcaklığın artması ile yumuşayan malzemenin, banyonun tabanına değdiği anda

termometreden okunan sıcaklık yumuşama noktası olarak kaydedilir (Keçeciler ve Akkol, 1979).

Bu deneyde kullanılan cihaz, Resim 3.1.2.1.'de görülmektedir.



Resim 3.1.2.1. Yumuşama noktası cihazı

3.1.3. Düktilite deneyi

Düktilitenin kelime anlamı “ uzama “ veya “çekilebilme”’dir. Bağlayıcıların önemli özelliklerden biridir. Uzama yeteneği fazla olan bağlayıcılar, düktilite değeri daha düşük olan bağlayıcılara göre, daha üstün bir bağlama yeteneğine sahiptirler. Diğer yandan, çok yüksek düktilite değerine sahip bağlayıcılar ise, ısı değişmelerine karşı fazla duyarlık gösterirler.

Deneye tabi tutulacak bağlayıcı madde, uygun akıcılığı temin eden en düşük sıcaklığa kadar ısıtılır. Akıcı hale getirilmiş numune standart elekten (297mikron) süzülüp iyice karıştırıldıktan sonra düz bir pirinç levha üzerinde hazırlanmış kalıba dökülür. Numunenin yapışmaması için alt levha ve kalıbın parçalarının iç yüzleri iyice

yağlanır. Numune, kalıbın içine üst seviyesine kadar doldurulur. 30-40 dakika oda sıcaklığında ve sonra 30 dakika da 25°C'lik su banyosunda bekletilir.

Banyodan çıkarılan kalıptaki bağlayıcının fazlası ısıtılmış geniş ağızlı düz bir ıspatula veya bıçakla kesilip alınır. Sonra yine 25°C'lik su banyosunda 1,5 saat bekletilir. Briket alt levhadan ve kalıbın yan parçalarından ayırıp çabucak düktilite cihazındaki yerine konulur. Dakikada 5 cm'lik bir hızla briket kopuncaya kadar çekilir. Numune briketi koptuğu anda cihazın kenarındaki cetvelden uzama miktarı cm cinsinden okunur (Işıksalan, 1967). Normal bir düktilite deneyi maddenin kopması veya iplik şeklinde uzamış numunenin kesit alanının pratikçe sıfır olması demektir. Bu şekilde 3 neticenin ortalaması numunenin düktilitesi olarak gösterilir (Işıksalan, 1967).



Resim 3.1.3.1. Düktilite cihazı

Deney esnasında bağlayıcı maddenin suyun üst yüzüne çıkmasını veya dibe çökmesine mani olmak için suyun özgül ağırlığı artırılır veya düşürülür. Suyun özgül ağırlığını, arttırmak gayesi ile sodyum klorür (tuz) veya düşürmek için suya metil alkol

ilave edilir (Keçeciler ve Akkol, 1979). Bu deneyde kullanılan cihaz, Resim 3.1.3.1.'de görülmektedir.

3.1.4. Özgül ağırlık deneyi

Özgül ağırlık tayini bir piknometre ile yapılır. Piknometrenin ağzı cam bir kapağın iyice oturacağı şekilde tıraşlanır. Özgül ağırlık tayininden önce, piknometre temizlenip kurutulur ve kapağı ile birlikte 0.0002 gr'a kadar duyarlı terazide tartılır. Bu ağırlık (P_0) olsun.

Piknometre saf su ile doldurulmuş, kapağı sıkıca kapatılıp 25°C'lik su banyosunda en az 20 dakika bekletilir. Bu süre sonunda banyodan çıkartılır. Kabın dışı temiz ve kuru bir bezle veya süzgeç (kurutma) kağıdı ile silinerek iyice kurutulduktan sonra tartılır. Bu ağırlık da (P_1) olsun.

Sonra piknometre tekrar kurutulup ve içerisine incelediğimiz bağlayıcıdan 1-3 gr arasında konulur. Numune piknometre içine konulurken, kabın üst kısımlarına bulaşmamasına dikkat edilir. Piknometreye bağlayıcının üst seviyesini geçecek şekilde etil alkol ilave edilip tartılır. Bu ağırlık (P_3) olsun. Daha sonra, piknometre temizlenip iyice kurutulur. Piknometre işaret çizgisi seviyesine kadar etil alkol ile doldurularak tartılır. Bu ağırlık (P_2) olsun (Toropseva, 1972). Bağlayıcının özgül ağırlığı aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$\gamma = \frac{G \times \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0}}{G + P_2 - P_3} \quad (3.3)$$

Bu deney TS 1087'e (ASTM D70) uygun olarak yapılır.

3.1.5. Nükleer manyetik rezonans spektroskopisi (^1H NMR)

Nükleer manyetik rezonans spektroskopisi (^1H NMR) ölçümü radyo-frekans bölgesindeki elektromanyetik radyasyonun emilmesinin bir manyetik alanda dönen çekirdeğin yönünde değişmelere yol açması olgusuna dayanır. NMR tayfına neden olabilecek çekirdeklerin 1 ve 1,5 gibi 0 olmayan dönme kuantumu sayılarına sahip olması gerekir. Bu çekirdekler ^1H , ^{13}C , ^{31}P , ^{15}N ve ^{19}F vs'yi içerirler. Bir NMR spektrometresi güçlü ve yüksek homojenlikte bir elektromıknatıs, bir radyo-frekans sinyali jeneratörü ve detektör devresi, bir elektronik bütünleyici (integrator) ve cam

örnek tüplerinden oluşur. NMR tayfı manyetik alanın sabit frekansta (genellikle 60-100 mHz) taranması veya sabit bir manyetik alandaki nakledici aygıtın çalışma frekansının taranmasıyla elde edilebilir. Bu teknik organik maddelerin teşhisi ve yapısal analizi ile kinetik etkilerin incelenmesinde kullanılabilir. Söz konusu teknik, miktar analizinde de yararlıdır, ancak bu işlem yaygın olarak uygulanmaz. ^1H 'nin en yüksek yöreliliğe sahip olması ve ^{12}C ve ^{16}O 'nun aktif olmaması (dönme kuantumu sayıları sıfırdır) nedeniyle, ^1H NMR veya Proton Manyetik Rezonans Spektroskopisi (PMR) organik bileşimlerin niteliksel analizinde en yararlı tekniklerden biri olmuştur. Deneylerde kullanılan (^1H NMR) cihazının 90 mHz olduğundan dolayı 1ppm 90 Hz karşılık gelir. PMR tayfının yorumlanması referans tayflarla karşılaştırılarak veya kimyasal değişim tabloları referans gösterilerek yapılır. Bir çekirdeğin rezonans frekansının bir standardın rezonans frekansından farkı, kimyasal kayması (δ) olarak tanımlanır. Bitüm üzerinde yapılan uygulamalarda ise, NMR yöntemiyle doymuş/aromatik karbon oranlarının tahmin edilebildiği, karboksilik asitler, penol ve benzilik protonlarının içeriğinin ölçülebilmekte ve kimyasal tür bileşimleri belirlenebilmektedir (Erdik, 1993).

3.1.6. Kızılötesi spektroskopisi (IRS)

Bu yöntemin prensibi kızılötesi bölgesinde elektromanyetik radyasyonun emilmesinin moleküllerin titreşim enerjisinde değişikliklere yol açmasıdır. Bu testte kullanılan araçlar Fourier değişim spektrometresi veya prizma ya da ızgaralı monokromatör içeren çift ışıklı spektrofotometre, termal veya foto detektör ve alkali tuz hücreleridir. Kızılötesi tayf (spektrum) dalga boyuna (nm) ve/veya dalga sayısına (cm^{-1}) karşı geçirgenlik (%) T olarak kaydedilir. Bu yöntem organik maddelerin teşhisi ve yapısal analiz için yaygın biçimde kullanılır. Bu durumda, kızılötesi tayf, örneklerin bilinen maddelerle kıyaslanması ve grup frekanslarına ilişkin grafiklerin referans gösterilmesi suretiyle deneysel bir şekilde kullanılır. Miktar ölçümünden önce bir kalibrasyon eğrisi geliştirilir. Bu amaç doğrultusunda, örnekler ve standartlar için aynı hücre kullanılmaktadır. Kızılötesi yöntemin polimer modifiye bitümlere uygulanması polimer muhtevası ve işlevsel grupların belirlenmesi uygunluğun tahmin edilmesini ve polimerin bitümlerin içinde çözülmesinin araştırılmasını içerir (Erdik, 1993).

3.1.7. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)

Kararlı çevre şartlarında tutulan bir çift mikrokaleorimetreden ibarettir. Bunlardan biri incelenen örneğe, diğeri maddeye aittir. Örnek ve referans, kalorimetrelerin ısıtıcılarına elektrik güç ilavesi ile yaklaşık aynı programlanmış sıcaklıkta sabit tutulur. İki kalorimetreye sağlanmış güçler arasındaki fark, örnekteki enerji değişim hızını ölçer ve zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilir (Erdoğan, 1977).

3.1.8. Termogravimetrik metod (TGA)

Kontrollü şartlarda maddelerin sıcaklığının değiştirilmesi ile ağırlığındaki değişimin ölçümüne termogravimetri denir. Bir TGA deneyinde ölçülen değişkenler; ağırlık, zaman ve sıcaklıktır. Organik maddelerin termal kararlılığının ölçülmesinde genellikle termogravimetrik analiz tekniği kullanılır. Termogravimetri, bir madde örneğinin ağırlık kaybının zamanın ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak izleme tekniğidir. Eğer sabit bir ısıtma hızında sıcaklıkla ağırlık kaybı inceleniyorsa buna dinamik termogravimetri; sabit bir sıcaklıkta zamanın fonksiyonu olarak ağırlık kaybı kaydediliyorsa buna izotermal termogravimetri denir. Termogravimetrik analiz sonunda bir maddenin bozulmaya başladığı sıcaklık ve %50 ağırlık kaybının meydana geldiği sıcaklık (ve yarı ömür sıcaklığı denilen sıcaklık) kolaylıkla belirlenebilir. Ayrıca uygun değerlendirme tekniklerinden yararlanılarak maddenin termal bozunma tepkimesinin derecesi ve aktifleşme enerjisi gibi büyüklükler de hesaplanabilir (Erdoğan, 1977).

4. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA UYGULANAN TEST YÖNTEMLERİ

4.1. Asfalt-Agrega Karışımı Yorulma Davranışı

4.1.1. Giriş

Esnek bir üstyapının tabakaları, trafik yükü altında sürekli eğilmeye maruzdur. Birim şekil değiştirmelerin büyüklüğü, üstyapının özelliklerine ve rijitlik modülüne bağlıdır. Analizler, standart dingil yükü altında oluşan birim şekil değiştirmenin $30 \cdot 10^{-6}$ – $200 \cdot 10^{-6}$ civarında olduğunu göstermiştir (SHRP A404). Bu birim şekil değiştirme değerleri civarında yorulma çatlağı oluşma ihtimali vardır.

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. Trafik ve çevre şartlarına bağlı olarak yorulma karakteristiklerinin belirli karışımlar için bilinmesi tasarım açısından önemlidir.

Yorulma karakteristikleri, genel olarak başlangıç gerilmesi yada birim şekil değiştirmesi ile bozulmaya neden olan yükleme adedi arasındaki ilişki olarak açıklanabilir. Bu amaçla kullanılan temel deneyler şunlardır: tekrarlı eğilme deneyi, direkt çekme deneyi, indirekt çekme deneyi. Bu testler farklı birim şekil değiştirme veya gerilme seviyeleri için kullanılabilirler. Belirli bir karışımın yorulma davranışı, bozulma yükleme adedi ile başlangıç gerilme ya da birim şekil değiştirme seviyesi arasındaki eğim ilişkisi, aşağıdaki gibidir (SHRP A404):

$$N_f = a(1/\epsilon_0)^b (1/S_0)^c \quad (4.1)$$

burada: N_f – yorulma ömrü,

ϵ_0 - birim çekme şekil değiştirmesi,

S_0 – karışım başlangıç sertlik modülü,

a, b, c – deneylerden elde edilen katsayılarıdır.

Laboratuar test sonuçlarına bağlı olarak 4.1 nolu eşitlik kullanılarak, yorulma ömrü tahmininde çeşitli modeller geliştirilmiştir (SHRP A404). Geliştirilen bu modeller kalibrasyon artırma faktörleri ile çarpılarak yollardaki gerçek sonuçlara geçiş yapılabilir. Laboratuar yorulma testlerinin çoğu tek eksenli eğilme yada direkt yükleme

şeklinde uygulanmıştır. Bazılarında ise çevre basıncı olarak uygulanmıştır. Basit yüklemeli yorulma deneyleri, numuneye değişken gerilme yada birim şekil değiştirme uygulayarak, numunenin kırılması için gerekli olan tekrar sayısını belirler. Yorulma testlerindeki sonuçların dağılımı nedeniyle her bir gerilme seviyesi için, birkaç numune test edilerek ortalama değerler kullanılır.

4.1.2. Yorulma Hipotezleri

SHRP A-404 (1994) araştırma programının kabul ettiği hipotezleri şunlardır:

Hipotez 1. Yorulma çatlağı, tekrarlı trafik yükleri sonucunda ortaya çıkar. Ağır trafiğe maruz üstyapılarda, yorulma çatlağı asfalt-agrega tabakası altında çekme gerilmesi yada çekme birim şekil değiştirmelerinden oluşur.

Hipotez 2. Yorulma analizi için, üstyapıdaki kritik gerilme yada birim şekil değiştirme durumu kabul edilebilir doğrulukta, lineer elastik teori ile hesaplanabilir. Böylece asfalt-agrega karışımının mekanik davranışı, elastisite modülü, Poisson oranı modellenenabilir.

Hipotez 3. Tekrarlı yükler altında kırılmalı testler, asfalt-agrega karışımlarının yorulma davranışının tam olarak belirlenmesinde gereklidir.

Hipotez 4. Laboratuvar yorulma testlerinde, dinlenme periyodu olan yüklemeler sürekli olan sinüzoidal yüklemelere tercih edilir. Çünkü dinlenme periyodu, yoldaki gerçek duruma benzer süresine ve gerilme geri dönüşüne müsaade eder.

Hipotez 5. Üstyapı tekrarlı yüklemeler ile, yorulmasına rağmen, yorulma temel olarak çekme ile ilgilidir. Test numuneleri çekme ya da eğilme yüklemeleri altında doğru bir şekilde modellenenabilir.

Hipotez 6. Yükleme modu karışım tasarımında kritiktir. Çünkü, karışımın tepkisi kontrollü gerilme ile kontrollü birim şekil değiştirme arasında oldukça farklıdır. Yükleme modu etkisi, çatlak başlangıcı ömür farklarından çatlak ilerleme oran farklarına kadar sonucu etkiler.

Hipotez 7. Büyük gerilme yada birim şekil değiştirme uygulanması ile hızlandırılmış yorulma testleri karışım analizinde yada tasarımında tatmin edicidir.

Hipotez 8. Basit yükleme altında, verilen bir karışım için birim şekil değiştirme veya gerilme seviyesi ile çatlak başlangıcı arasında aşağıdaki gibi bir bağıntıları vardır:

$$N_f = a(1/\varepsilon_0)^b \quad (4.2)$$

$$N_f = c(1/\sigma_0)^d \quad (4.3)$$

burada : N_f – yorulma ömrü,
 ε_0 – birim çekme şekil değiştirmesi,
 σ_0 – başlangıç çekme gerilmesi,
 a, b, c – deneylerden elde edilen katsayılarıdır (sıcaklığa ve yüklemeye bağlı)

4.1.3. Yükleme modu

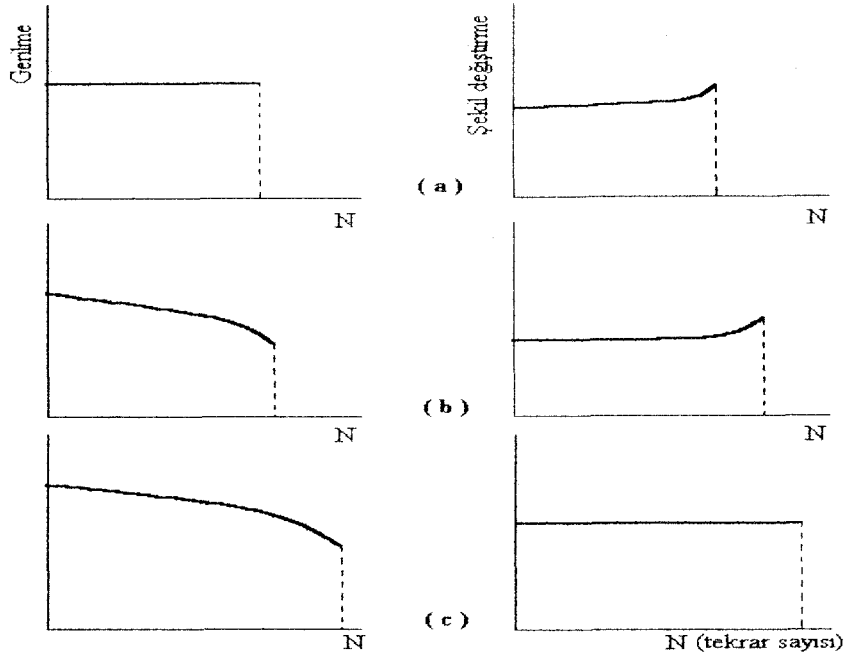
Monismith üstyapıda belli bir noktadaki yükleme modunu belirlemek için Mod Faktörü (MF) kavramını teklif etmiştir. MF elastik tabaka analizinden elde edilir (Myre, 1992) ve;

$$MF = (|A| - |B|) / (|A| + |B|) \quad (4.4)$$

A ve B sırası ile, gerilme ve birim şekil değiştirme değişim yüzdeleridir.

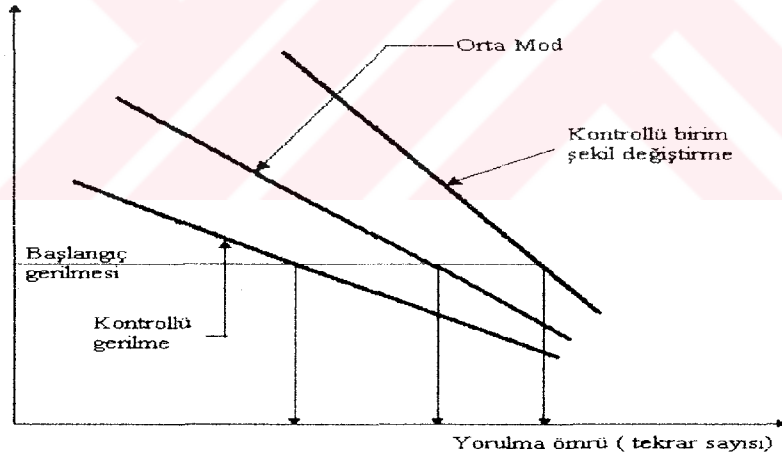
Kalın ve yüksek viskoziteli bitümlü bağlayıcı içeren karışımlardan oluşturulmuş tabakalı üstyapılarda $MF = -1$ 'dir ve ideal kontrollü gerilme durumu için geçerlidir. İnce ve daha esnek bitümlü tabakalar daha çok 1'e yakın olan kontrollü birim şekil değiştirme altında test edilirler. Özellikle düşük sıcaklıklarda, düşük birim şekil değiştirmelerde kontrollü gerilme ve kontrollü birim şekil değiştirmede modları arasında büyük farklar vardır. Buradan da MF'nin yol üstyapı tasarımında göz önünde tutulma gereği ortaya çıkmaktadır. Yükleme modları ve bu modlar için birim şekil değiştirme ve gerilmenin yorulma ömrü ile olan ilişkileri Şekil 4.1.3.1 ve Şekil 4.1.3.2'de gösterilmiştir.

Kontrollü gerilme durumunda gerilme sabit olup, yük adedinin artması ile birim şekil değiştirme artmaktadır. Kontrollü birim şekil değiştirme durumunda ise birim şekil değiştirme sabit olup yükleme adedinin artması ile, numunenin hasar görerek dayanımın azalması sonucu, uygulanacak birim şekil değiştirme, daha az bir gerilme ile elde edilebilir. Kontrollü gerilme testlerinde daha sert olan numuneler, daha uzun yorulma ömrüne sahiptirler; kontrollü birim şekil değiştirme testlerinde ise daha esnek olan karışımlar daha uzun yorulma ömrüne sahiptirler. Aynı karışım için kontrollü birim şekil değiştirme testi, kontrollü gerilme testinden daha uzun yorulma ömrüne sahip olmuştur (Porter, 1975).



Şekil 4.1.3.1. Yükleme Modları (Porter, 1975)

- a) Kontrollü gerilme, mod faktörü= -1
- b) Orta Mod, mod faktörü= 0
- c) Kontrollü birim şekil değiştirme, mod faktörü= 1



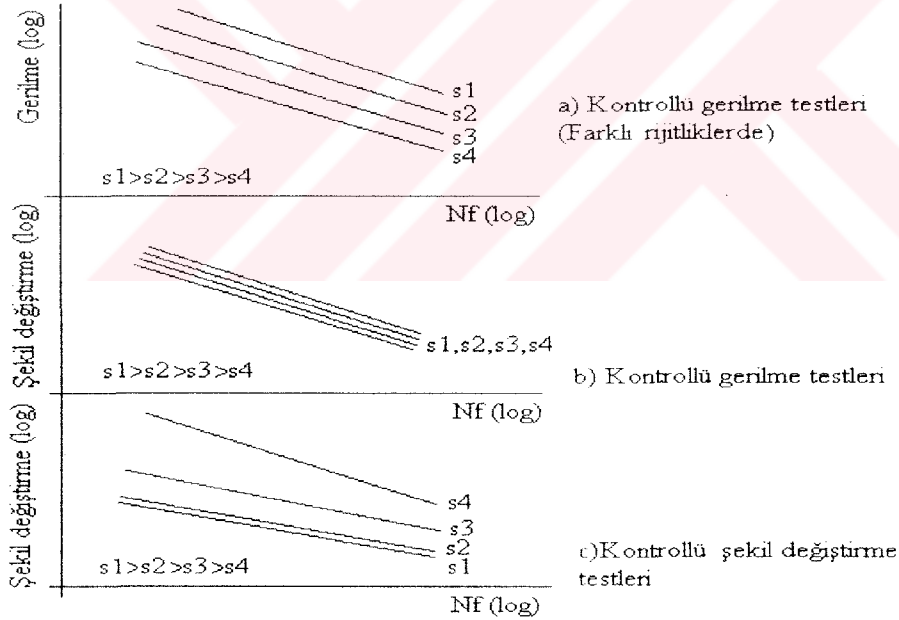
Şekil 4.1.3.2. Test modlarının karşılaştırılması (Porter, 1975)

4.1.4. Yorulma davranışı

Yorulma çatlağı problemi, tekrarlı çekme gerilmesi yada birim şekil değiştirmesi sonucunda bitümlü malzemenin dayanımını kaybetmesine neden olur. Malzemenin ömrü, uygulanan gerilme yada birim şekil değiştirme büyüklüğünün artmasıyla azalır. Eğilme ve direkt gerilme deneyleri kullanılarak yapılan yorulma çalışmaları testi,

kontrollü gerilme yada kontrollü birim şekil değiştirme yapılması arasındaki farkı ortaya koymuştur. Kontrollü gerilme testinde gerilme, diğerinde ise birim şekil değiştirme sabit tutulur. Burada farklı gerilme seviyelerinde çok sayıda test yapılmıştır. Deney sonuçlarında numune ve deney parametreleri arasında bir bağıntı olduğu sonucuna varılmıştır. Yorulma ömürlerini ortalamaları alınarak yorulma eğrileri çizilmiştir.

Kontrollü gerilme ve kontrollü birim şekil değiştirme arasındaki fark Şekil 4.1.4.1'de görülebilir. Şekil 4.1.4.1.a. kontrollü gerilme durumu içindir. Burada en uzun ömür en büyük sertlik modülü için elde edilmektedir. Şekil 4.1.4.1.c. ise kontrollü birim şekil değiştirme durumu içindir. Burada tam ters durum söz konusu olup, en uzun ömür en küçük sertlik modülü için elde edilmiştir. Kontrollü gerilme deney sonuçları, birim şekil değiştirme olarak ifade edilerek grafiği çizilirse ortadaki şekil elde edilir (buradaki birim şekil değiştirme, bozulma öncesindeki bir birim şekil değiştirmedir). Bu durumda sertlik modülü hiç önemli değildir.

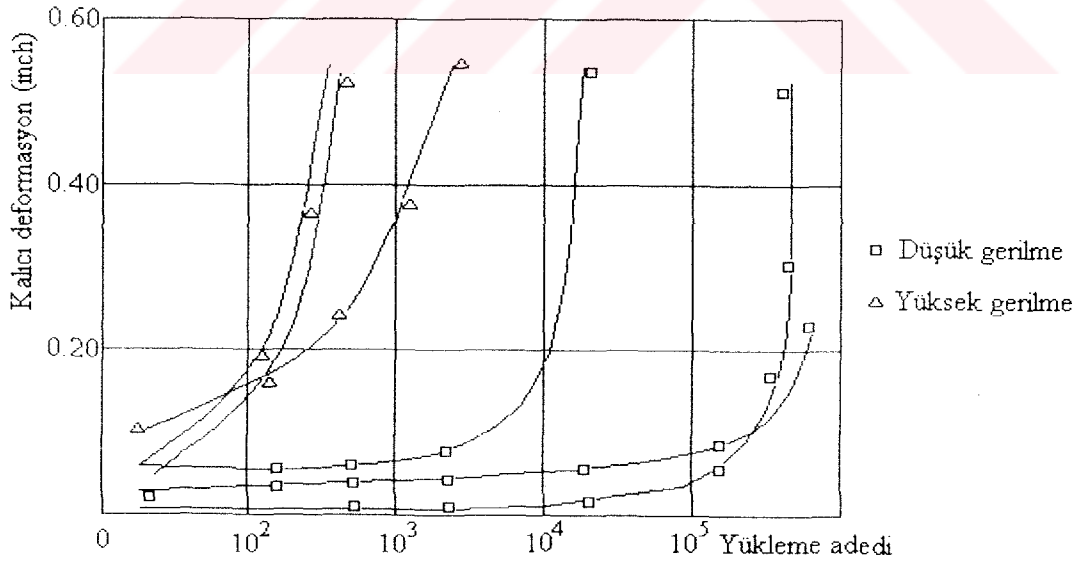


Sekil 4.1.4.1. Kontrollü gerilme ve kontrollü birim şekil değiştirme yorulma ömür çizgileri (Brown 1978).

4.1.5. İndirekt Çekme Testinde Kontrollü Deformasyon Artması ve Bozulma Durumları

Tekrarlı indirekt çekme testi, laboratuvar sıkıştırma işlemlerinin denenmesi için başlangıçta SHRP A303-A projesinde kullanılmıştır. Test, yoğurmalı (gyratory), örseleme (kneading) ve silindirle sıkıştırılmış pek çok numunenin yorulma karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Test aleti 144 numune için kullanılmıştır. Yorulma davranışında sıcaklığın etkisinin incelenebilmesi için bu testlerin üçte ikisi 4°C'de ve üçte biri ise 20°C'de yapılmıştır (SHRP A 404-A).

Yorulma çalışmasının belirlenmesinde tekrarlı indirekt çekme deneyi kullanma mantığı, numuneyi iki parçaya ayıran çekme gerilmelerini azaltan tekrarlı yüklemedir. Genelde yorulma ömrü numuneyi parçalayan ya da iki parçaya ayıran tekrar sayısı olarak belirlenir. Bozulma anını belirlemek için, numuneye metal bir bant yerleştirilir ve test bu bant koptuğunda sona erer. Testler devam ederken, A-303A yöneticileri bu sistemi düşey deformasyonun sınırlandırılması ile değiştirmişlerdir. 20°C için, 1,25 cm düşey deformasyon; 4°C, 0,50cm düşey deformasyon seçilmiştir. Tecrübeler sonucunda, bu limitlere ulaşılmadan dahi numuneler sıklıkla parçalanmış ya da ikiye ayrılmıştır. Bu durumda deney limit deformasyona kadar devam etmektedir. Bununla birlikte bu prosedürü kullanarak düşey deformasyonun ilerlemesi hakkında bir fikir vermiştir.

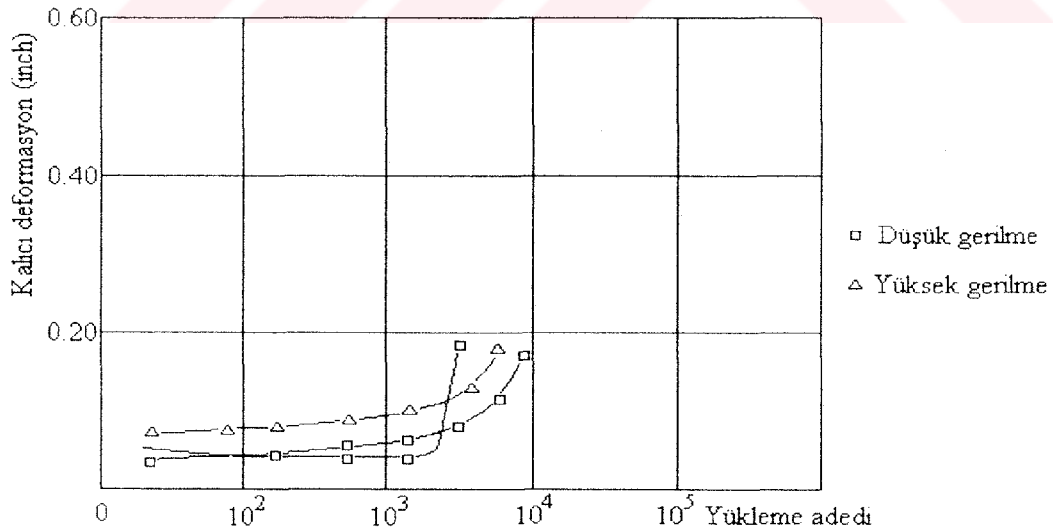


Şekil 4.1.5.1. 20°C'de tekrarlı yorulma testlerindeki düşey şekil değiştirmeler (SHRP A 404-A)

Şekil 4.1.5.1'de 20°C'de rasgele seçilmiş 6 deney sonucunu yükleme adedi – kalıcı deformasyon ilişkisini göstermektedir. Açıkça görüleceği üzere kalıcı deformasyon burada etkili bir şekilde ilerlemektedir. Gözlem sonuçlarından bazı testlerin numunelerin ikiye ayrılmadan önce kalıcı deformasyon sınırı olarak belirlene 1,25cm'ye ulaştığı belirlenmiştir. Buradan da, bozulmanın kalıcı deformasyon ve yorulma çalışmasının bir kombinasyonu olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca bazı numunelerin beklenen düşey aks boyunca çatlamadığı aksine yükleme kafaları köşelerinden çatlamaya başladığı gözlenmiştir (Şekil 4.1.5.2.).

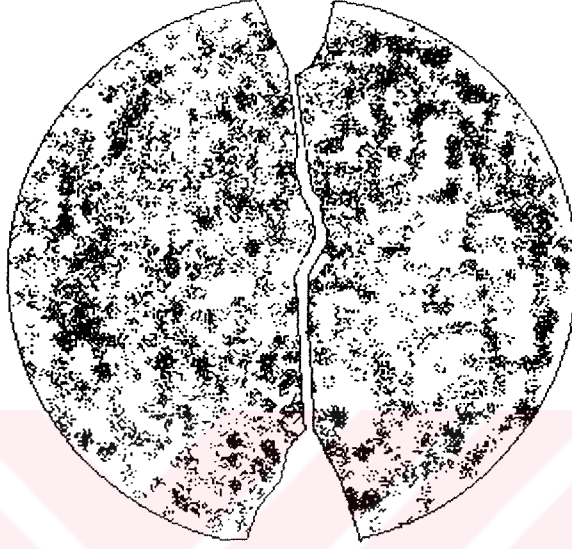


Şekil 4.1.5.2. Sousa ve arkadaşları tarafından verilen 20°C'de bazı numunelerinin bozulma diyagramı (SHRP A404-A)



Şekil 4.1.5.3. 4°C'de tekrarlı yorulma testlerindeki düşey şekil değiştirmeler (SHRP A 404-A)

Şekil 4.1.5.3. Plastik deformasyonun zamana bağlı olarak ilerlemesini 3 rasgele seçilmiş deney sonucu olarak göstermektedir (4°C). Kalıcı deformasyonun ilerlemesi 20°C'ye göre oldukça azdır. Numuneler oldukça gevrekler ve düşük sıcaklık testlerinde numunelerin çoğu ikiye ayrılarak kırılmışlardır. Bununla beraber, alışılmışın dışında bir kısmı da yükleme kafalarının altında kırılarak bozulmuşlardır (Şekil 4.1.5.4.).



Şekil 4.1.5.4. Sousa ve arkadaşları tarafından verilen 20°C'de bazı numunelerinin bozulma diyagramı (SHRP A404-A)

Numuneler merkezi çekme gerilmeleri sonucu oluşan yorulma çalışmasından kırılmamış, yükleme kafası köşelerinde oluşan kesme gerilmelerinden kaynaklanan yorulma ve hızla merkeze ilerleyen çatlak sonucu kırılmışlardır.

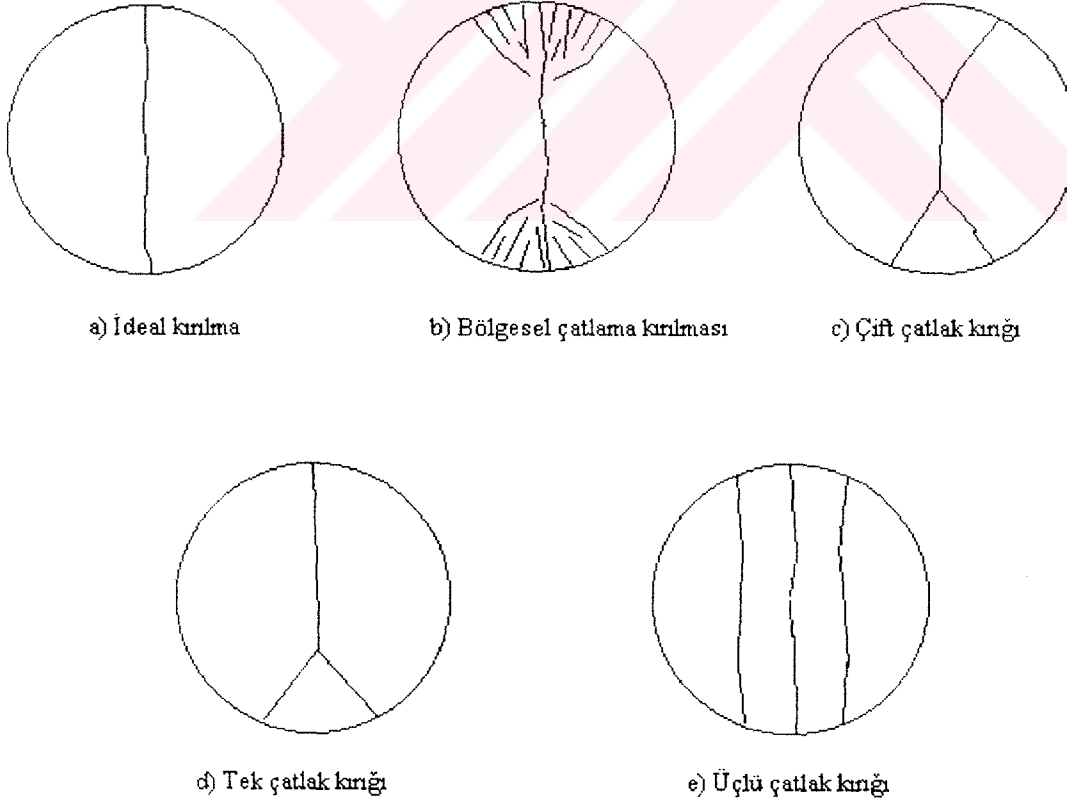
Hudson ve Kennedy tarafından, merkezi aksta (düşey ekseninde) bozulma haricinde rapor edilmiş bozulma modları şunlardır (SHRP A404-A):

- Numunede merkeze yakın bir yerde çatlak başlar ve sonuçta numune düşey düzlemde ikiye ayrılır. Başlangıç çatlağı bazen yaklaşık 1cm aralıklı paralel çatlaklar şeklinde oluşabilir. Numunelerinin yaklaşık %40'ı bu formda özellikle düşük sıcaklıklarda kırılmışlardır.
- Çatlak başlangıcı, numunenin üst tarafında (bazı durumlarda alt tarafta) oluşur ve ileride çatlak aşağı veya yukarı doğru ilerler ve numunenin bozulması ile sonuçlanır. Başlangıç çatlağı genel olarak V şeklindedir. V şeklinin kolları

yukarıda yükleme platininin kenarlarının dışından başlar ve V'nin altı yaklaşık 1-2cm aşağıdadır. Numunelerinin %40'ı bu bozulma formu ile kırılmışlardır.

- Gerçek kırılmanın görülmeyişi durumlarda ise numune limit deformasyon sınırına kadar deforme olur. Plastik deformasyon bazı durumlarda, silindirik numunenin hem düşey eksininde hem de düzgün yüzeylerinden dışa doğru olur. 20°C'de pek çok numune bu şekilde bozulmuştur. 96 numunenin 11'i 4°C'de bu şekilde bozulmuştur. Bu numuneler yoğurma (gyratory) ya da örseleme (kneading) metodu ile sıkıştırılmışlardır ve yüzeyleri kesilmediği için pürüzlü yüzeye sahiptirler. Silindir sıkıştırması ile plak olarak dökülen ve karot alınan düzgün yüzeyli numunelerde, bu kırılma şekli görülmemiştir. Bu bozulma türünün temel sebebi, yükleme kafası altında kesilmemiş olan yassı agregalar olabilir.

Pek çok durumda, daha önce belirtildiği gibi, bazı plastik deformasyonlar merkezi çizgi boyunca çatlama ile beraber olur. Hudson ve Kennedy tarafından belirlendiği çatlak tipleri Şekil 4.1.5.5'de verilmiştir (SHRP A404-A).



Şekil 4.1.5.5. Hudson ve Kennedy'nin belirlendiği çatlak tipleri (SHRP A404-A)

4.1.6. Test limitleri

Asfalt-agrega karışımlarının yorulma karakteristiğinin belirlenmesinde aşağıdaki şartlar sağlandığında indirekt çekme testinin kullanımının uygun olacağı kabul edilmiştir (SHRP A404-A).

- Laboratuvar şartları altında gözlenen yorulma tipleri, teorik beklentileri sağlamalıdır.
- Laboratuvar yükleme şartları gerçek yolda beklenen değerlere benzer olmalıdır.
- Yorulma dayanımı gerilme değişiminden ve kalıcı deformasyon artışından etkilenmemelidir.
- Yorulma dayanımına, karışım ve test metodunun etkileri kabul edilebilir seviyede olmalıdır.
- Bir karışımının gerilme veya şekil değiştirme davranışı numunenin belirli kesitlerindeki gerilme-şekil değiştirme durumuyla orantılı olmalıdır.

İndirekt çekme testi aşağıdaki sınırlamalara maruzdur:

- İndirekt çekme yorulma testi sonuçları, yükleme platinleri altında kırılma ya da platinlerden başlayan çatlamlalarda iptal edilmelidir.
- Test, gerçek yoldaki yükleme şartlarına yakın değerlerde yapılmalıdır. Kontrollü gerilme testi ince ve viskoz olan bağlayıcılı katmanlarda ya da nispeten zayıf zeminli yapılarda ya da her ikisinde kullanılabilir.
- Test 20°C'den daha yüksek sıcaklıklarda yapılmamalıdır. Böylece malzeme lineer ve elastik kalacak, ayrıca esnek çekme birim şekil değiştirmesinin belirlenmesinde kullanılan Poisson oranı için gerekli olan esnek düşey deformasyonlarının ölçümünde, yükleme platinleri yanındaki gerilme yığılmalarının etkisi önlenmiş olacaktır. Yorulma testi, indirekt çekme modunda kesilmiş yüzeyli numunelere uygulanmalıdır. Böylece çekme bozulması bölgesi dışındaki çatlak başlangıcı ihtimali azalacaktır.

Yukarıda yapılan değerlendirmelere göre, indirekt çekme testi, kontrollü gerilme modunda yorulma araştırmaları için 20°C ve altındaki sıcaklıklarda kullanılabilir. Numune yüzeylerinin kesilmiş olması gerekir. Oluşan kalıcı deformasyonlar oldukça küçük miktardadır. Çatlak formu ve ilerlemesi yorulma bozulmasını belirleyici özelliğe sahiptir. Bununla birlikte indirekt çekme testi çekiciliğine rağmen, bu test günlük rutin karışım tasarımı ve analizi için uygun değildir, çünkü:

1. Beklenilmeyen bozulma formlarının olma olasılığının çok olması,
2. Yükleme platinlerinde gerilme yığılmaları,
3. Kontrollü gerilme modu ile sınırlı olmasıdır. Buna ilave olarak tek eksenli gerilme durumu, gerilme alanlarının değişimli olmaması, tekrarlı çekme yükleme dayanımında kalıcı deformasyon etkisi ile ilgili ciddi sorunlar vardır.

4.1.7. Test Şartları

Hem gerilme hem de şekil değiştirme kontrollü testler SHRP A303-A projesinde göz önüne alınmıştır. Yükleme modu ile ilgili değerlendirmeler deney sonuçlarının analizlerinden sonra yapılmıştır. Modern yükleme ve kontrol üniteleri, testlerini hızlı şekilde sürdürmek ve doğruluğu artırmak için kullanılmıştır. Testlerde kullanılan frekans 10 Hz'dir. Bu frekans hızla akan trafiği temsil edebilen ve hızlı olan test için yeterlidir. Test sıcaklığı bölgesel şartlara bağlı olarak olup, kontrollü ısı kabini 0-20°C'ye kadar yeterli hassasiyet göstermektedir.

SHRP A 404-A (1994) projesi, test programının sonunda;

- İndirekt çekme testi güvenilir olmasına rağmen, karışım kompozisyonu ölçümlerindeki hassasiyeti, eğilme testinden kötüdür.
- Ölçülen sertlik modülleri oldukça büyüktür. Yorulma, bozulma ve yükleme sayısı son derece küçüktür.
- İndirekt çekme testi ile sertlik modülü bulunmasında agrega tipi haricinde diğer karışım ve yükleme özelliklerinin daha fazla etkili olduğu bulunmuştur.

SHRP A 404-A araştırma programında, kiriş ve konsol testleri arasında kayda değer bir fark bulunamamıştır.

Kiriş testleri üniform gerilme dağılımı ile avantajlı olmalarına ve numune yapıştırması gerektirmemesine rağmen, kiriş ve konsol testleri asfalt-agrega yorulma davranışı analizinde eşdeğer görülmektedir. Bununla birlikte araştırmacılar, kiriş testini tanınmışlığı ve yazılımı için tercih etmektedirler.

4.2. Laboratuar Çalışması

Bu bölümde, bitümlü sıcak karışımlar üzerinde yapılan Marshall Metodu , serbest basınç mukavemeti ve yorulma deneyleri verilmektedir.

4.2.1. Marshall Metodu deneyi

Bu metot, en büyük dane büyüklüğü 25 mm (1 inç) veya daha küçük agregata ihtiva eden ve bağlayıcı olarak asfalt çimentosu, sıvı petrol asfaltı veya katran kullanılarak hazırlanan sıcak karışım asfalt kaplama karışımlarına uygulanır. Bu metot sıcak karışım asfalt kaplamaların laboratuvar dizaynı için tasarlanmıştır. Marshall metodunda işlem deney numunelerinin hazırlanması ile başlar. Ancak bundan önce aşağıdaki işlemlerin yapılmış olması gerekmektedir.

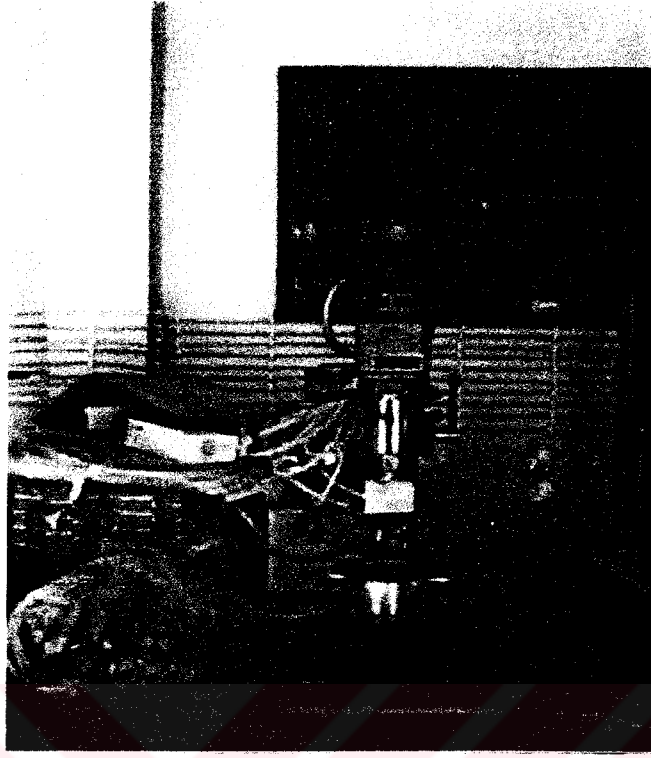
a) Karışımda kullanılacak malzemenin şartnamede istenilen özelliklere uygunluğunun kontrolü,

b) Agregata karışım gradasyonunun şartname gradasyonuna uygunluğunun kontrolü,

c) Yoğunluk ve boşluk analizlerinde kullanmak için, karışımda kullanılan agreganın hacim özgül ağırlığı ve asfalt çimentosunun özgül ağırlığının tayinidir. Bunlar rutin testlerin, şartnamelerin ve laboratuvar tekniğinin gereklilikleridir ve bir çok karışım dizaynında yapılması gereken işlemlerdir (Önal ve Karaca, 1990).

Briketlerin hazırlanmasında TS 3720'nin (ASTM D1559) öngördüğü hususlardan hareket edilir. Her bağlayıcı yüzdesi için 3 adet briket numunesi hazırlanır ve her bir briket için 1200 gram agregata alınır. TS 3720'ye (ASTM D1559) uygun olarak hazırlanan agregata numuneleri 135°C karışım sıcaklığına kadar ve bağlayıcı da aynı şekilde karışım sıcaklığına kadar ısıtılır. Isıtılmış agregata karıştırıcının kovasına alınarak bağlayıcıdan uygun miktar da dökülür. Agregata, bağlayıcı malzeme ile iyice kaplanıncaya kadar Resim 4.2.1.1'de gösterilen karıştırıcı ile iyice karıştırılır.

Karıştırma işlemi 1,5-2,0 dakikalık süreyle yapılır. Numune kalıpları her seferinde iyice temizlenir. Daha önceden etüvde ısıtılan kalıpların çapına göre daire şeklinde kesilen pelür kağıt, malzeme konmadan önce kalıbın tabanına yerleştirilir. Karışım, ayrışma olmamasına özen gösterilerek daha önceden ısıtılmış olan sıcak bir kürek ile kalıba aktararak, 15 defa kenarları ve 10 defa ortası ıspatula ile şişlenir. Numune üzerine tekrar pelür kağıt konarak sıkıştırma aletine yerleştirilir ve 457 mm yükseklikten serbest olarak düşen sıkıştırma tokmağı ile numuneye 75 darbelik sıkıştırma yapılır ve bu işlem aynı numune ters çevrilerek tekrarlanır (Resim 4.2.1.2.).



Resim 4.2.1.1. Karıştırıcı



Resim 4.2.1.2. Otomatik ayarlı sıkıştırma tokmağı

Bu şekilde hazırlanan briketler, soğuduktan sonra numune çıkartma cihazıyla kalıptan çıkartılarak bütün numuneler tamamlanıncaya kadar laboratuvar sıcaklığında bekletilir. Sonra her bir numunenin yüksekliği üç yerinden kumpasla ölçülür, havada ve sudaki tartmaları ile doymun yüzey-kuru tartmaları yapılır.

Hazırlanmış briket numuneleri sıcaklığı $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ olan su banyosuna yerleştirilerek 30-40 dakika su içerisinde bekletilip sonra kırılır. Numunelere elektronik Marshall yükleme aygıtı yardımı ile yükleme yapılır. Yüklemeye 51 mm/dakikalık sabit bir deformasyon hızıyla en büyük yük değerine ulaşınca kadar devam edilir. En büyük yük değerine ve buna karşılık gelen akma değeri aletin ekranında okunarak kaydedilir (Resim 4.2.1.3.). Numuneyi su banyosundan çıkarma, kırma kafasına yerleştirme ve yükleme aygıtına koyma , flowmetreyi ayarlama ve numunenin kırılıp en büyük yüke erişmesi işlemleri 30 saniyeden az bir zaman zarfında yapılır. Marshall stabilitesi 63.5 mm yüksekliğindeki numuneler için bulunan değer gerçek değerlerdir. Bu kalınlıktan farklı numuneler için EK 1’de verilen tablodaki “Marshall Stabilite Faktörleri” katsayıları kullanılarak düzeltilip stabilite değerleri bulunarak işlemler yapılır. Marshall yükleme aletinde stabilite “kN” ve akma “mm olarak okunur. Okunan stabilite değerleri “kgf” cinsine çevrilip daha sonra düzeltilen stabilite değerleri bulunur.



Resim 4.2.1. 3. Elektronik Marshall yükleme ve akma ölçme aygıtı

Aynı bitüm yüzdesindeki üç numunenin havadaki, sudaki, ve doygun yüzey-kuru haldeki ağırlıkları tespit edilir ve hacimleri bulunur. Pratik özgül ağırlıkları hesaplanır. Pratik özgül ağırlıklarının birbirine göre 0.02 toleransı içinde olanlardan en az ikisinin ortalaması alınarak ortalama hanesine kaydedilir. Üçü de tolerans içinde değilse o yüzdesi için deney yenilenir.

Aynı bitüm yüzdesindeki üç numunenin kırılma yüklerinin en büyük ve en küçük değerleri arasındaki fark 120 kgf geçmez ise üçünün ortalaması Marshall stabilitesi olarak alınır. Eğer fark bu değerden büyük ise, aralarındaki 60 kgf'den fazla olmayan iki değer ortalaması Marshall stabilitesi olarak kabul edilir. Bu da sağlanmadığı takdirde deney yenilenir. Ayrıca aynı bitüm yüzdesindeki üç numunenin akma değerlerinin ortalaması alınır.

Hesaplamalarda kullanılan bağıntılar aşağıda gösterilmiştir.

$$V = B - C \quad (4.5)$$

$$D_p = \frac{A}{V} \quad (4.6)$$

$$D_{Port} = (D_{p1} + D_{p2} + D_{p3})/3 \quad (4.7)$$

$$W_a = \frac{M_b}{M_a} \times 100 \quad (4.8)$$

$$W_b = \frac{M_b}{M_a + M_b} \times 100 \quad (4.9)$$

$$G_{ag} = \frac{100}{\frac{P_k}{G_k} + \frac{P_i}{G_i} + \frac{P_f}{G_f}} \quad (4.10)$$

$$D_T = \frac{100}{\frac{100 - W_b}{G_{ag}} + \frac{W_b}{G_b}} \quad (4.11)$$

$$V_h = \frac{D_T - D_{Port}}{D_T} \times 100 \quad (4.12)$$

$$V_b = \frac{D_{Port} \times W_b}{G_b} \quad (4.13)$$

$$V_a = 100 - (V_h + V_b) \quad (4.14)$$

$$V.M.A = 100 - V_a = (V_h + V_b) \quad (4.15)$$

$$V_f = \frac{V_b}{V.M.A} \times 100 \quad (4.16)$$

4.2.2. Serbest Basınç Mukavemeti Deneyi

Asfalt beton numunesinin basınç direnç değerini elde edilebilmek için, yükleme hızı ve uygulanacak gerilmelerin sınır değerleri, ayrıca asfalt betonun sınıfı ve performansı dikkate alınarak çeşitli basınç direnç deney aletleri geliştirilmiştir. Ancak bu aletlerde ortak özellik olarak:

1. Yükleme mekanizmasındaki alt ve üst tablaların kolaylıkla merkezleştirilebilir ve numuneye tam olarak temas edebilir,
2. İstenen sabit yükleme hızı elde edilebilir,
3. Gerilme ve deformasyon bilgilerinin mekanik veya elektronik ortamda en hassas duyarlılıkta elde edilebilir,

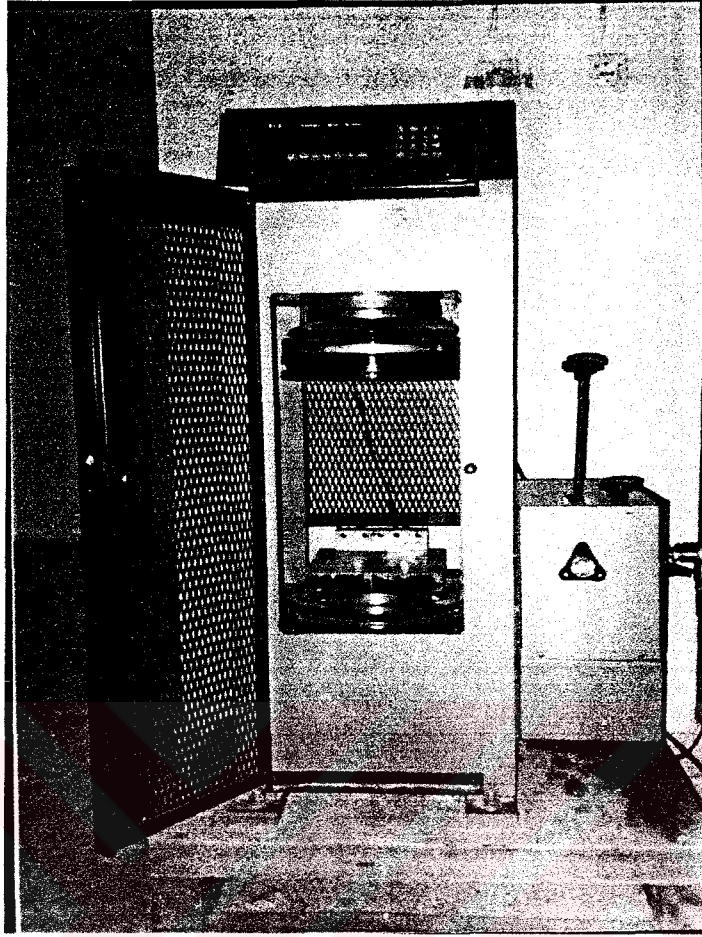
koşulları aranmaktadır.

Numunelerin alt ve üst yüzeyleri arasında oluşabilecek paralellik aksamasının giderilmesi amacıyla basınç direnç deney aletinin üst yükleme plakasının küresel mafsallı olması aranan diğer bir özelliktir (Ağar ve diğ., 1998).

Serbest basınç mukavemeti deneyi elektronik yükleme aygıtı yardımı ile yapılır. Yüklemeye 8mm/dakikalık sabit bir deformasyon hızıyla en büyük yük değerine ulaşıncaya kadar devam edilir. En büyük yük değeri aletin ekranında okunarak kaydedilir (Resim 4.2.2.1.).

Serbest basınç mukavemeti üç numune dayanımının ortalaması olarak alınır. Deney hem standart deney sıcaklığında (20°C) hem de 50°C'de yapılır.

Numunelerin don olayına karşı dayanıklılığını tespit etmek amacıyla donma-çözülme deneyi yapılır. Bunun için, numuneler 4 saat -20°C ısıda derin dondurucuda bekletildikten sonra yine 4 saat +20°C ısıdaki su banyosuna daldırılarak bekletilir. 25 devre donma-çözülme periyotlarından sonra numuneler basınç direnç deneyine tabi tutulur.



Resim 4.2.2.1. Elektronik basınç direnç deney aleti

Ayrıca serbest basınç mukavemeti deneylerin değerleri kullanılarak aşağıdaki katsayılar elde edilebilir (Grushko ve diğ., 1991)

1. Isıya dayanıklılık katsayısı – K_I

$$K_I = \frac{R_{20}}{R_{50}} \quad (4.17)$$

2. Dona karşı dayanıklılık katsayısı – K_d

$$K_d = \frac{R_d}{R_s} \quad (4.18)$$

3. Suya dayanıklılık katsayısı - K_s

$$K_s = \frac{R_s}{R_K} \quad (4.19)$$

Bunun dışında, su absorbsiyon yüzdesi (S) aşağıdaki formüle göre hesaplanır;

$$S = \frac{C - A}{A} \times 100 \quad (4.20)$$

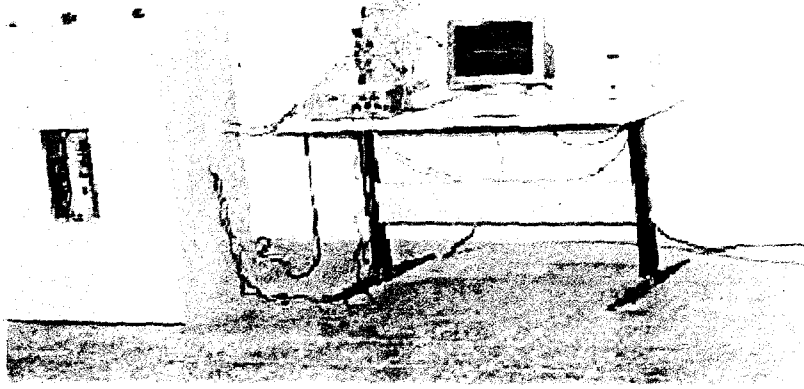
4.2.3. Yorulma deneyi

Her bir gerilme düzeyi için üç adet Marshall numunesi hazırlanır ve 3 farklı gerilme düzeyinde yorulma deneyleri yapılır. Yorulma deneyleri, tekrarlı yarım sinüs yük dalgaları ile 1sn yükleme ve 1sn dinlenme olacak şekilde yapılır. Isıl işleme tabi tutulan numunelere, numune çerçevesi yarımıyla yatay deplasman ölçerleri (LVDT) sabitlenir (Resim 4.2.3.1) (Tığdemir, 1999).

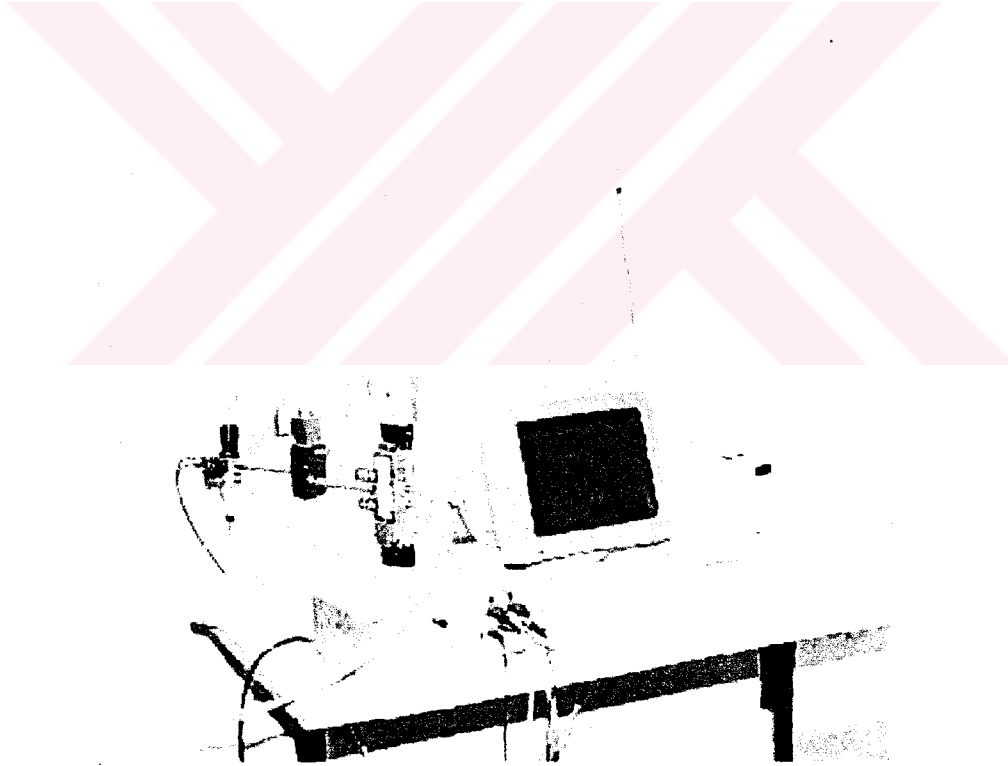
Numune, alt ve üst yükleme kafası arasına yerleştirilir. Kabin termostatları deney öncesinden, istenen sıcaklığa sabitlenir. Deney otomasyon programı çalıştırılır. Program çalıştırıldıktan sonra, deneyin başlatılabilmesi için gerekli olan işlemler ekrana yazılarak bildirilir (Resim 4.2.3.2-3).



Resim 4.2.3.1. Yorulma deneyi için numune sabitleme çerçevesi



Resim 4.2.3.2. Tekrarlı çekme indirekt yükleme deney aletinin genel görünümü



Resim 4.2.3.3. Yorulma deney aleti, pnömatik yükleme sistemi ve bilgisayar-kontrol ünitesi

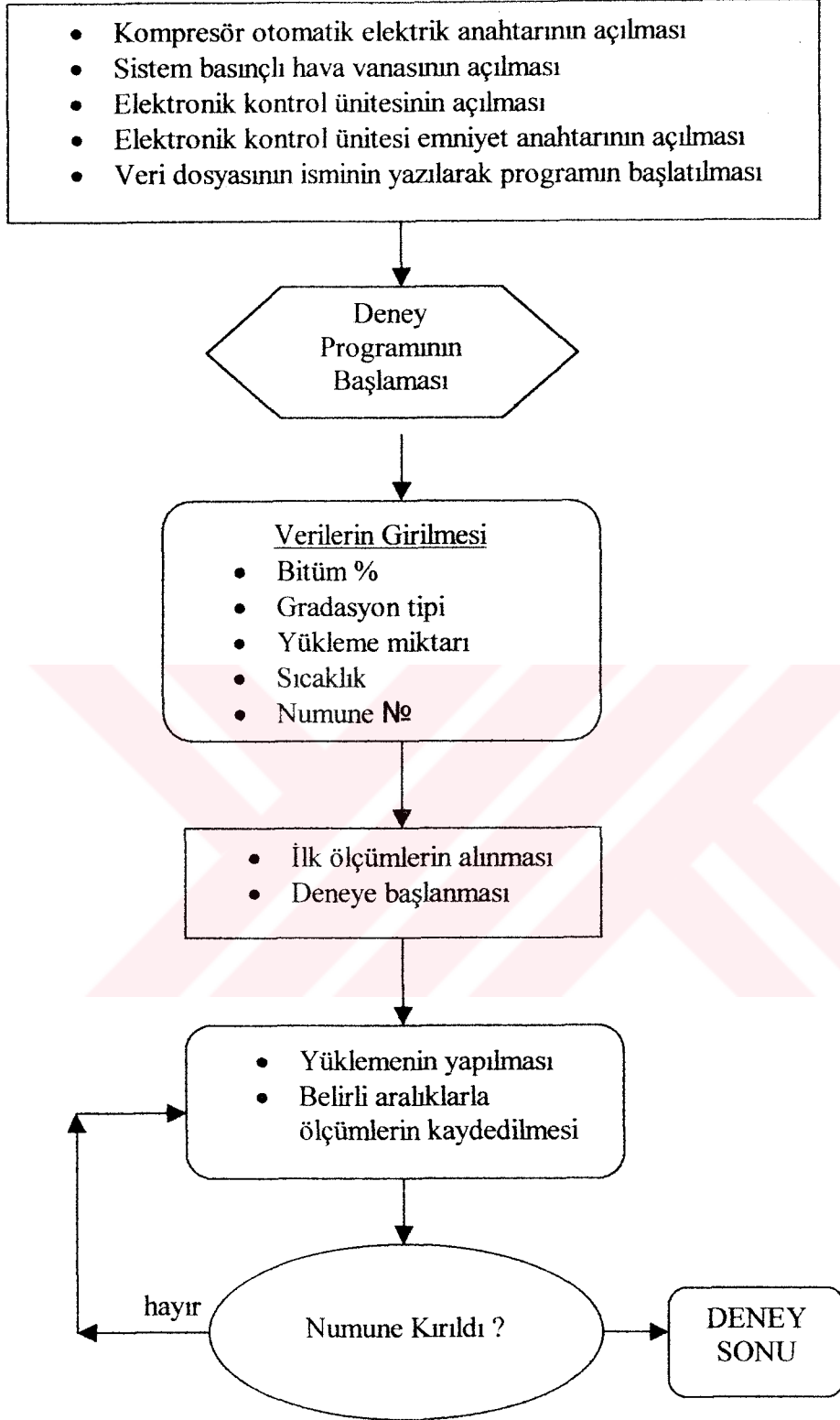
Programın istediği veriler şunlardır:

- Bitüm yüzdesi sınıfı (Optimum)
- Gradasyon tipi (Tip I)
- Düşey yükleme değeri (90, 100, 110 kg)
- Yükleme ve dinlenme süreleri (1sn-1sn)
- Sıcaklık değeri (25°C)
- Numune №

Bu değerler, program tarafından kodlanarak veri dosyası ismi haline getirilmektedir. Böylece ileride program veri dosyalarına bakılarak, veri hakkında bir fikir elde edilebilir. Bu bilgilerin girilmesinden sonra program, pistonunu numune üzerindeki yükleme kafasına bir defa indirilir ve o durumda iken yatay deformasyon ölçüm transdüserlerinin ayarlarının yapılması için kullanıcıyı yönlendirir. Kullanıcı bilgisayara LVDT'nin son konumlarını tanıtmak zorundadır. Böylece bilgisayar transdüserlerin ilk ve son konumlarını öğrendikten sonra, kullanıcı deneyi başlatabilir. Deney başlatıldıktan sonra deneyin tüm kontrolü ve tüm işlemleri otomatiktir. Bu işlemler; verilerin toplanması, kompresörün sürekli olarak basınçlı hava sağlaması, deneyin bitirilerek sistemdeki basınçlı havanın tahliye edilmesi, kabin içi sıcaklığının sabit bir değerde tutulmasıdır (Tığdemir, 1999).

Deneyin bitirilmesi, yani numunenin kırılması iki şarta bağlanmaktadır: piston kolunun düşey olarak gidebileceği son noktaya gelmesi veya yatay olarak transdüserin son konumuna gelmesidir. Bu koşullardan herhangi birisi meydana geldiğinde bilgisayar piston kolunu geri çekmekte, basıncı sıfırlamakta ve son değerleri veri dosyasına kaydedip tüm verileri saklamaktadır. Bu şekilde deney bitirilmektedir (Tığdemir, 1999).

Deneyin yapılışı gösteren akış diyagramı Şekil 4.2.3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2.3.1. Deney programı akış diyagramı (Tığdemir ,1999)

5. AĞAÇ KATRANI İLE BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MODİFİKASYONU

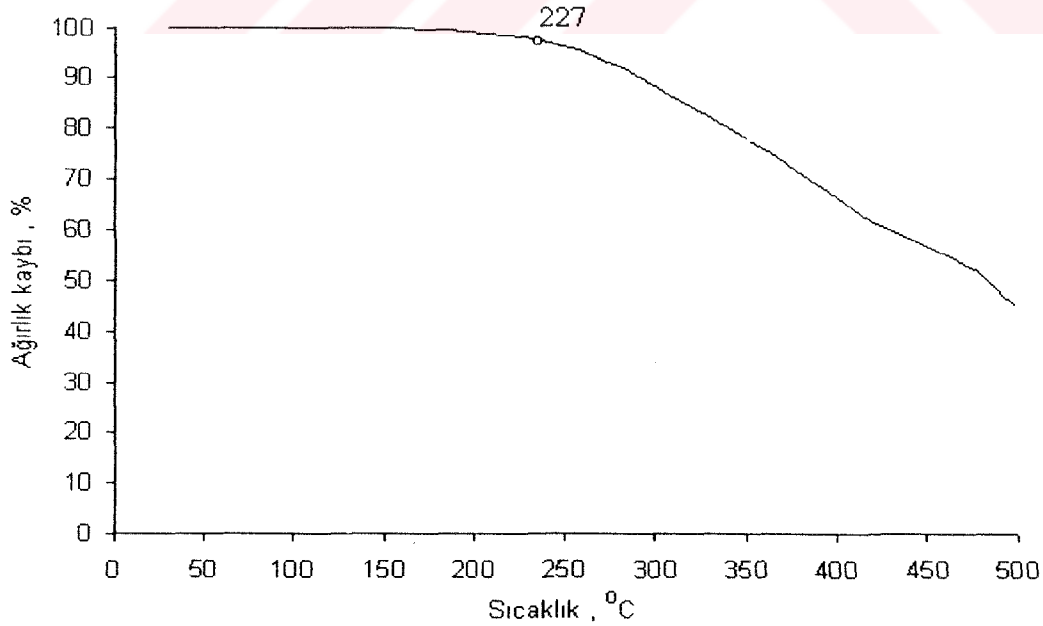
5.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bu deneysel çalışmada, esas bağlayıcı olarak AC 100/150 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılmıştır. Asfalt çimentosunun maliyeti 2001 yılı birim fiyatlarına göre 108000000 TL / Ton'dur. Asfalt çimentosunun fiziksel özellikleri Tablo 5.1.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1.1. Asfalt çimentosunun fiziksel özellikleri.

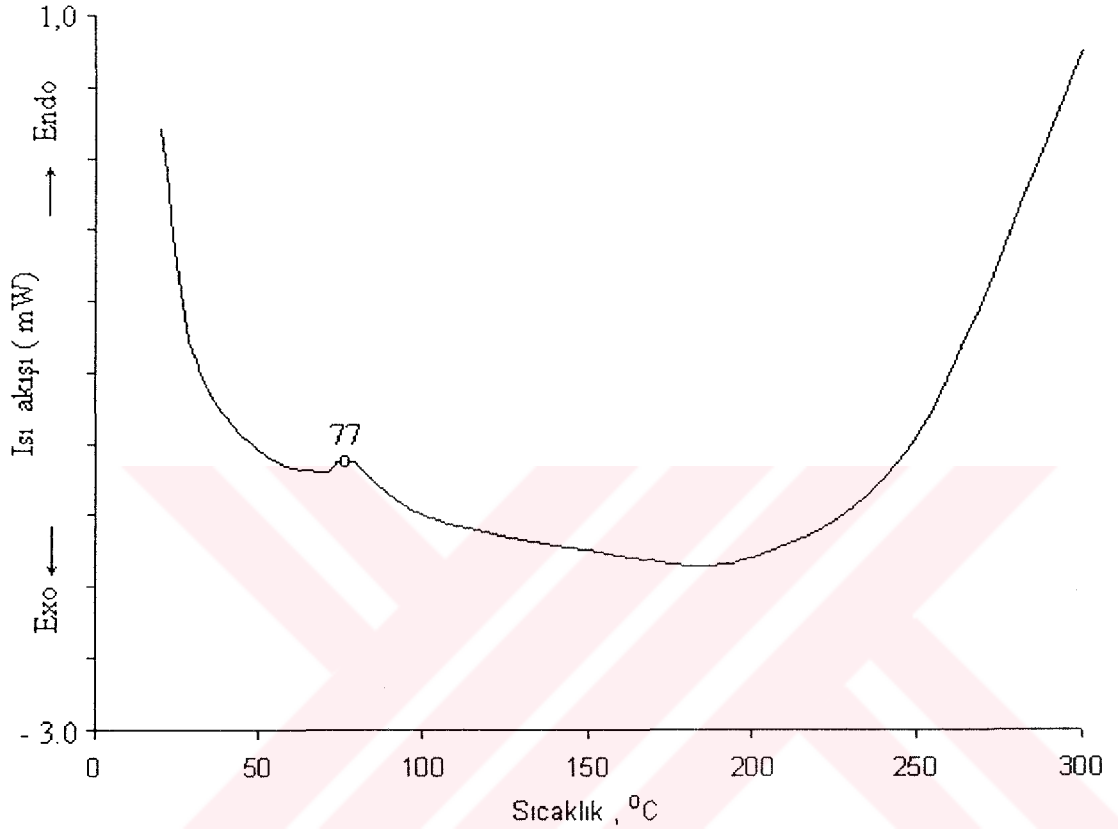
Özellikler	Test Sonuçları	Standartlar
Penetrasyon (0,1 mm) 25°C'de ,100gr, 5sn	140	TS 118 (ASTM D5)
Düktilite (cm) 25°C'de	98	TS 119 (ASTM D 113)
Yumuşama noktası (°C)	40	TS 120 (ASTM D 36)
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	1,0350	TS 1087 (ASTM D 70)

Asfalt çimentosunun termal stabilitesi termogravimetrik analiz (TGA) ile araştırılmıştır. Asfalt çimentosu azot atmosferinde 10°C/dk hızla 500°C'ye kadar ısıtılmıştır. Elde edilen termogramdan, asfalt çimentosunun 227°C'de bozulmaya başladığı görülmüştür (Şekil 5.1.1).



Şekil 5.1.1. AC 100/150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun TGA eğrisi

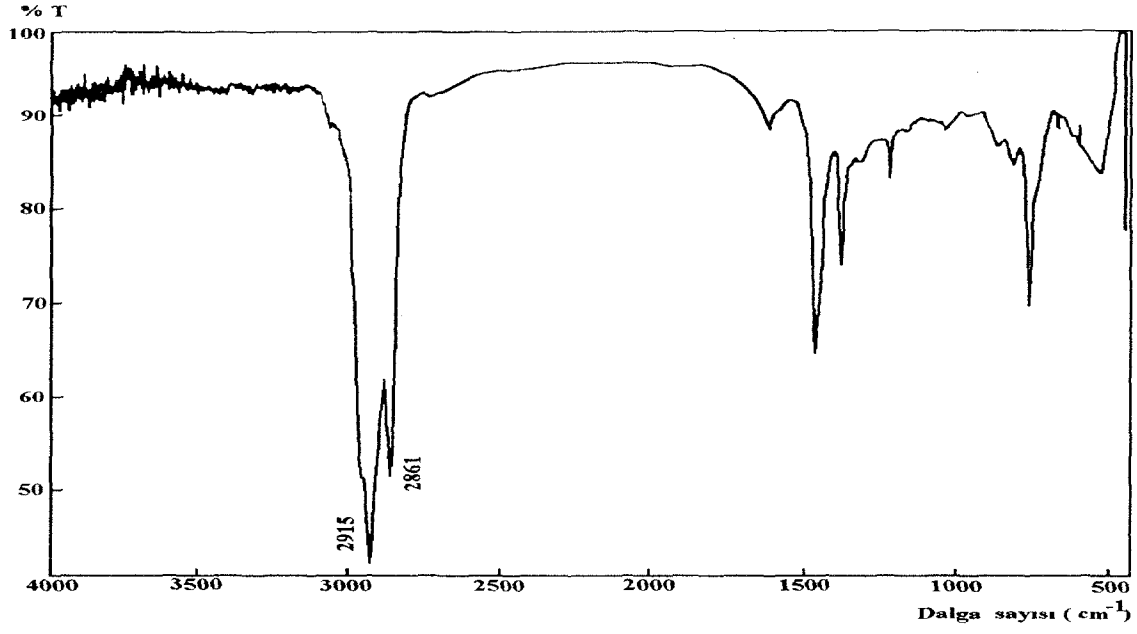
Asfalt çimentosunun ergime noktasının belirlenmesi için diferansiyel scanning kalorimetre (DSC)'de asfalt 20°C/dk ısıtma hızı ile 200°C'ye kadar ısıtılmıştır. Elde edilen DSC termogramından, asfalt çimentosunun ergime sıcaklığı 77°C olarak belirlenmiştir (Şekil 5.1.2).



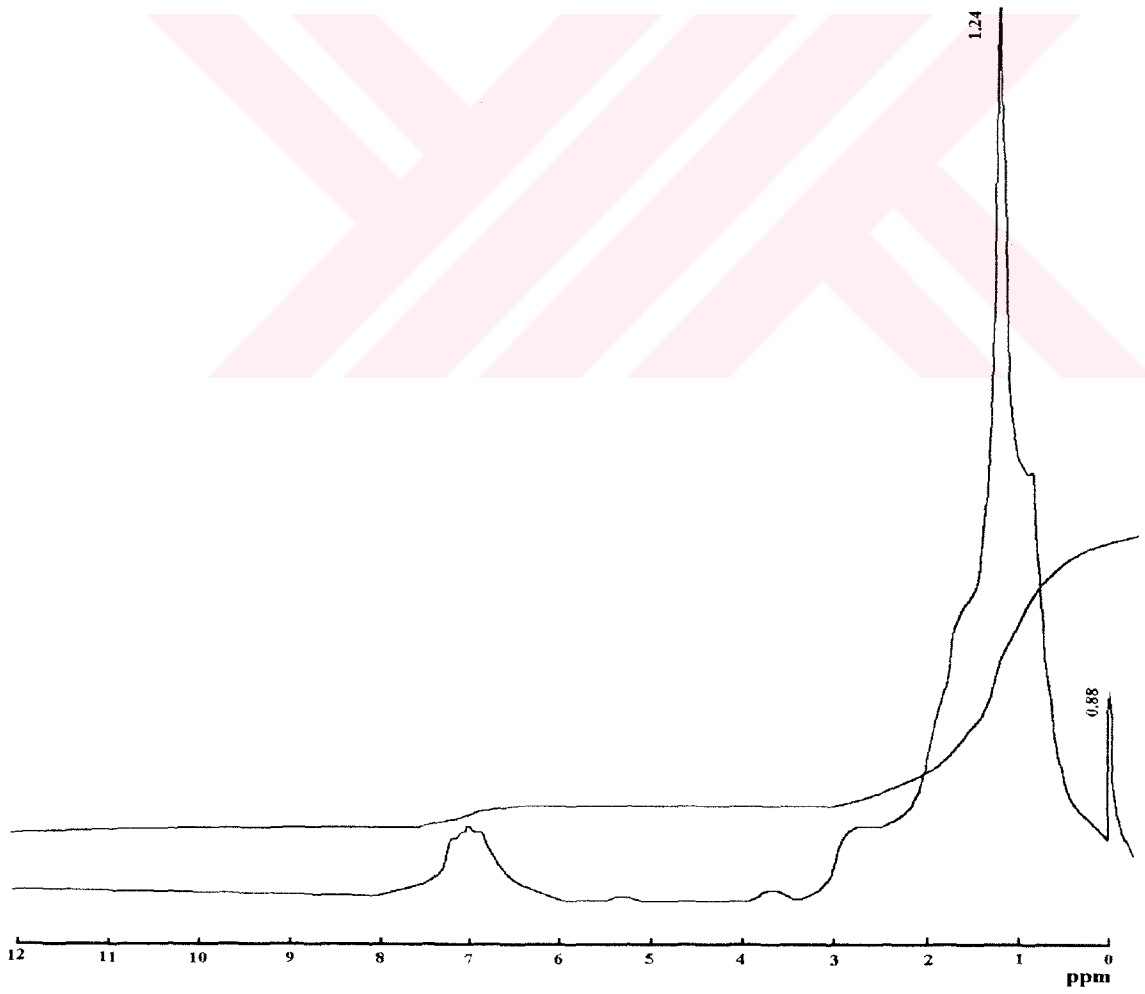
Şekil 5.1.2. AC 100/150 asfalt çimentosunun DSC eğrisi

Ayrıca AC 100/150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun kimyasal yapısı araştırılmış; bunun için asfalt çimentosu infrared veya kırmızı ötesi spektrum (IRS) ve nükleer manyetik rezonans spektroskopisi (^1H NMR) cihazlarıyla incelenmiştir (Şekil 5.1.3-4).

Şekil 5.1.3. incelendiğinde, asfalt çimentosuna ait IRS'da, 2915-2861 cm^{-1} 'de görülen piklerin, alifatik grubundaki C-H gerilme titreşimlerine ait olduğu görülmektedir. Şekil 5.1.4. incelendiğinde, asfalt çimentosuna ait ^1H NMR spektrumunda, $\delta=1,24$ ve $\delta=0,88$ ppm'deki sinyallerin alifatik hidrokarbonlara ait olduğu görülmektedir. IRS ve ^1H NMR spektrumlarına dayanarak AC 100/150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun yüksek moleküllü alifatik hidrokarbonlardan oluştuğu anlaşılmıştır.

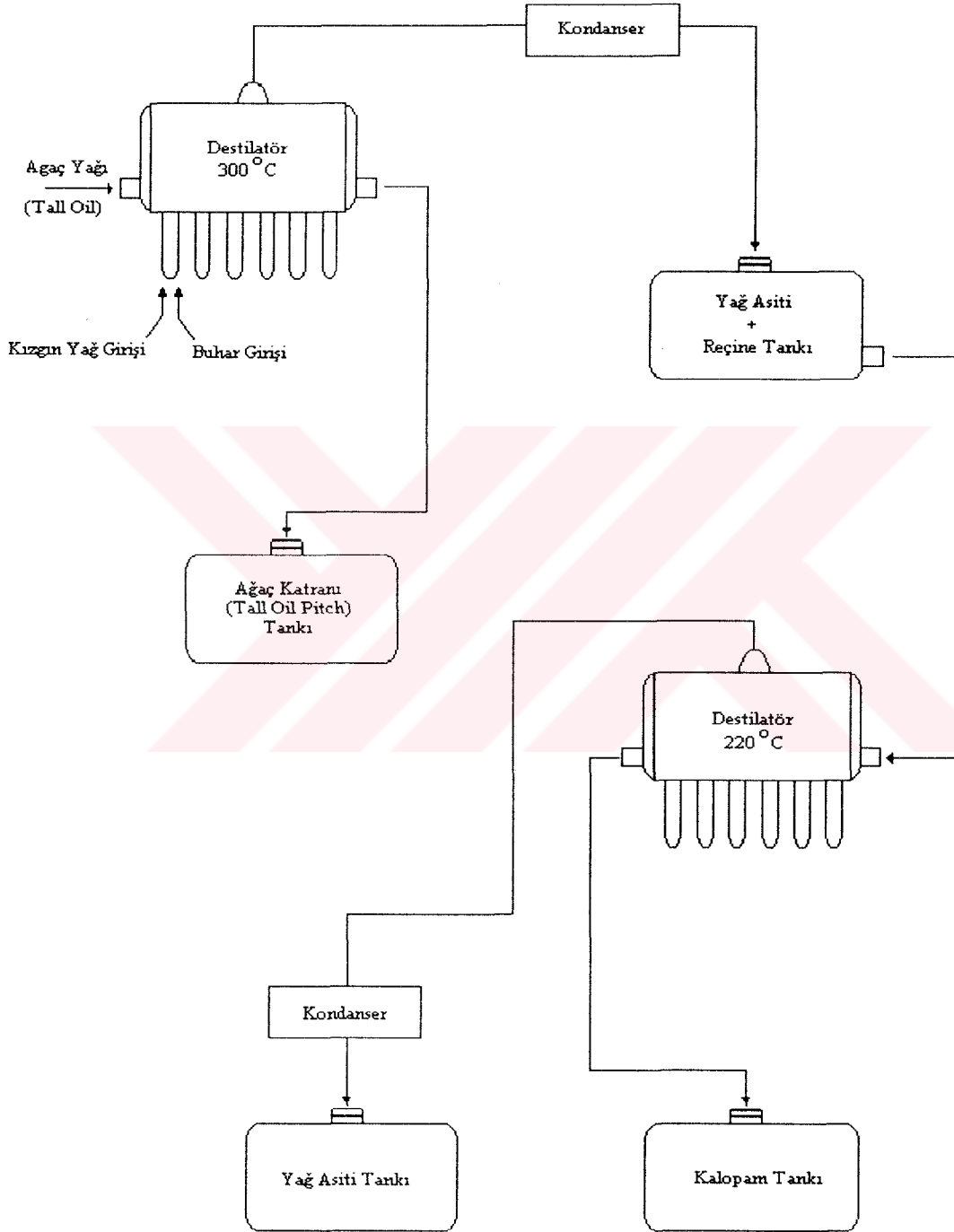


Şekil 5.1. 3. AC 100/150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun IRS eğrisi



Şekil 5.1. 4. AC 100/150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun ¹H NMR eğrisi

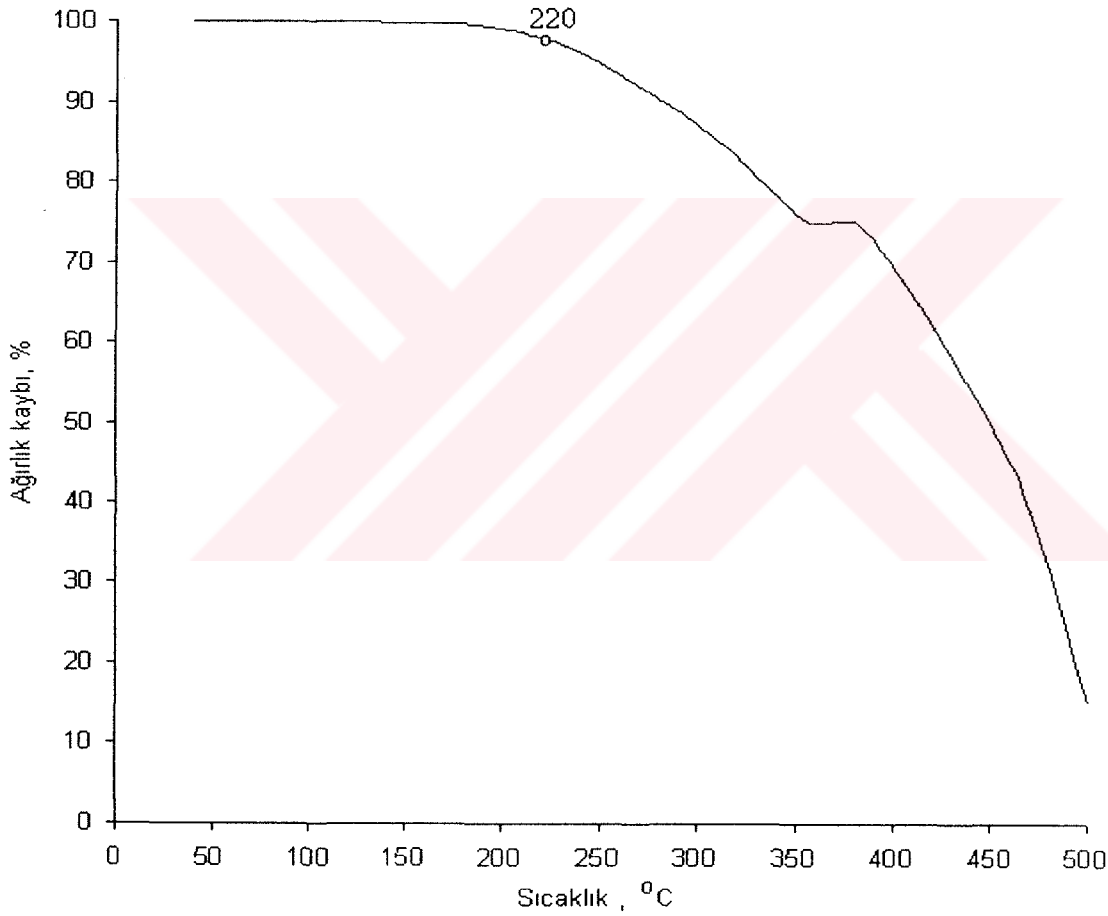
Bu çalışmada, modifiyer olarak Dalaman-Muğla Selüloz Kağıt (SEKA) fabrikasında kağıt üretiminden elde edilen ağaç yağının tasfiyesi sırasında atık malzeme olarak alınan ağaç katranı (AK) kullanılmıştır. AK'nın fabrika satış fiyatı 330000000 TL /Ton'dur. AK'nın fabrikada elde edilişi şematik olarak Şekil 5.1.5'de verilmiştir.



Şekil 5.1.5. AK'nın SEKA fabrikasında elde edilme şekli

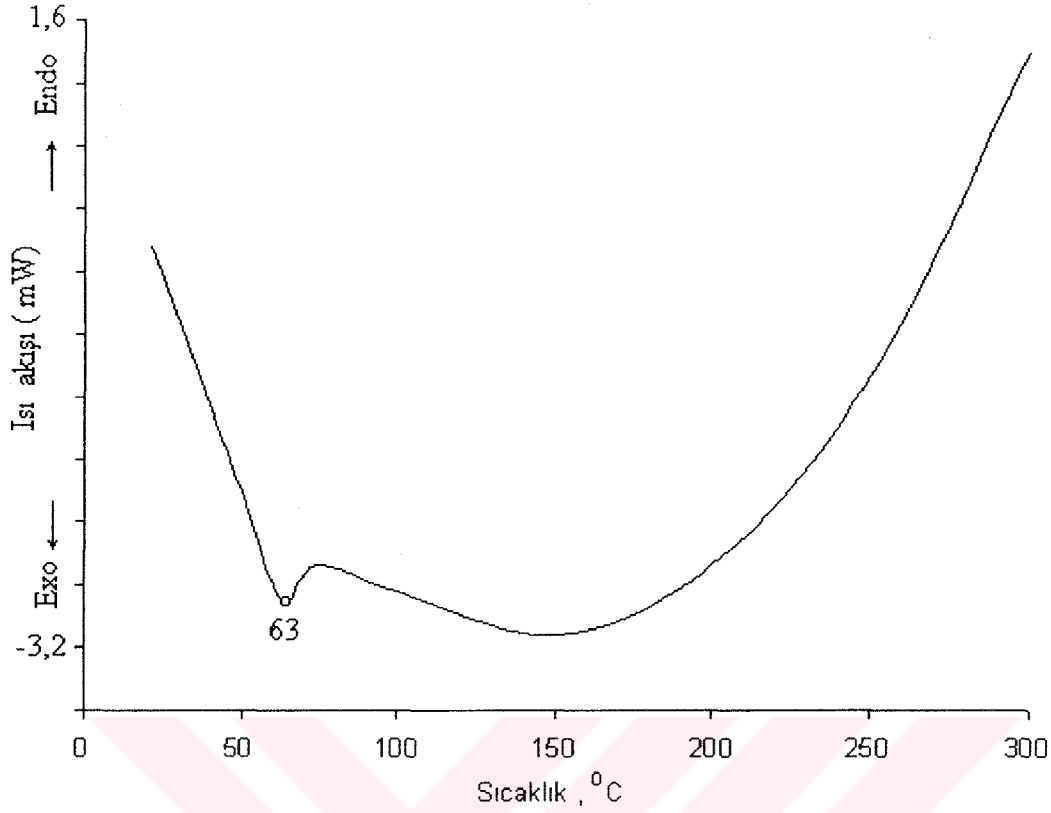
Birinci tasfiye aşamasında destilatörde 300°C’de ve 4-5 Hg/mm vakumda ağaç yağının uçucu kısmı (reçine ve doymuş karboksilik asitler) uçucu olmayan kısımdan (ağaç katranı) ayrılmaktadır. İkinci aşamada ise 220°C’de uçucu kısımdan kalopam ve doymuş karboksilik asitler elde edilmektedir. Dalaman-Muğla SEKA fabrikasından elde edilen AK’nın asitlik sayısı 80-90 mgr/gr arasında değişmektedir.

Ağaç katranının termal stabilitesi termogravimetrik analiz (TGA) ile araştırılmıştır. Ağaç katranı azot atmosferinde 10°C/dk hızla 500°C’ye kadar ısıtılmıştır. Elde edilen termogramdan, AK’nın 220°C’de bozulmaya başladığı görülmüştür (Şekil 5.1.6).



Şekil 5.1.6. Ağaç katranının TGA eğrisi

Ağaç katranının ergime noktası tespiti için diferansiyel scanning kalorimetre (DSC)’de asfalt 20°C/dk ısıtma hızı ile 200°C’ye kadar ısıtılmıştır. Elde edilen DSC termogramından, Ağaç katranının ergime sıcaklığı 63°C olarak belirlenmiştir (Şekil 5.1.7).

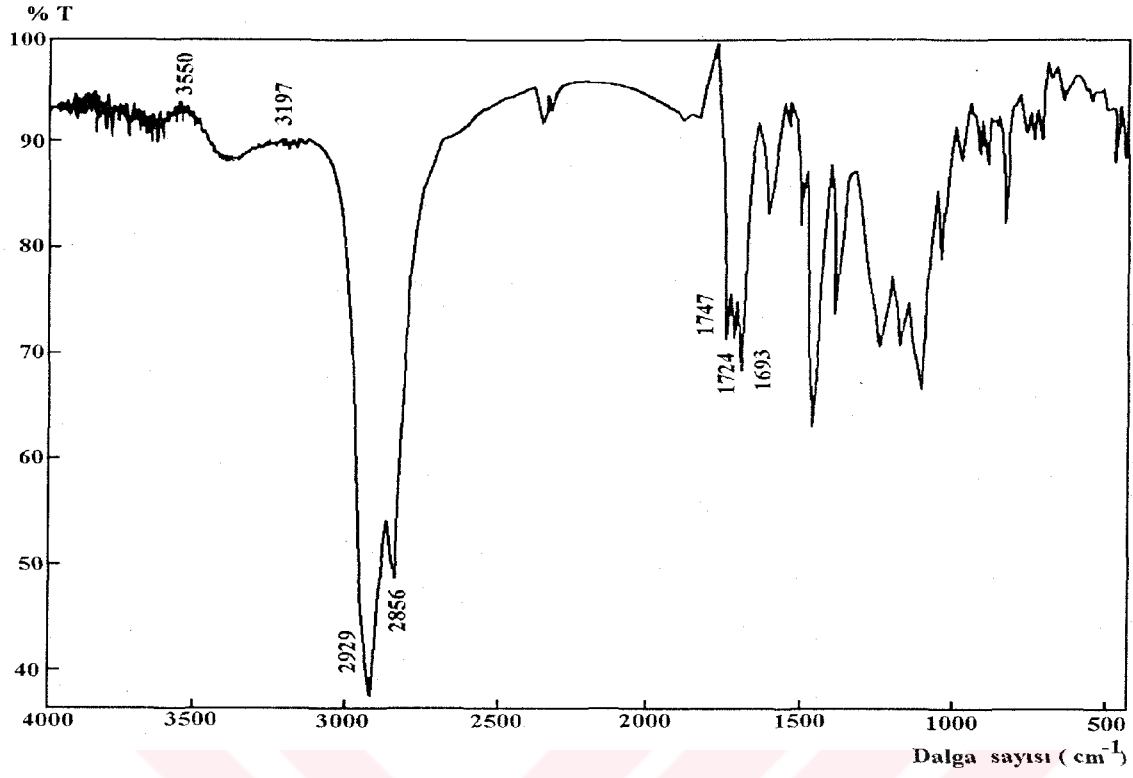


Şekil 5.1.7. Ağaç katranının DSC eğrisi

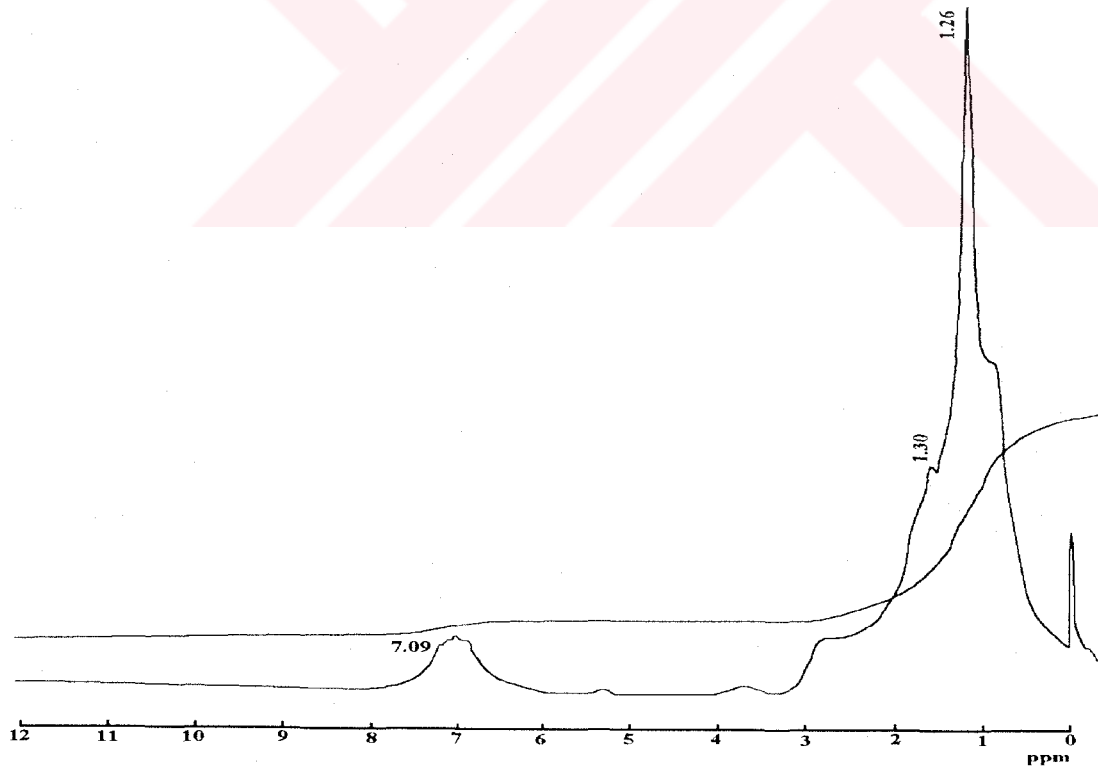
Ayrıca ağaç katranının kimyasal yapısı araştırılmış; bunun için AK infrared veya kırmızı ötesi spektrum (IRS) ve nükleer manyetik rezonans spektroskopisi (^1H NMR) cihazlarıyla incelenmiştir (Şekil 5.1.8-9).

Şekil 5.1.8. incelendiğinde, AK'ya ait IRS'da, $3550\text{--}3197\text{ cm}^{-1}$ 'de görülen küçük yayvan pikin, karboksil grubundaki **OH** gerilme titreşimine ait olduğu; 2929 ve 2856 cm^{-1} 'de görülen piklerin ise alifatik grubundaki **C-H** gerilme titreşimlerine ait olduğu görülmektedir. 1747 , 1724 ve 1693 cm^{-1} 'de karboksilde ($\text{C}=\text{O}$) ve farklı keton gruplarında karbonil $>\text{C}=\text{O}$ gerilme titreşimleri ile ilgili şiddetli ve keskin pikler görülmüştür.

Şekil 5.1.9. incelendiğinde, asfalt çimentosuna ait ^1H NMR spektrumunda, $\delta=7,09\text{ ppm}$ 'deki sinyallerin aromatik halkanın ve $\delta=1.26$ ve $\delta=1.30\text{ ppm}$ 'deki piklerin alifatik hidrokarbonlara ait olduğu görülmektedir. Böylece IRS ve ^1H NMR spektrumlarına dayanarak ağaç katranının aromatik ve alifatik hidrokarbonlardan oluşan karboksilik asitlerden ve keton karışımlardan oluştuğu anlaşılmıştır.



Şekil 5.1.8. Ağaç katranının IRS eğrisi



Şekil 5.1.9. Ağaç katranının ^1H NMR eğrisi

Deneylerde kullanılan agreg a malzemesi Hampınar taş ocağından sağlanmıştır. Agreg a cinsi kalker olup, taş ocağında konkasörle kırılarak elde edilmiştir.

Agreg a, kaba, ince ve filleri içeren üç ayrı dane grubunun belli oranlarda karıştırılmasıyla oluşturulur. Asfalt betonu yapımında kullanılacak agreg a, kırma taş, kırılmış çakıl veya bunların karışımından ibarettir. Agreg a temiz, sağlam, sert ve dayanıklı olmalı; içerisinde kil toprakları, bitkisel maddeler ve diğer zararlı maddeler bulunmamalıdır. Aşınma tabakası için asfalt betonu yapımında kullanılacak agreg anın gradasyon limitleri Tablo 5.1.2'de gösterilmiştir (K.G.M. Fenni Şartnamesi, 1989).

Tablo 5.1.2. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri

Elek Boyu	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
19 mm (3/4")	100	100	-	-
12,5 mm (1/2")	84 - 100	77 - 100	100	100
9,5 mm (3/8")	75 - 91	66 - 84	87 - 100	80 - 100
4,75 mm (No: 4)	57 - 75	46 - 66	66 - 82	55 - 72
2,00 mm (No: 10)	42 - 59	30 - 50	47 - 64	36 - 53
0,425 mm (No: 40)	22 - 35	12 - 28	24 - 36	16 - 28
0,180 mm (No: 80)	12 - 22	7 - 18	13 - 22	8 - 16
0,075 mm (No: 200)	4 - 10	4 - 10	4 - 10	4 - 10

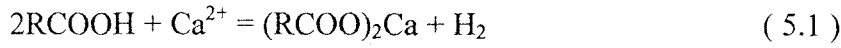
Kullanılan agreg anın, aşınma tabakası şartname Tip 1'e uygunluk göstermesi sebebiyle Tip 1'in gradasyon limitleri alınarak karışım hesaplarında kullanılmıştır (Tablo 5.1.3).

Tablo 5.1.3. Şartname Tip 1'in gradasyon limitleri

Elek boyu	Elekte kalan (%)	Elekten geçen (%)
19 mm (3/4")	0	100
12,5 mm (1/2")	8	92
9,5 mm (3/8 ")	17	83
4,75 mm (No: 4)	35	65
2,00 mm (No: 10)	51	49
0,425 mm (No: 40)	73	27
0,180 mm (No: 80)	85	15
0,075 mm (No: 200)	95	5

P_k	=	Kaba agreganın yüzdesi	=	35
P_i	=	İnce agreganın yüzdesi	=	60
P_f	=	Filler'in yüzdesi	=	5
G_i	=	İnce agreganın özgül ağırlığı (gr/cm ³)	=	2,663
G_k	=	Kaba agreganın özgül ağırlığı (gr/cm ³)	=	2,674
G_f	=	Filler'in özgül ağırlığı (gr/cm ³)	=	2,604

Deneylerde agreg a malzemesi olarak kalker kullandığımızdan dolayı asfalt betonu karışımında AK ile kalker arasında (5.1) bağıntısıyla verilen kimyasal absorbsiyon reaksiyonu meydana gelmektedir.



Bu reaksiyon sonucunda meydana gelen kalsiyum tuzları, AK ve mineral agreg a arasında kuvvetli adhezyon bağlarının oluşmasına sebep olmuştur. Kimyasal absorbsiyon dışında, kuvvetli adhezyon bağların teşekkül etmesine, daha az yapışkan katran kısımları ile agreg a gözenekleri arasındaki fizik absorbsiyon da büyük rol oynamıştır.

5.2. Bağlayıcılar ve Bitümlü Karışımlarla Yapılan Laboratuar Çalışmalarının Sonuçları

Tezin bu bölümünde, çalışmada kullanılan katkısız, katkılı bağlayıcılar ve bunlarla oluşturulan karışımlar üzerinde yapılan laboratuar çalışmaları ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

5.2.1. Penetrasyon Deney Sonuçları

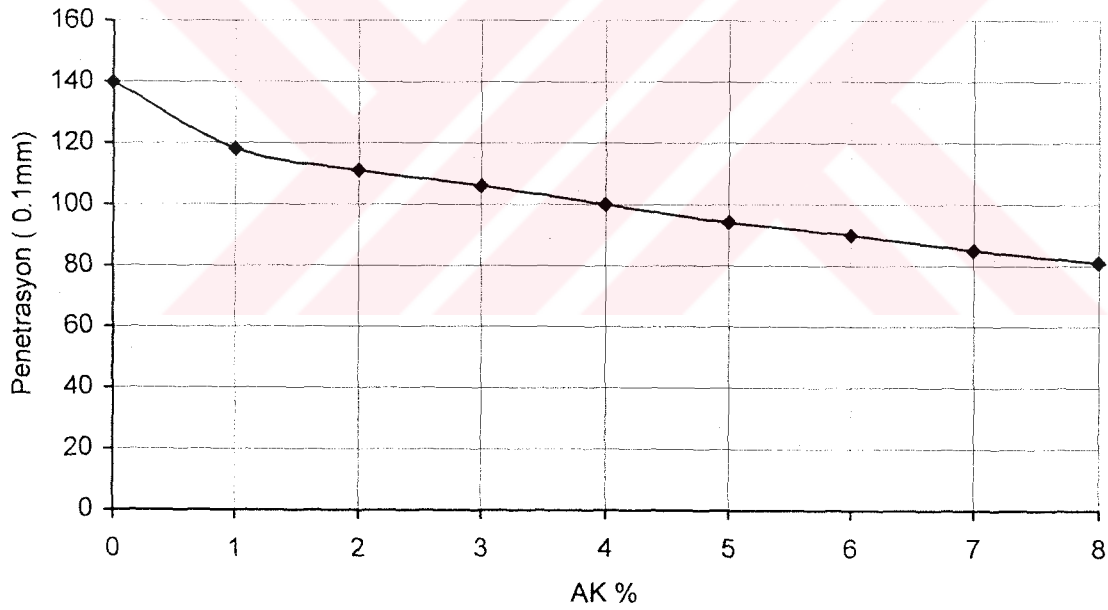
Her modifiye yüzdesi için bulunan penetrasyon değerleri Tablo 5.2.1.1'de verilmiş ve bu değerler esas alınarak gereken grafik çizilmiştir (Şekil 5.2.1.1.).

Şekil 5.2.1.1.'de görüldüğü gibi AK'nın tüm katkı oranlarında penetrasyon değerlerini, katkısız AC 100/150'ye göre düşürdüğü görülmüştür. AK ile modifiye

edilmiş bitümlü bağlayıcıların penetrasyon değerlerinin düşük olması, bu tür bağlayıcıların sıcak iklimli yerlerde kullanılmasını mümkün kılmıştır.

Tablo 5.2.1.1. Penetrasyon deney sonuçları

Bağlayıcı	Penetrasyon (0.1mm), 25°C'de, 100gr, 5sn
AC 100-150	140
AC 100-150 + %1 AK	118
AC 100-150 + %2 AK	111
AC 100-150 + %3 AK	106
AC 100-150 + %4 AK	100
AC 100-150 + %5 AK	94
AC 100-150 + %6 AK	90
AC 100-150 + %7 AK	85
AC 100-150 + %8 AK	81



Şekil 5.2.1.1. AK % - Penetrasyon ilişkisi

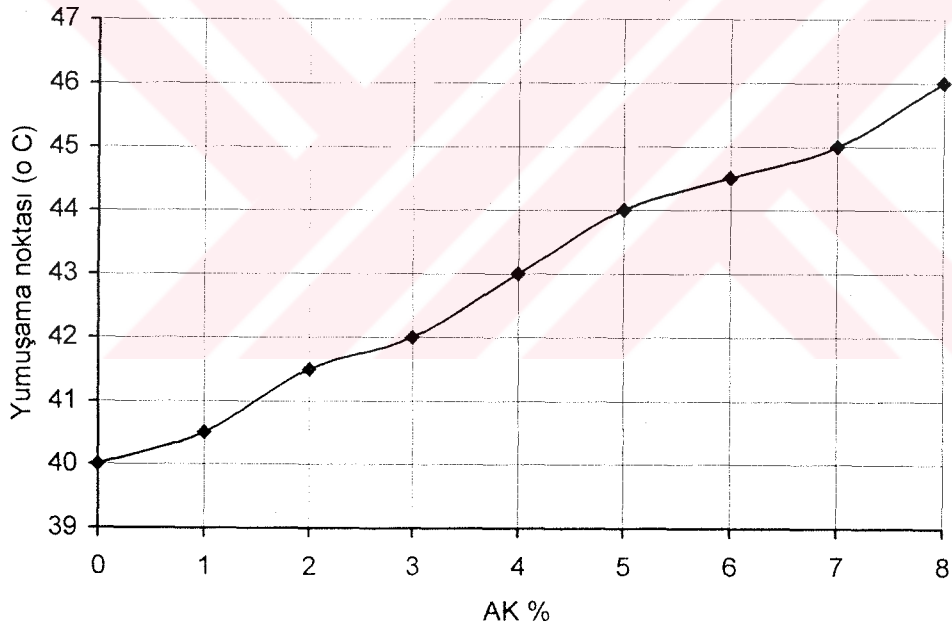
5.2.2. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Saf AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosu ve katkı maddenin değişen oranları için bulunan yumuşama noktası değerleri Tablo 5.2.2.1'de verilmiş ve bu değerler esas alınarak gereken grafik çizilmiştir (Şekil 5.2.2.1).

Şekil 5.2.2.1’de görüldüğü gibi AK’nın tüm katkı oranlarında yumuşama noktası değerlerini, katkısız AC 100-150’ye göre artırdığı görülmüştür.

Tablo 5.2.2.1. Yumuşama noktası deney sonuçları

Bağlayıcı	Yumuşama noktası (°C)
AC 100-150	40
AC 100-150 + %1 AK	40,5
AC 100-150 + %2 AK	41,5
AC 100-150 + %3 AK	42
AC 100-150 + %4 AK	43
AC 100-150 + %5 AK	44
AC 100-150 + %6 AK	44,5
AC 100-150 + %7 AK	45
AC 100-150 + %8 AK	46



Şekil 5.2.2.1. AK % - Yumuşama noktası ilişkisi

5.2.3. Düktilite Deney Sonuçları

Katkı maddesi içermeyen ve katkı maddesini artan oranlarda içeren bağlayıcı için bulunan düktilite değerleri Tablo 5.2.3.1’de verilmiştir.

Tablo 5.2.3.1’de görüldüğü gibi AK’nın tüm katkı oranlarında duktilite değerlerini, katkısız AC 100/150’ye göre artırdığı görülmüştür. AK ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların duktilite değerlerinin yüksek olması, bu tür bağlayıcılara katkısız bitüme göre daha yüksek esneme kabiliyeti kazandırmaktadır.

Tablo 5.2.3.1. Düktilite deney sonuçları

Bağlayıcı	Düktilite (cm)
AC 100-150	98
AC 100-150 + %1 AK	> 100
AC 100-150 + %2 AK	> 100
AC 100-150 + %3 AK	> 100
AC 100-150 + %4 AK	> 100
AC 100-150 + %5 AK	> 100
AC 100-150 + %6 AK	> 100
AC 100-150 + %7 AK	> 100
AC 100-150 + %8 AK	> 100

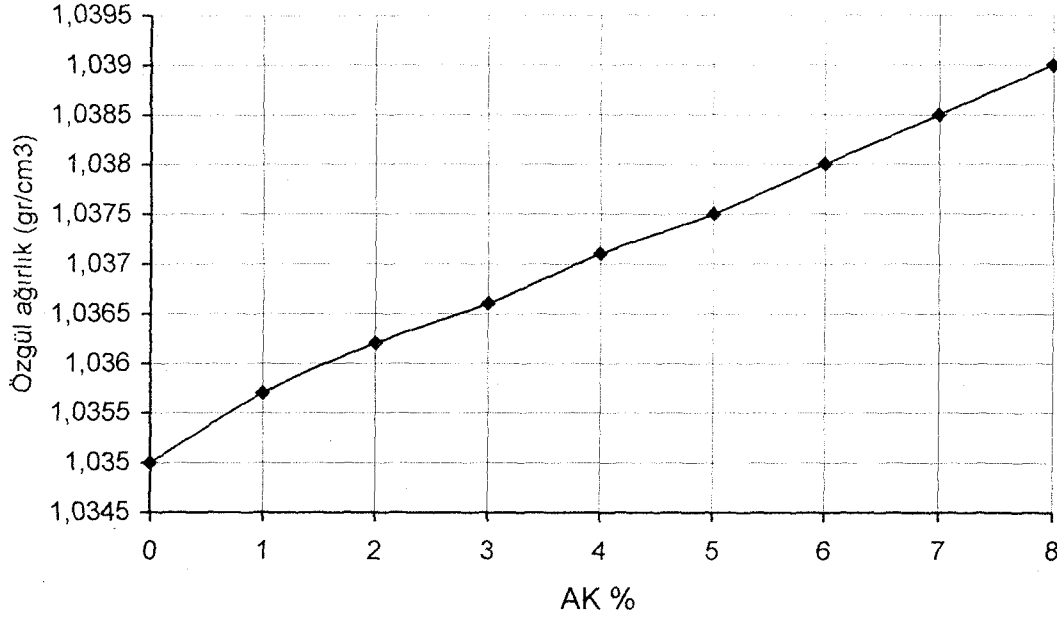
5.2.4. Özgül Ağırlık Deney Sonuçları

AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosu için yapılan hesaplar EK 2’de verilmiştir. Aynı hesaplama şekli, AK katkı maddesinin değişen oranları için yapılmıştır. Saf AC 100-150 penetrasyonlu asfalt çimentosu ve AK katkı maddesini değişen oranlarda içeren asfalt çimentosu için elde edilen özgül ağırlık değerleri Tablo 5.2.4.1’de verilmiş ve bu değerlere göre gereken grafik çizilmiştir (Şekil 5.2.4.1).

Şekil 5.2.4.1’de görüldüğü gibi AK’nın tüm katkı oranlarında özgül ağırlık değerlerini, katkısız AC 100/150’ye göre artırdığı görülmüştür.

Tablo 5.2.4.1. Özgül ağırlık deney sonuçları

Bağlayıcı	Özgül ağırlık (gr/cm ³)
AC 100-150	1,0350
AC 100-150 + %1 AK	1,0357
AC 100-150 + %2 AK	1,0362
AC 100-150 + %3 AK	1,0366
AC 100-150 + %4 AK	1,0371
AC 100-150 + %5 AK	1,0375
AC 100-150 + %6 AK	1,0380
AC 100-150 + %7 AK	1,0385
AC 100-150 + %8 AK	1,0390



Şekil 5.2.4.1. AK % - Özgül ağırlık ilişkisi

5.2.5. Marshall Metodu Deney Sonuçları

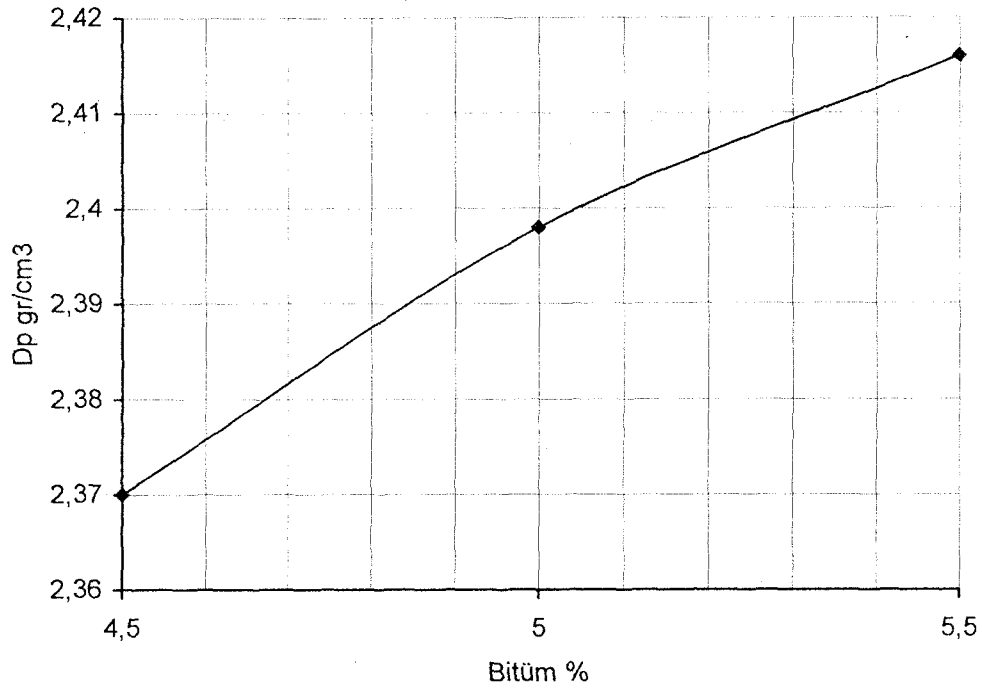
Çalışmanın ilk aşamasında Marshall Metodu kullanılarak seçilen agrega gradasyonu için numunelerinin optimum muhtevası araştırılmıştır. Bunun için %4,5; %5,0; %5,5 bitüm muhtevalarında hazırlanan üçer adet Marshall numuneleri Marshall test aygıtında (Ele Test-E) test edilerek denenmiştir. Stabilite ve akma değerleri direkt test aygıtından okunurken, gerekli olan diğer değerler hesap yöntemiyle bulunmuştur.

% 4,5 bitüm karışımı için yapılan hesaplar EK – 3’de verilmiştir.

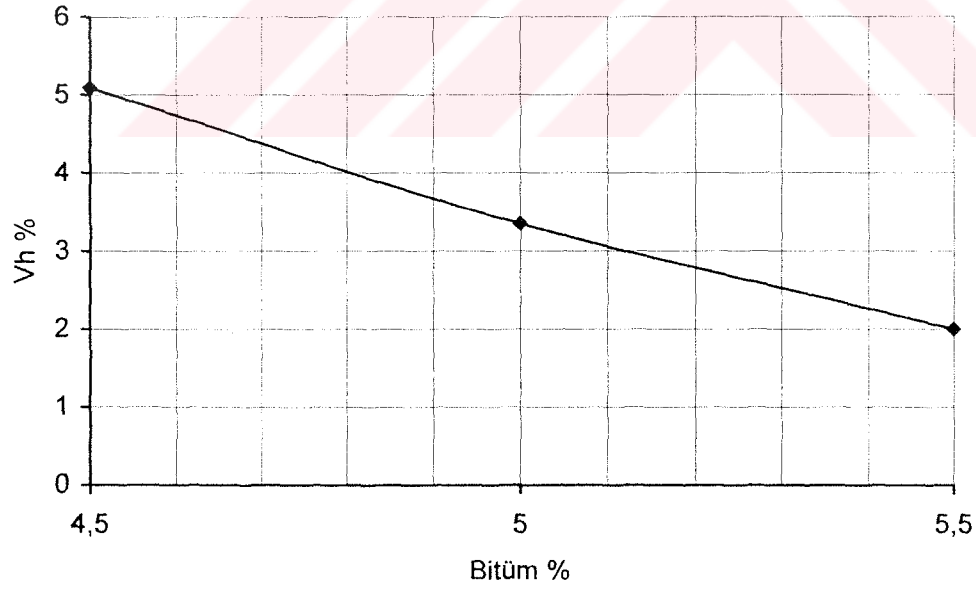
Aynı şekilde diğer bitüm yüzdeleri için de bu değerler hesaplanarak ve Tablo 5.2.5.1’e işlenmiştir. Bu değerler grafikler üzerinde de ayrı ayrı gösterilmiştir (Şekil 5.2.5.1-6).

Tablo 5.2.5.1. Marshall metodu dizayn değerleri

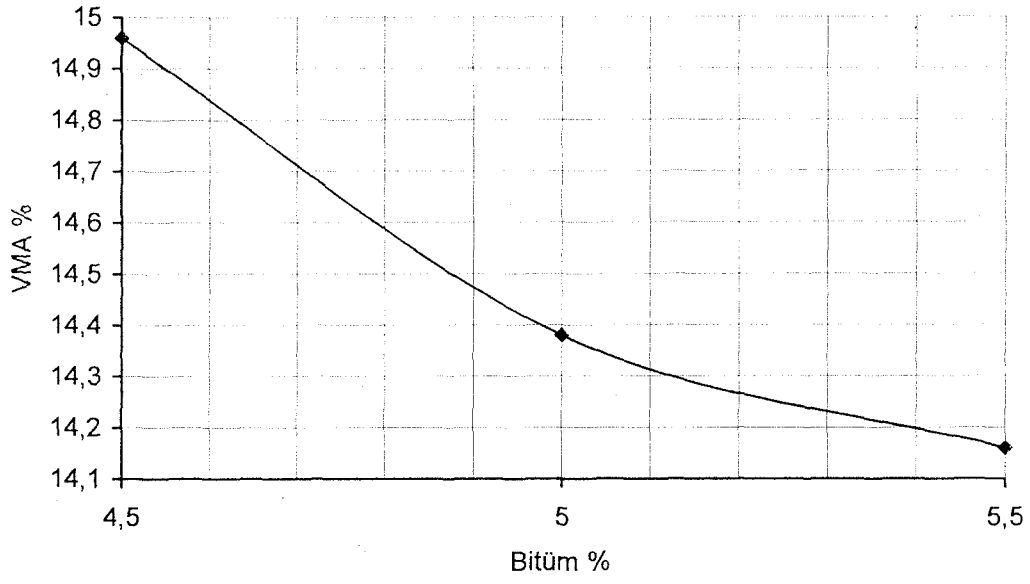
Bri ket No:	Bitüm		Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B Gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	Dt gr/cm ³	Vh %	V.M.A %	Vf %	Akma mm	Stab. kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	Wa %	Wb, %	1	2	3	Ort													
1			65,5	66,5	67,0	66,3	1244,0	721,5	1248,5	527,0	2,361					2,39	1700	0,934	1588
2	4,5	4,31	54	65,0	65,0	64,8	1240,0	715,0	1244,0	529,0	2,344					2,12	1850	0,967	1788
3			65,0	65,0	65,0	65,0	1247,0	727,0	1251,5	524,5	2,378					2,51	1660	0,962	1597
ORTALAMALAR																			
4			65,0	65,0	64,5	64,8	1249,5	731,5	1253,5	522,0	2,394		5,09	14,96	65,98	2,34			1593
5	5,0	4,76	60	65,0	65,0	65,0	1252,5	735,0	1257,5	522,5	2,397					2,65	1700	0,967	1644
6			64,5	64,5	64,5	64,5	1245,5	731,5	1250,0	518,5	2,402					2,15	1900	0,962	1828
ORTALAMALAR																			
7			65,0	65,0	65,0	65,0	1258,0	739,5	1261,0	521,5	2,412	2,481	3,35	14,38	76,70	2,43			1671
8	5,5	5,21	66	65,0	65,0	65,0	1256,0	736,0	1260,5	524,5	2,395					2,80	1740	0,962	1674
9			64,5	64,5	65,0	64,7	1259,0	741,5	1262,0	520,5	2,419					2,93	1590	0,962	1530
ORTALAMALAR																			
											2,416	2,465	2,00	14,16	85,88	2,79			1556



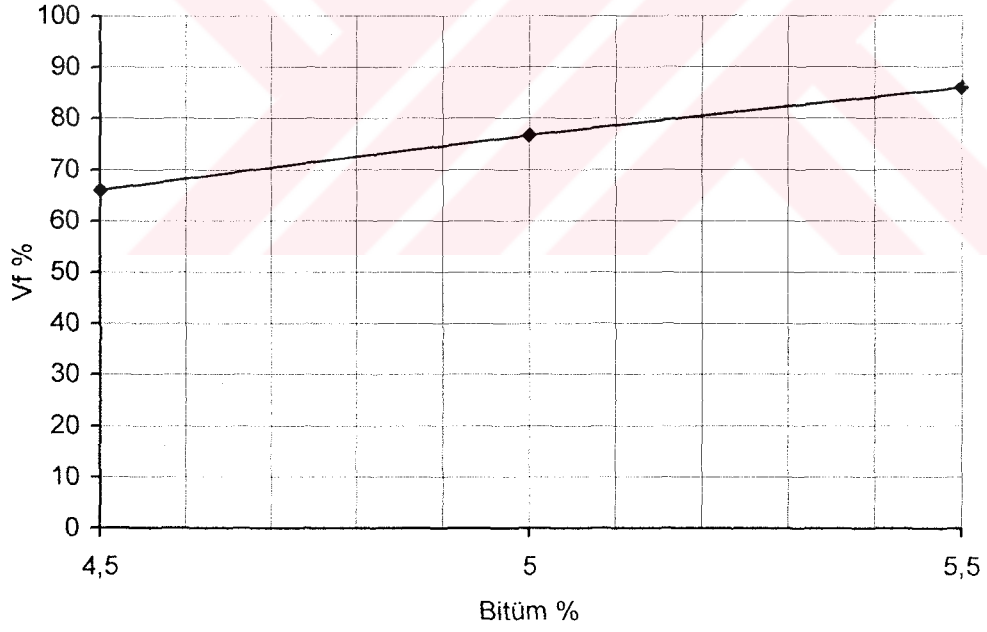
Şekil 5.2.5.1. Bitüm % - Pratik birim ağırlık ilişkisi



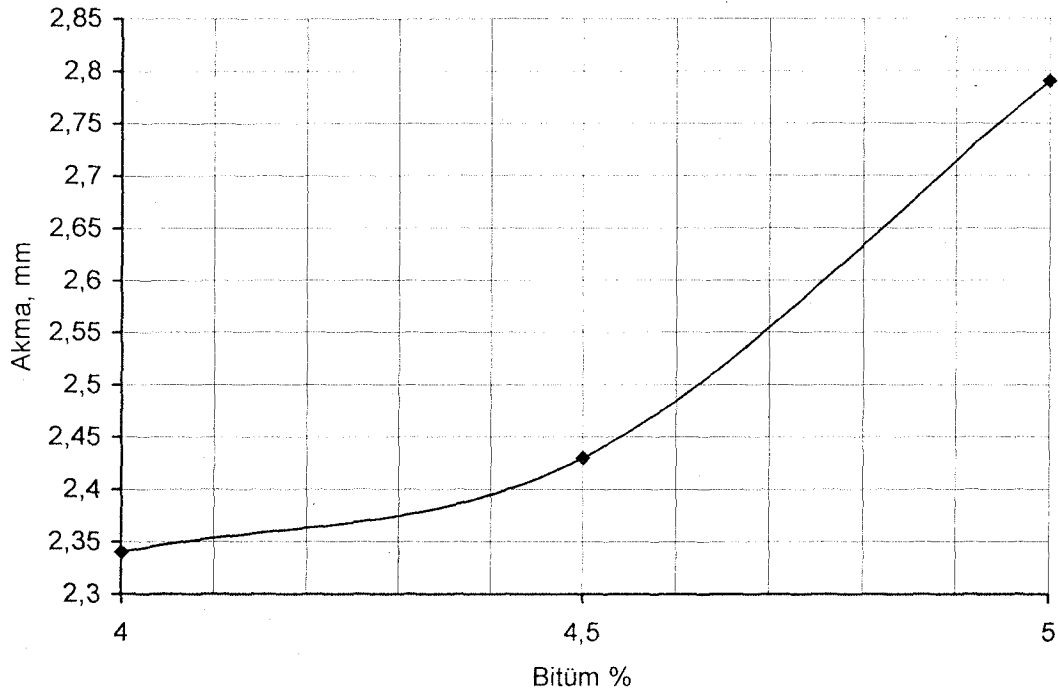
Şekil 5.2.5.2. Bitüm % - Boşluk % ilişkisi



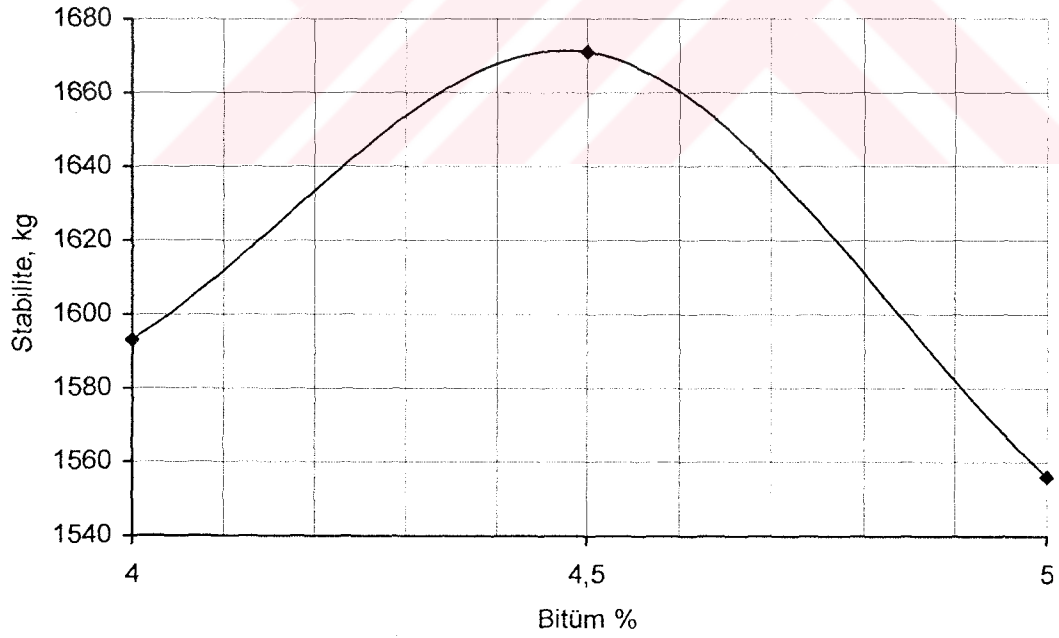
Şekil 5.2.5.3. Bitüm % - Agregalar arasındaki boşluk ilişkisi



Şekil 5.2.5.4. Bitüm % - Bitümle dolu boşluk yüzdesi ilişkisi



Şekil 5.2.5.5. Bitüm % - Akma ilişkisi



Şekil 5.2.5.6. Bitüm % - Stabilite ilişkisi

Optimum bitüm yüzdesinin bulunması için;

Pratik özgül ağırlık, stabilite, akma, boşluk, bitüm ile dolu boşluk grafikleri çizilerek, yoğunluk ve stabilite eğrilerinin en büyük değerlerine karşı gelen bitüm yüzdeleri, boşluk, bitümle dolu boşluk ve akma eğrileri için uygulamada kullanılması öngörülen değerlerin ortalamasına karşı gelen bitüm yüzdeleri tespit edilmiştir.

Bitümle dolu boşluk yüzdesi aşınma tabakası için şartnamede istenen değer (75-85) arasında olduğundan, şartname ortalamasından (80) eğriye çıkılan dikin eğriyi kestiği noktadaki bitüm yüzdesi bulunmuştur. Asfalt betonu aşınma tabakası için boşluk yüzdesi şartnamede (3-5) arasında verilmiştir. Şartname ortalamasından (4) çıkılan dikin eğriyi kestiği noktadaki bitüm yüzdesi bulunmuştur.

Optimum bitüm yüzdesi bu dört değer aritmetik ortalamasının alınmasıyla bulunmuştur. Buna göre,

Stabilitenin maksimum olduğu bitüm yüzdesi	=	5,0
Pratik birim ağırlığının max. olduğu bitüm yüzdesi	=	5,5
Bitümle dolu boşluk % 80 iken bitüm yüzdesi	=	5,175
Boşluk yüzdesi 4 iken bitüm yüzdesi	=	4,80
$\text{Optimum bitüm yüzdesi} = \frac{5,0 + 5,5 + 5,175 + 4,80}{4} = 5,1$		

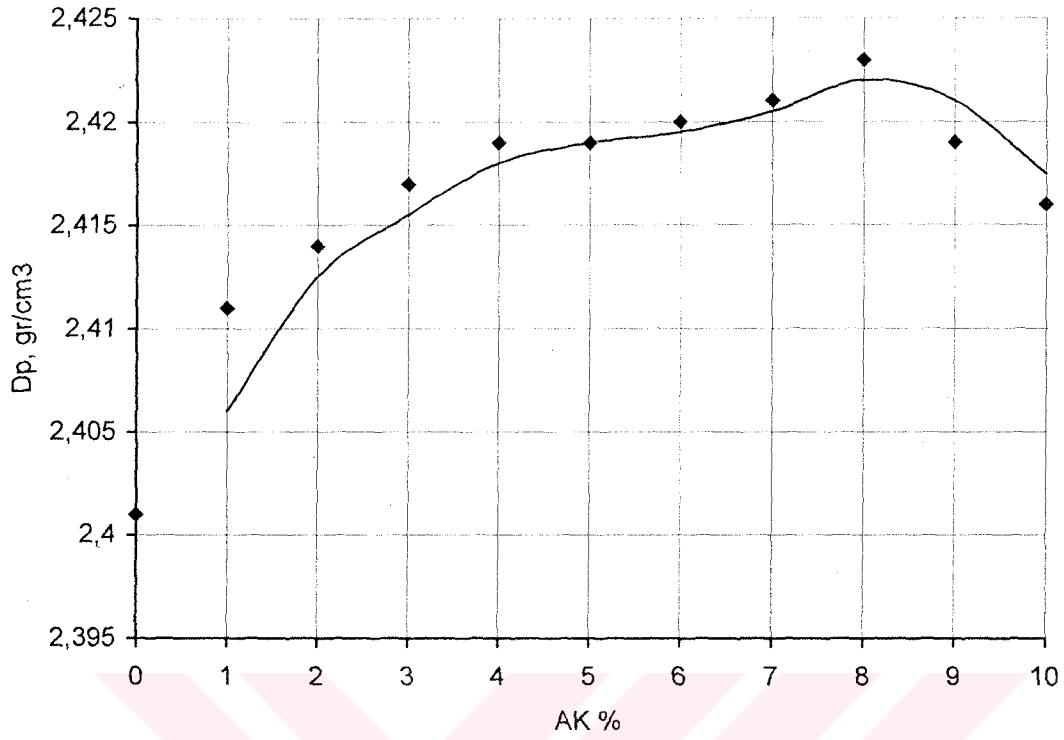
Daha sonra AK katkı ve saf asfalt çimentolu 33 tane Marshall numunesi hazırlanmış ve optimum bitüm yüzdesi 5,1 olduğundan dolayı, 1200gr agregaya içeren her briket numunesi için 61,2gr bağlayıcı kullanılmıştır. Katkılı numunelerde bağlayıcı miktarı optimumda sabit tutulmuş, ancak bitüm miktarı %1, %2, %3, %4, %5, %6, %7, %8, %9, %10 oranlarında azaltılarak aynı oranlarda AK ilave edilmiştir. Bulunan değerler Tablo 5.2.5.2'de ve ayrıca grafikler üzerinde de ayrı ayrı gösterilmiştir (Şekil 5.2.5.7-12).

Tablo 5.2.5.2. Katkısız ve AK katkılı numunelerinin Marshall metodu deney değerleri

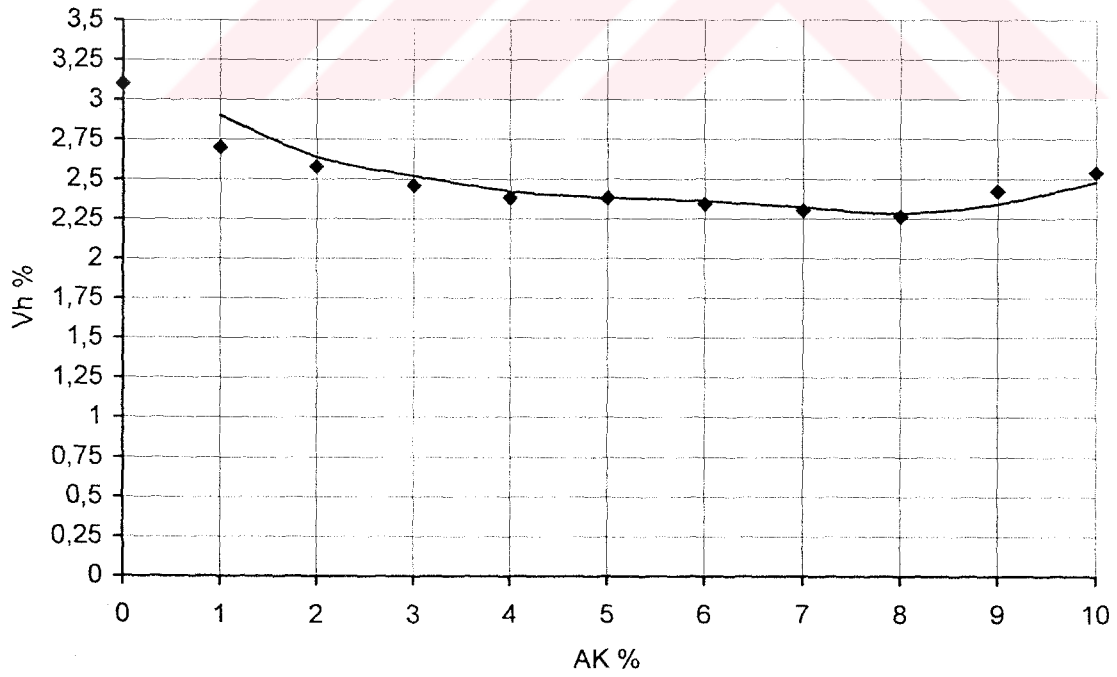
Bri ket No:	AK %:si	Bağlayıcı		Briket Yüksekliği				A	C	B	V	D _p	D _T	V _h	V.M.A	V _F	Akma	Stab.	Düz. Fak.	Düz. Stab.
		Wa %	Wb %	1	2	3	Ort	gr	gr	gr	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%	mm	kg		
1				65,2	65,2	64,8	65,1	1254,4	736,3	1258,6	522,3	2,401					2,54	1680	0,960	1613
2	0	5,1	4,85	64,8	65,0	64,5	64,8	1252,0	734,8	1256,0	521,2	2,402					2,60	1540	0,967	1489
3				64,5	64,8	65,0	64,8	1253,0	734,9	1257,0	522,1	2,400					2,43	1730	0,967	1673
ORTALAMALAR																				
4				64,5	64,5	64,5	64,5	1250,7	736,8	1254,5	517,7	2,416					2,60	1680	0,975	1638
5	1	5,1	4,85	60,59±0,61	65,5	65,5	65,5	1257,0	734,3	1262,0	527,7	2,382					2,52	1790	0,951	1702
6				64,5	65,0	64,8	64,8	1252,3	735,1	1255,5	520,4	2,406					2,54	1740	0,965	1679
ORTALAMALAR																				
7				64,5	64,5	65,0	64,7	1253,2	736,7	1256,7	520,0	2,410					2,62	1790	0,970	1736
8	2	5,1	4,85	59,98±1,22	65,0	65,0	65,0	1250,2	732,8	1254,5	521,7	2,396					2,70	1830	0,962	1760
9				64,8	64,9	65,0	64,9	1252,0	737,3	1255,2	519,9	2,417					2,54	1740	0,965	1679
ORTALAMALAR																				
10				64,9	64,6	64,8	64,8	1253,0	736,0	1254,2	518,2	2,418					2,58	1830	0,967	1770
11	3	5,1	4,85	59,36±1,84	65,0	65,0	65,0	1255,3	737,7	1258,1	520,4	2,412					2,75	1780	0,962	1712
12				64,5	64,5	65,0	64,7	1254,5	739,6	1257,8	518,2	2,421					2,62	1890	0,970	1833
ORTALAMALAR																				
1				64,8	64,5	64,2	64,5	1253,5	738,3	1256,2	517,9	2,420					2,71	1900	0,975	1853
2	4	5,1	4,85	58,75±2,45	64,2	64,0	64,1	1252,0	739,6	1254,7	516,1	2,426					2,63	1770	0,985	1743
3				65,1	64,5	64,6	64,7	1253,3	736,9	1256,8	519,9	2,411					2,75	1800	0,970	1746
ORTALAMALAR																				
4				64,0	64,0	64,0	64,0	1254,5	738,0	1257,3	519,3	2,416					2,72	1870	0,988	1848
5	5	5,1	4,85	58,14±3,06	64,0	64,5	64,2	1258,1	741,0	1261,0	520,0	2,419					2,80	1820	0,982	1787
6				65,0	65,0	65,2	65,0	1259,0	741,5	1261,5	520,0	2,421					2,65	1900	0,962	1828
ORTALAMALAR																				
												2,419	2,478	2,38	13,65	82,82	2,72			821

Tablo 5.2.5.2. (devamı). Katkısız ve AK katkılı numunelerinin Marshall metodu deney değerleri

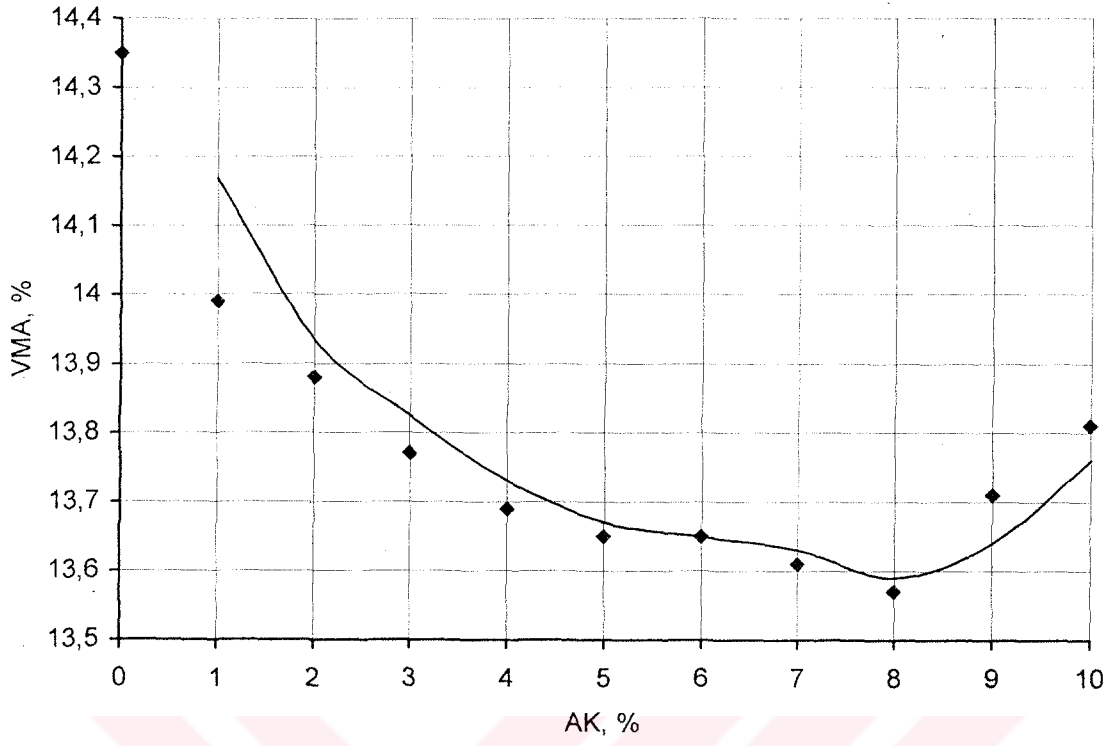
Bri ket No:	AK % 'si	Bağlayıcı		Briket Yükleklığı.				A gr	C gr	B Gr	V cm ³	D _p gr/cm ³	D _T gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _F %	Akma mm	Stab. kg	Düz. Fak.	Düz. Stab.
		Wa %	Wb %	1	2	3	Ort													
1				64,5	65,0	64,5	64,7	1251,4	738,1	1253,5	516,9	2,421					2,82	1880	0,970	1824
2	6	5,1	4,85	65,7	65,5	65,0	65,4	1254,5	737,8	1256,7	518,9	2,418					2,78	1770	0,953	1687
3				65,0	64,2	64,0	64,4	1250,5	736,2	1252,6	516,4	2,422					2,64	1950	0,978	1907
ORTALAMALAR																				
4				64,0	64,0	64,0	64,0	1254,5	739,3	1255,8	516,5	2,429					2,88	1860	0,988	1838
5	7	5,1	4,85	64,0	64,0	64,0	64,0	1252,0	734,5	1254,1	519,6	2,410					2,71	1960	0,988	1936
6				64,5	64,5	64,5	64,5	1252,2	737,1	1254,0	516,9	2,423					2,79	1970	0,975	1920
ORTALAMALAR																				
7				65,0	65,0	65,0	65,0	1249,8	736,1	1251,4	515,3	2,425					2,76	2050	0,962	1972
8				65,0	65,0	65,0	65,0	1250,7	736,8	1252,9	516,1	2,423					2,90	1940	0,962	1866
9				66,0	66,0	66,0	66,0	1254,8	738,0	1256,6	518,6	2,420					2,85	1890	0,940	1777
ORTALAMALAR																				
10				64,0	64,0	64,0	64,0	1247,8	733,3	1249,0	515,7	2,420					2,92	1870	0,988	1848
11	9	5,1	4,85	64,7	64,5	64,5	64,6	1253,5	736,5	1254,8	518,3	2,418					2,86	1870	0,972	1818
12				65,5	65,0	64,5	65,3	1255,8	732,8	1256,5	523,7	2,398					2,90	1680	0,955	1604
ORTALAMALAR																				
1				64,7	64,6	64,7	64,7	1253,2	737,0	1255,0	518,0	2,419					2,85	1710	0,970	1659
2	10	5,1	4,85	65,0	65,0	65,0	65,0	1254,3	737,6	1256,3	518,7	2,418					2,95	1820	0,962	1751
3				62,2	62,1	62,2	62,2	1255,6	736,8	1257,8	521,0	2,410					2,89	1790	0,936	1695
ORTALAMALAR																				
												2,416	2,479	2,54	13,81	81,61	2,90			1695



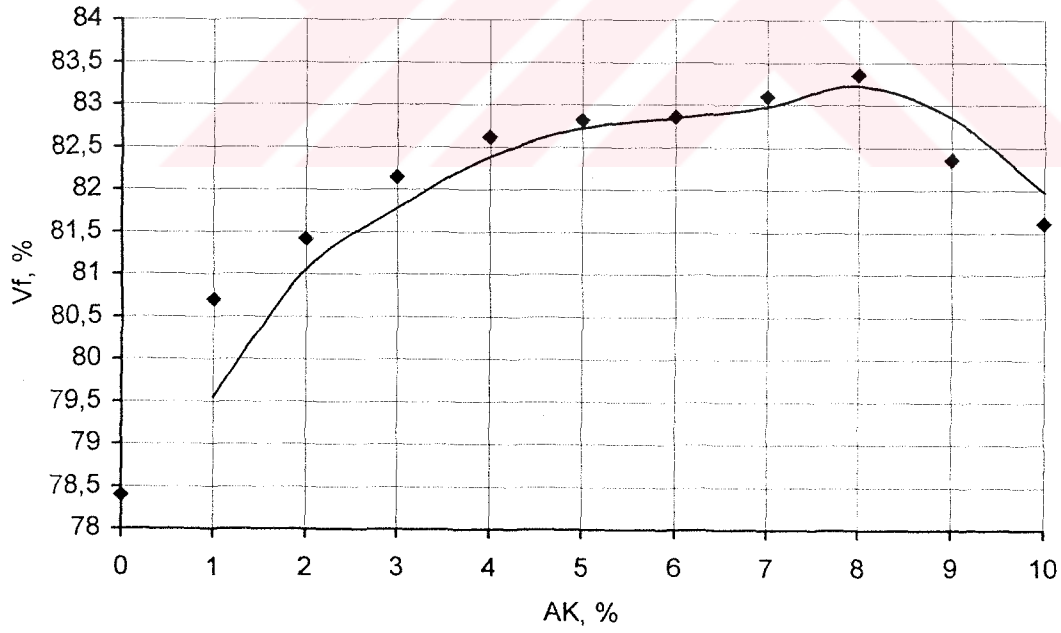
Şekil 5.2.5.7. AK % - Pratik birim ağırlık ilişkisi



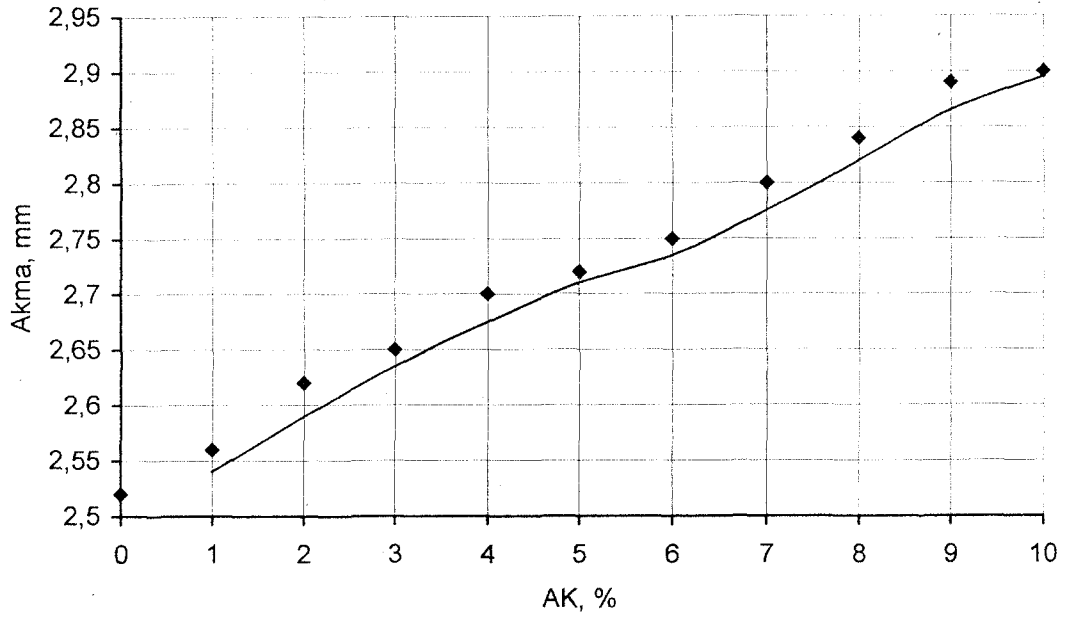
Şekil 5.2.5.8. AK % - Boşluk yüzdesi ilişkisi



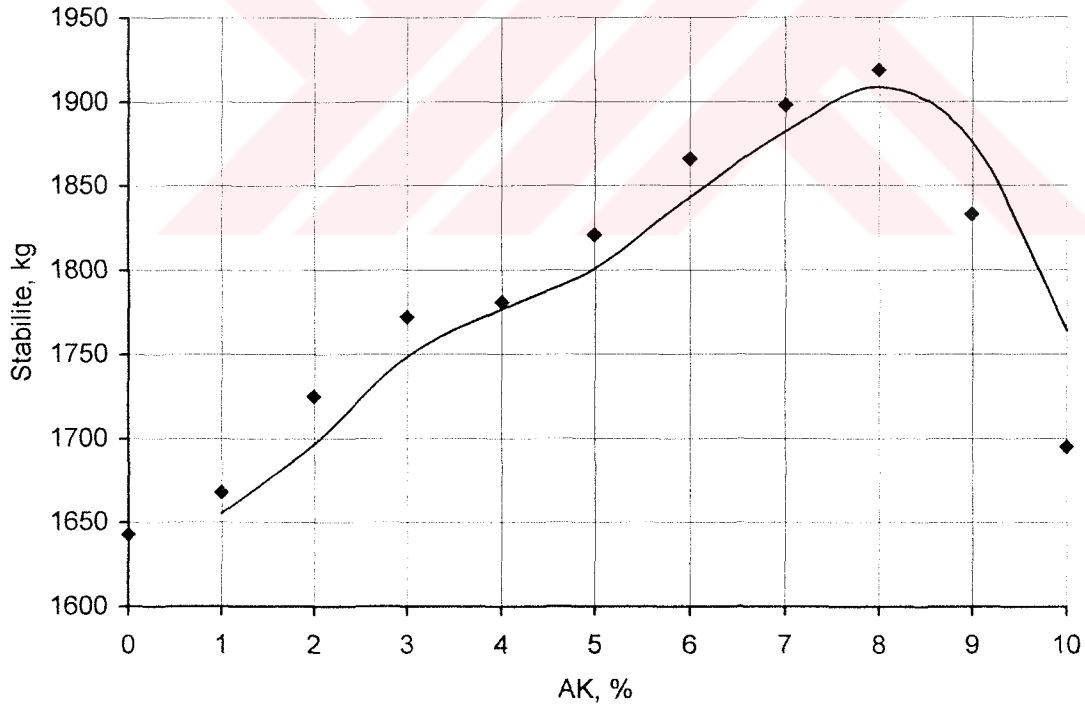
Şekil 5.2.5.9. AK % - Agregalar arasındaki boşluk ilişkisi



Şekil 5.2.5.10. AK % - Bitümle dolu boşluk yüzdesi



Sekil 5.2.5.11. AK % - Akma ilişkisi



Şekil 5.2. 5. 12. AK % - Stabilité ilişkisi

Şekil 5.2.5.7. incelendiğinde AK % - Pratik birim ağırlık ilişkisine göre, AK yüzdesi %1 ile %8 arasında olduğunda pratik birim ağırlık (D_p) değerlerinde bir artış olmuş, fakat daha sonraki artan yüzdelerde D_p değerlerinde düşüş meydana gelmiştir.

Şekil 5.2.5.8. incelendiğinde AK % - Boşluk yüzdesi ilişkisi eğrisine göre, AK yüzdesi %1 ile %8 arasında olduğunda boşluk yüzdesi (V_h) değerlerinde bir düşüş olmuş, fakat daha sonraki artan yüzdelerde V_h değerlerinde artış meydana gelmiştir.

Şekil 5.2.5.9. incelendiğinde AK % - Agregalar arasındaki boşluk ilişkisi eğrisine göre, AK yüzdesi %1 ile %8 arasında olduğunda agregalar arasındaki boşluk (VMA) değerlerinde bir düşüş olmuş, fakat daha sonraki artan yüzdelerde VMA değerlerinde artış meydana gelmiştir.

Şekil 5.2.5.10. incelendiğinde AK % - Bağlayıcı ile dolu boşluk yüzdesi ilişkisi eğrisine göre, AK yüzdesi %1 ile %8 arasında olduğunda bağlayıcı ile dolu boşluk yüzdesi (V_f) değerlerinde bir artış olmuş, fakat daha sonraki artan yüzdelerde V_f değerlerinde düşüş meydana gelmiştir.

Şekil 5.2.5.11. incelendiğinde AK % - Akma ilişkisi eğrisine göre, AK yüzdeleri arttıkça akma değerleri de artmıştır.

Şekil 5.2.5.12. incelendiğinde AK % - Stabilite ilişkisi eğrisine göre, AK yüzdesi %1 ile %8 arasında olduğunda stabilite değerlerinde bir artış olmuş, fakat daha sonraki artan yüzdelerde stabilite değerlerinde düşüş meydana gelmiştir.

Test sonucunda %8 AK katkı oranında stabilitenin katkısız bitüme göre %17 oranında arttığı gözlemlendiği için, bundan sonra yapılan bütün deneyler katkısız ve %8 AK katkılı bitüm içeren karışımlar üzerinde yapılmıştır.

5.2.6. Serbest Basınç Mukavemeti Deneylerinin Sonuçları

Katkısız ve %8 AK katkılı bitüm içeren numuneler serbest basınç mukavemeti deneyine tabi tutulmuştur. Bu nedenle, her bir karışım için 3 adet numune olmak üzere, 24 adet Marshall numunesi hazırlanmıştır. Bu deneylerin sonucunda numunelerin serbest basınç mukavemeti tespit edilmiş ve bu değerler kullanılarak gereken katsayılar bulunmuştur.

Numunelere ait deney sonuçları Tablo 5.2.6.1'de verilmiştir.

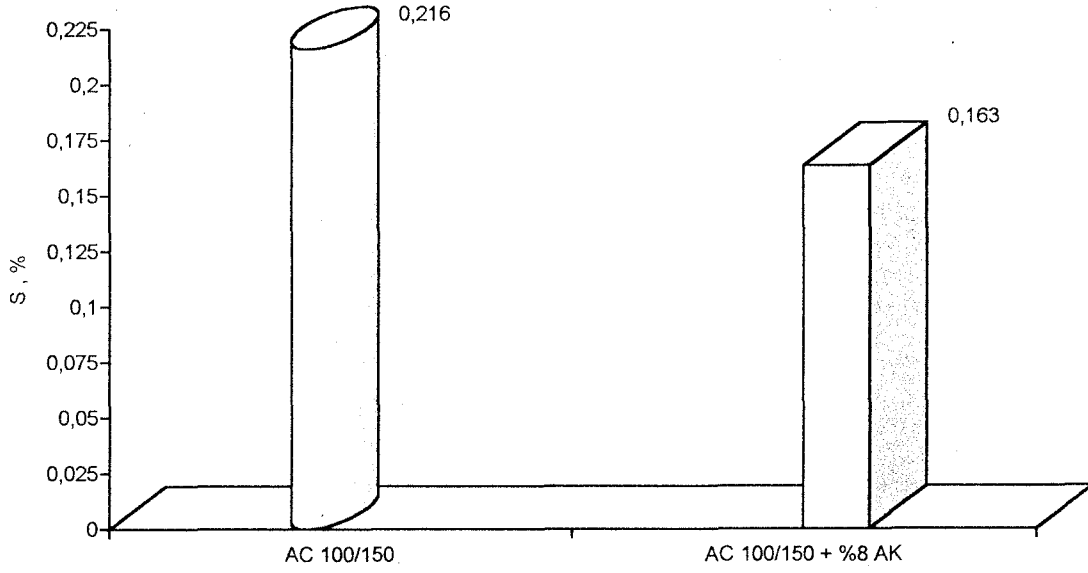
Tablo 5.2.6.1. Serbest basınç mukavemeti deneylerinin sonuçları

Özellikler	AC 100-150				AC 100-150 + %8 AK			
	1	2	3	Ort	1	2	3	Ort
Su absorpsiyon %'si, S	0,216	0,216	0,216	0,216	0,152	0,168	0,168	0,163
20°C'de serbest basınç mukavemeti değerleri, R ₂₀ (kg)	3608	3723	3657	3663	4219	3946	4033	4066
50°C'de serbest basınç mukavemeti değerleri, R ₅₀ (kg)	1850	1898	1855	1868	2039	1989	2011	2013
Doygun yüzey-kuru numunenin serbest basınç mukavemeti değerleri, R _s (kg)	3220	3118	3344	3126	3680	3597	3731	3669
25 devre donma-çözülme periyotlardan sonra serbest basınç mukavemeti değerleri, R _D (kg)	2930	2797	2901	2876	3405	3554	3502	3487
Dona karşı dayanıklılık katsayısı, K _D	0,92				0,95			
Suya dayanıklılık katsayısı, K _S	0,88				0,91			
Isıya dayanıklılık katsayısı, K _I	1,96				2,02			

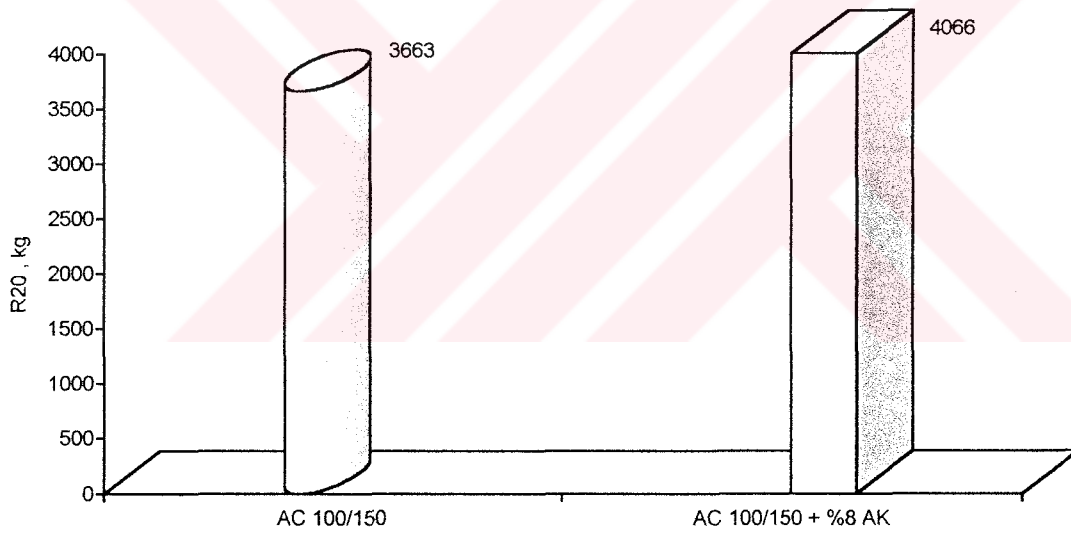
Tablo 5.2.6.1'de verilmiş değerler esas alınarak gereken grafikler çizilmiştir (Şekil 5.2.6.1-8).

Şekil 5.2.6.1'de görüldüğü gibi, ve %8 AK katkılı bitüm içeren numunelerin ortalama su absorpsiyon yüzdesi değeri, katkısız bitüm içeren numunelerin ortalama değerinden daha düşük olmuştur.

Şekil 5.2.6.2'de görüldüğü gibi, ve %8 AK katkılı bitüm içeren numunelerin ortalama R₂₀ değeri katkısız bitüm içeren numunelerin ortalama değerinden daha yüksek olmuştur.



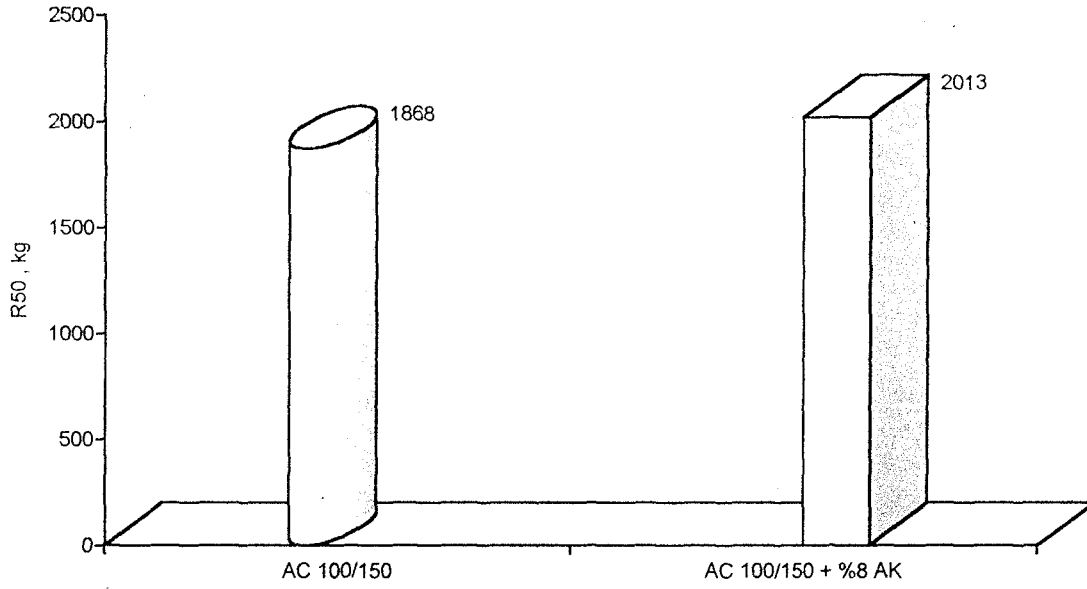
Şekil 5.2.6.1. Su absorpsiyon yüzdesi değerleri , (S)



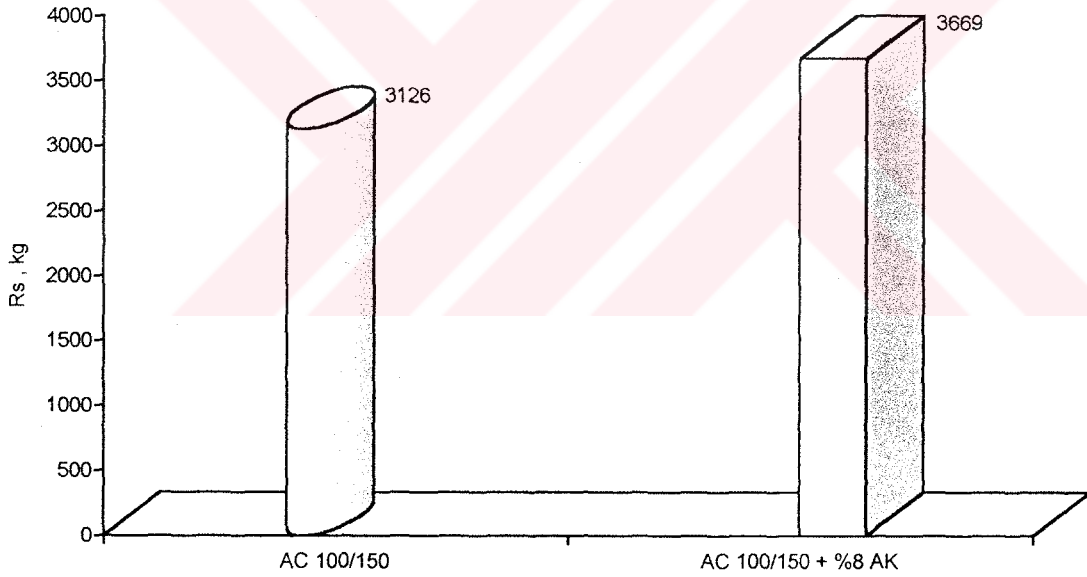
Şekil 5.2.6.2. 20°C'de serbest basınç mukavemeti değerleri , (R₂₀)

Şekil 5.2.6.3'de görüldüğü gibi, ve %8 AK katkılı bitüm içeren numunelerin ortalama R₅₀ değeri katkısız bitüm içeren numunelerin ortalama değerinden daha yüksek olmuştur.

Şekil 5.2.6.4'de görüldüğü gibi, ve %8 AK katkılı bitüm içeren numunelerin ortalama R_s değeri katkısız bitüm içeren numunelerin ortalama değerinden daha yüksek olmuştur.



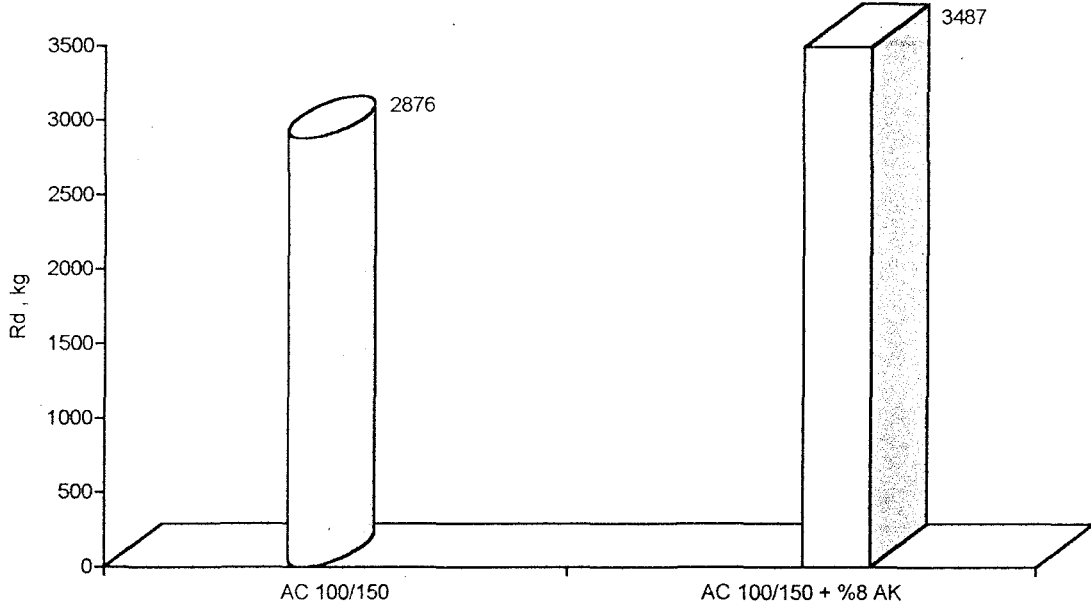
Şekil 5.2.6.3. 50°C’de serbest basınç mukavemeti değerleri , (R_{50})



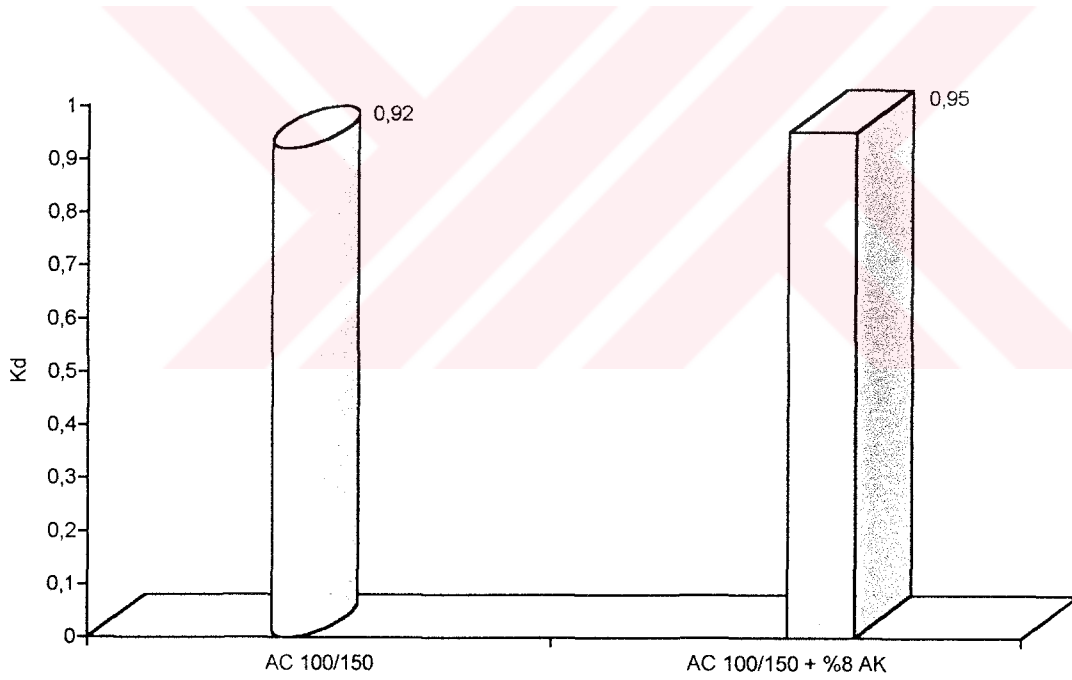
Şekil 5.2.6.4. Doygun yüzey-kuru numunenin serbest basınç mukavemet değerleri , (R_s)

Şekil 5.2.6.5’de görüldüğü gibi, ve %8 AK katkılı bitüm içeren numunelerin R_d değeri katkısız bitüm içeren numunelerin ortama değerinden daha yüksek olmuştur.

Şekil 5.2.6.6’de görüldüğü gibi, ve %8 AK katkılı bitüm içeren numunelerin K_d değeri katkısız bitüm içeren numunelerin değerinden daha yüksek olmuştur.



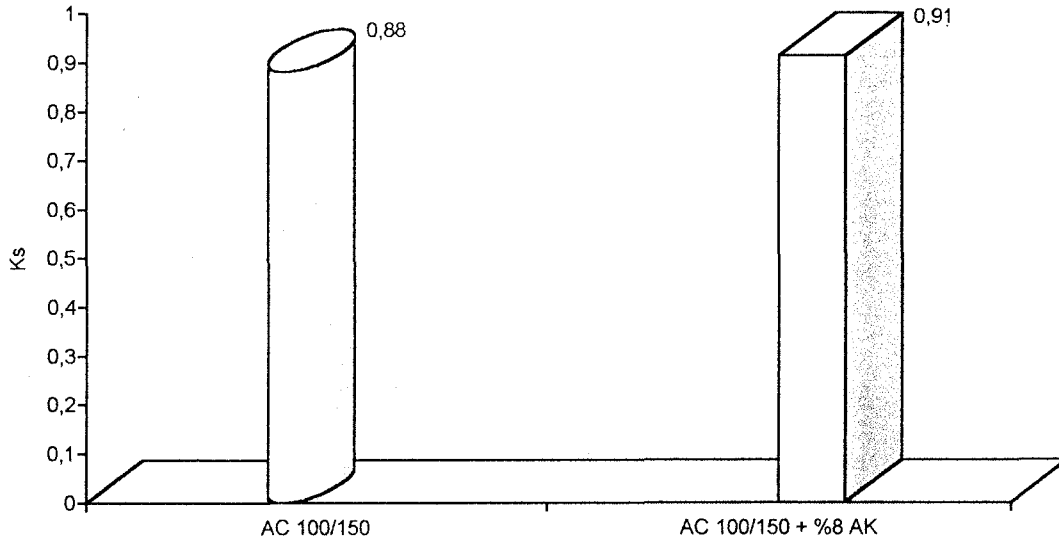
Şekil 5.2.6.5. 25 devre donma-çözülme periyotlarından sonra serbest basınç mukavemet değerleri , (R_d)



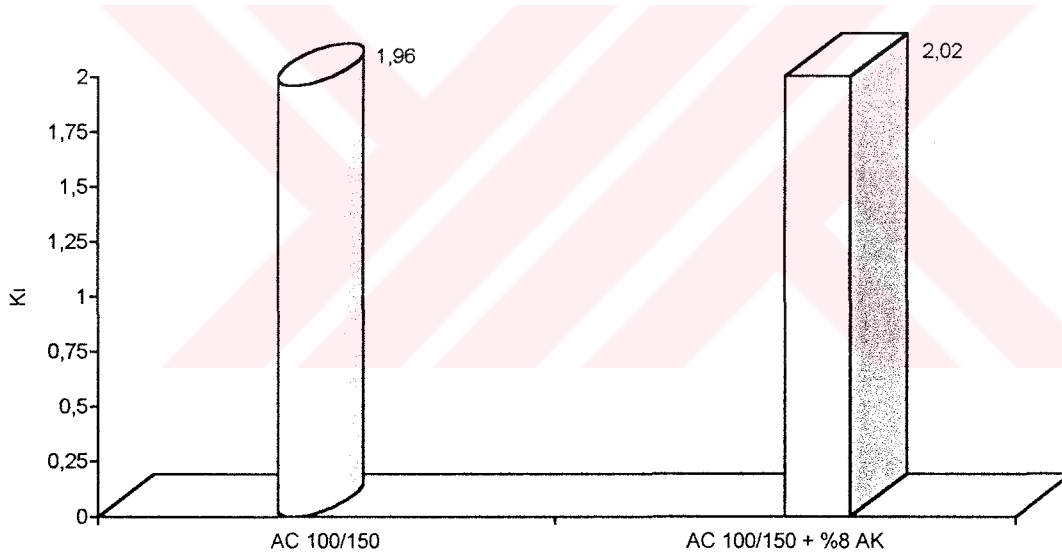
Şekil 5.2.6.6. Dona karşı dayanıklılık katsayısı değerleri , (K_d)

Şekil 5.2.6.7’de görüldüğü gibi, ve %8 AK katkılı bitüm içeren numunelerin K_s değeri katkısız bitüm içeren numunelerin ortama değerinden daha yüksek olmuştur.

Şekil 5.2.6.8’de görüldüğü gibi, ve %8 AK katkılı bitüm içeren numunelerin K_t değeri katkısız bitüm içeren numunelerin değerinden daha yüksek olmuştur.



Şekil 5.2.6.7. Suya dayanıklılık katsayısı değerleri , (K_s)



Şekil 5.2.6.8. Isıya dayanıklılık katsayısı değerleri , (K_t)

5.2.7. Yorulma Deney Sonuçları

Yorulma deneyi, katkısız AC 100/150 asfalt çimentosu ve %8 oranında AK içeren asfalt çimentosu ile hazırlanan Marshall numuneleri üzerinde 25°C'de yapılmıştır. Yüklemeler 90 kg, 100 kg ve 110 kg olarak uygulanmıştır. Bu verilerden yükleme miktarı ile yorulma ömrü arasında bir bağıntı yapılmış ve AK'nın bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Tablo 5.2.7.1. ve Tablo 5.2.7.2’de yatay deformasyon ve yorulma ömrü (yükleme sayısı) değerleri verilmiştir.

Tablo 5.2.7.1. Yatay deformasyon ve yorulma ömrü (yükleme sayısı) değerleri
(katkısız numuneler)

Yükleme , kg					
90 kg		100 kg		110 kg	
Yorulma ömrü (N_f), adet	Yatay deformasyon, mikron	Yorulma ömrü (N_f), adet	Yatay deformasyon, mikron	Yorulma ömrü (N_f), adet	Yatay deformasyon, mikron
1000	31	1000	105	1000	129,0292
2000	50	2000	138	2000	162,2551
3000	86	3000	171	3000	191,4524
4000	118	4000	499	4700	519,2359
5000	145	5000	1230	-	-
6000	166	6700	1936	-	-
7000	238	-	-	-	-
8000	403	-	-	-	-
9000	540	-	-	-	-
10000	710	-	-	-	-
11000	1111	-	-	-	-

Tablo 5.2.7.2. Yatay deformasyon ve yorulma ömrü (yükleme sayısı) değerleri
(%8 AK katkılı numuneler)

Yükleme , kg					
90 kg		100 kg		110 kg	
Yorulma ömrü (N_f), adet	Yatay deformasyon, mikron	Yorulma ömrü (N_f), adet	Yatay deformasyon, mikron	Yorulma ömrü (N_f), adet	Yatay deformasyon, mikron
1000	29	1000	56	1000	65,56074
2000	48	2000	69	2000	83,70947
3000	73	3000	73	3000	101,4597
4000	111	4000	174	4000	110,1092
5000	140	5000	184	5000	201,6102
6000	158	6000	188	6000	599,4598
7000	184	7000	197	7500	3639,811
8000	210	8000	1110	-	-
9000	236	9000	1119	-	-
10000	262	10000	1143	-	-
11000	405	11000	1166	-	-
12000	597	12000	1189	-	-
13000	979	13000	1524	-	-
14000	1227	-	-	-	-
15000	1830	-	-	-	-
16000	2400	-	-	-	-
17000	2900	-	-	-	-

Yatay deformasyon değerlerini Marshall numunesinin çapına (101mm) bölerek birim çekme şekil değiştirme değerleri bulunmuştur (Tablo 5.2.7.3-4).

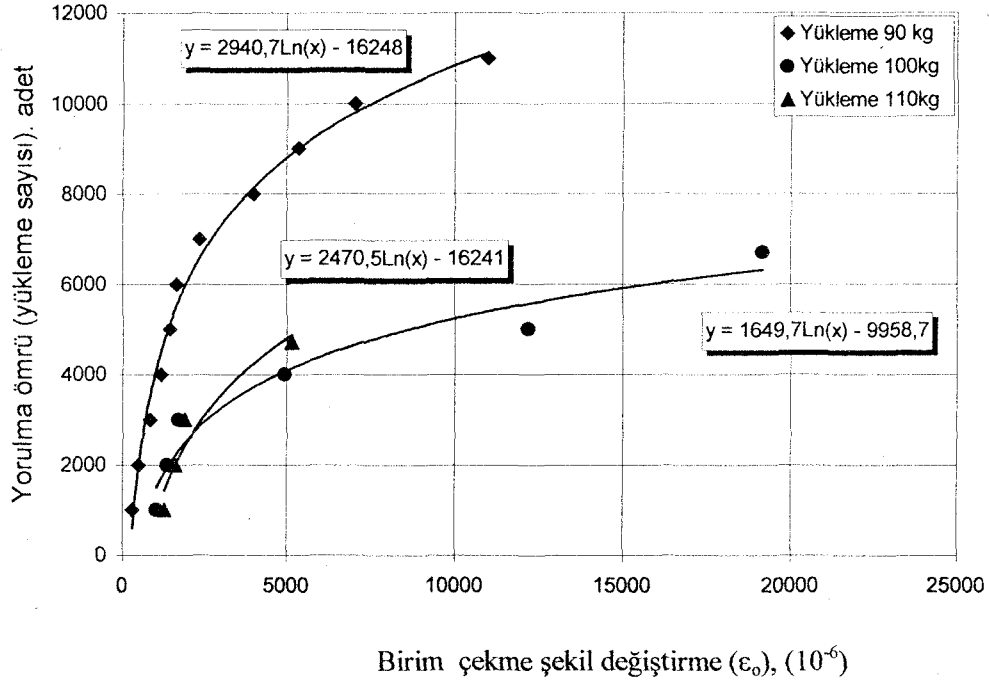
Birim çekme şekil değiştirme - yorulma ömrü (yükleme sayısı) grafikleri Excel programı kullanılarak çizilmiş ve gereken logaritmik bağıntılar elde edilmiştir (Şekil 5.2.7.1-2)

Tablo 5.2.7.3. Birim çekme şekil değiştirme ve yorulma ömrü (yükleme sayısı) değerleri
(katkısız numuneler)

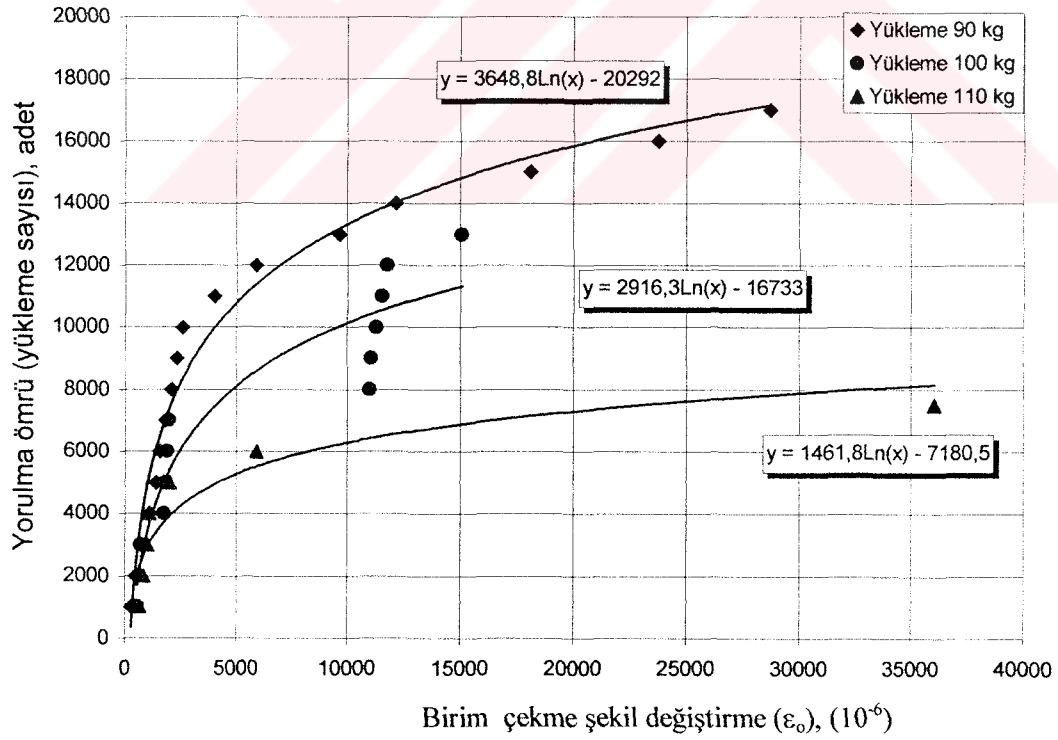
Yükleme , kg					
90 kg		100 kg		110 kg	
Yorulma ömrü (N_f), adet	Birim çekme şekil değiştirme, $\epsilon_0 (10^{-6})$	Yorulma ömrü (N_f), adet	Birim çekme şekil değiştirme, $\epsilon_0 (10^{-6})$	Yorulma ömrü (N_f), adet	Birim çekme şekil değiştirme, $\epsilon_0 (10^{-6})$
1000	307	1000	1040	1000	1278
2000	495	2000	1366	2000	1606
3000	851	3000	1693	3000	1896
4000	1168	4000	4941	4700	5141
5000	1436	5000	12178	-	-
6000	1643	6700	19168	-	-
7000	2356	-	-	-	-
8000	3990	-	-	-	-
9000	5347	-	-	-	-
10000	7029	-	-	-	-
11000	11000	-	-	-	-

Tablo 5.2.7.4. Birim çekme şekil değiştirme ve yorulma ömrü (yükleme sayısı) değerleri
(%8 AK katkılı numuneler)

Yükleme , kg					
90 kg		100 kg		110 kg	
Yorulma ömrü (N_f), adet	Birim çekme şekil değiştirme, $\epsilon_0 (10^{-6})$	Yorulma ömrü (N_f), adet	Birim çekme şekil değiştirme, $\epsilon_0 (10^{-6})$	Yorulma ömrü (N_f), adet	Birim çekme şekil değiştirme, $\epsilon_0 (10^{-6})$
1000	287	1000	554	1000	649
2000	475	2000	683	2000	829
3000	723	3000	723	3000	1005
4000	1099	4000	1723	4000	1090
5000	1386	5000	1822	5000	1996
6000	1564	6000	1861	6000	5935
7000	1822	7000	1950	7500	36038
8000	2079	8000	10990	-	-
9000	2337	9000	11079	-	-
10000	2594	10000	11316	-	-
11000	4001	11000	11544	-	-
12000	5911	12000	11772	-	-
13000	9693	13000	15089	-	-
14000	12149	-	-	-	-
15000	18119	-	-	-	-
16000	23762	-	-	-	-
17000	28713	-	-	-	-



Şekil 5.2.7.1. Birim çekme şekil değiştirme -Yorulma ömrü (yükleme sayısı) ilişkisi (katkısız numuneler)



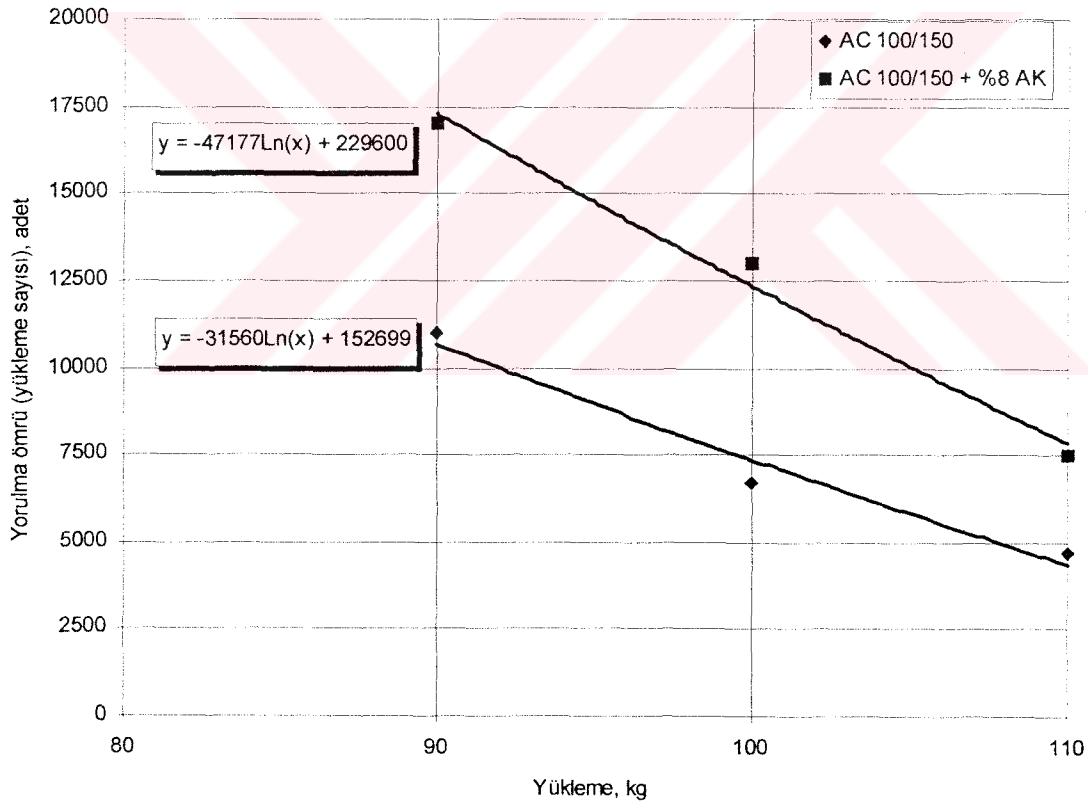
Şekil 5.2.7.2. Birim çekme şekil değiştirme -Yorulma ömrü (yükleme sayısı) ilişkisi (%8 AK katkılı numuneler)

Şekil 5.2.7.1-2 incelendiğinde, bütün artan yüklemelerde %8 AK katkılı numunelerdeki birim çekme şekil değiştirme miktarının katkısız numunelere göre daha az olduğu görülmektedir.

Tablo 5.2.7.5’de verilen değerlere göre yükleme-yorulma ömrü diyagramı çizilmiştir (Şekil 5.2.7.3). Yüklemeler yatay eksende kg olarak, yorulma ömürleri ise dikey eksende adet olarak verilmektedir.

Tablo 5.2.7.5. Yorulma ömrü (yükleme sayısı) değerleri

Yükleme, kg	Yorulma ömrü (yükleme sayısı) (N_f), adet	
	AC 100/150	AC 100/150 + %8 AK
90	11000	17000
100	6700	13000
110	4700	7500



Şekil 5.2.7.3. Yükleme -Yorulma ömrü (yükleme sayısı) ilişkisi

Şekil 5.2.7.3. incelendiğinde, bütün artan yüklemelerde %8 AK katkılı numunelerin yorulma ömrü katkısız numunelere göre daha yüksek çıkmıştır.

6. SONUÇ

Bu çalışma sırasında laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Deneylerde esas bağlayıcı olarak AC 100/150 penetrasyonlu asfalt çimentosunun ve modifiyer olarak kullanılan AK'nın fiziksel özellikleri incelenmiştir. Bunun sonucunda, AC'nin 227°C'de, AK'nın ise 220°C'de bozulduğu, ergime noktalarının ise sırasıyla 77°C ve 63°C olduğu ortaya çıkmıştır. Bu değerlerin birbirine yakın olması katkı maddesi ile asfalt çimentosunun karıştırma sıcaklıklarının uygunlukları bakımından olumlu sonuç vermiştir.

Ayrıca AC ve AK'nın kimyasal yapıları incelenmiş ve AC'nin yüksek moleküllü alifatik hidrokarbonlardan, AK'nın ise aromatik ve alifatik hidrokarbonlardan oluşan karboksilik asitlerden ve keton karışımlardan oluştuğu ortaya çıkmıştır.

2. AK'nın bütün katkı oranlarında penetrasyon değerlerini saf AC'ye göre düşürdüğü görülmüştür (Şekil 5.2.1.1). AK ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların penetrasyon değerlerinin düşük olması, bu tür katkılı bağlayıcıların sıcak iklimli yerlerde kullanılmasını mümkün kılmıştır.

AK katkılı asfalt çimentosunda, AK yüzdeleri arttıkça yumuşama noktası (Şekil 5.2.2.1) ve düktilite değerleri de (Tablo 5.2.3.1) artmıştır. AK ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların düktilite değerlerinin yüksek olması, bu tür katkılı bağlayıcılara katkısız bitüme göre daha yüksek esneme kabiliyeti kazandırmaktadır. Bulunan değerler, AK katkılı bağlayıcıların, mineral agrega malzemesine katkısız olanlara göre daha üstün bir bağlanma yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

3. Marshall Metodu kullanılarak seçilen agrega gradasyonu için numunelerin optimum bitüm muhtevası %5.1 olarak bulunmuştur. Optimum bitüm yüzdesine göre stabilite = 1643 kg olarak elde edilmiştir.

Marshall Metodu'na göre AK katkılı numuneler hazırlanmıştır. Test sonucunda %8 katkı oranında stabilitenin (1919 kg) katkısız bitüme göre %14 oranında arttığı görülmüştür (Şekil 5.2.5.12). Akma değerlerinin bütün katkı oranlarında arttığı tespit edilmiştir (2.52mm (%0 AK) - 2.90mm (%10 AK)). Ancak bu artış şartname değerleri (2-4mm) arasında kalmaktadır (Şekil 5.2.5.11).

4. %8 AK katkılı bitüm içeren numunelerin R_{20} , R_{50} , R_S , R_D değerleri, katkısız bitüm içeren numunelerin değerlerinden sırasıyla %10, %7, %15, %18 oranlarında daha yüksek olmuştur (Şekil 5.2.6.2-5). Böylece AK katkılı numunelerin katkısız numunelere göre suya, ısıya ve dona karşı daha dayanıklı olduğu ortaya çıkmıştır.

5. Bütün artan yüklemelerde %8 AK katkılı numunelerdeki birim çekme şekil değiştirme değerleri katkısız numunelere göre daha az çıkmıştır (Şekil 5.2.7.3-4).

% 8 AK katkılı bitüm içeren numunelerin yorulma ömrü (yükleme sayısı) değerleri; 90kg, 100kg, 110kg'lık yüklemelerde, sırasıyla %35, %48, %37 oranlarında katkısız bitüm içeren numunelerinin değerlerinden daha yüksek çıkmıştır (Şekil 5.2.7.5).

% 8 AK katkılı bitümlü bağlayıcı maliyetinde saf bitüme oranla %16,4'lük bir artış olmaktadır. Maliyetteki bu artışa rağmen, AK'nı bitümlü sıcak karışımlarının fiziko-mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ve yorulma ömrünü uzattığı gibi faydalar sağlamaktadır.

Ağaç katranı içeren asfalt çimentosu ile hazırlanan numunelerin Marshall stabilitesi, serbest basınç mukavemeti ve yorulma ömrü değerlerinin saf AC 100/150 penetrasyonlu asfalt çimentosu ile hazırlanan numunelerin değerlerinden daha yüksek çıkması, mineral agrega ile ağaç katranı arasındaki kimyasal absorbsiyon ve kuvvetli adhezyon bağlarının teşekkül etmesine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan çalışmalar ve alınan sonuçlar, ağaç katranının bitümlü sıcak karışımlarının performansını kapsamlı olarak düzelttiğini ve bir katkı maddesi olarak bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliğini göstermiştir.

KAYNAKLAR

Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L., Rollings, R., 1993, Effect of styrene-butadiene-styrene block copolymer on fatigue crack propagation behavior of asphalt concrete mixtures, Transportation Research Record, 1417, 178-186

Ağar, E., Süttaş, İ., Öztaş, G., 1998, Beton yollar, İ. T. Ü. Matbaası, İstanbul, 392 s

Ali, N., Zahran, S., Trogton, J., Bergan, A., 1994. A mechanistik evaluation of modified asphalt paving mixtures, Canada J. Civ. Eng., 21, 954-965

Beysher, R. V., 1989, Tallovıy pek, Aftoreferat, Moskow, 1-19

Birliker, R. Y., 1998, Bitümlü karışımlara eklenebilecek katkılar ile bu tip bitümlü karışımların davranışlarının araştırılması ve bir yorulma eğrisi tahmin modeli, Doktora tezi, Y. T. Ü. Fen Bil. Enst., İstanbul, 208 s

Brown, S. F., 1978, Material characteristics for analytical pavement design, Applied science publishers LTD, England, 41-92

Erdik, E., 1993, Organik kimyada spektroskopik yöntemler, Gazi Büro Kitabevi, Ankara, 276 s

Erdoğan, B., 1977, Termal yöntemler, Gazi Üniversitesi, Ankara, 196 s

Franchen, L., 1997, Bitumious binders and mixtures, State of the art and interlaboratory test on mechanical behavior and mix design, Rilem Report 17

Gorelikov, V. S., 1991, Othodı asetilenovogo proizvodstva, Arhangelsk, 1-9

Gregg, L. E., Alcone, W.H., 1954, Investigation of rubber additives in asphalt paving mixtures, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 23, 28 s

Grushko, İ. M., Korolev, İ. V., Borsh, İ. M., 1991, Dorojno-transportniye materialı, Transport, Moskow, 357

Johnson, Roger A., Juristovski, Alan G., 1995, Physical properties of tall oil pitch modified asphalt cement binders, ASTM Special Technical Publication, 214-231.

Julay, L. İ., 1988, Premineniye fosfornih shlakov dorojno-stroitelstve , Aftoreferat, Alma-Ata, 21

Keçeciler, A. F., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A., Gökçe, A. F., 1979, Bitümlü malzemeler laboratuvar el kitabı, KGM Matbaası, Ankara, 37-57 s

Korhonen, M., Kellomäki, A., 1996, Miscibilities of polymers in bitumen and tall oil pitch under diferent mixing conditions, Fuel. Dec., 1727-1732.

Kuloğlu, N., Namlı, R., 1996, Evsel plastik atıkların üst yapı aşınma tabakasında kullanılması, IX. Müh. Sempozyumu, SDÜ, Isparta, 43-46

Kuloğlu, N., Ahmedzade, P., 1999, Polivinil klorür (PVC) ile asfalt modifikasyonu, X. Müh. Sempozyumu, SDÜ, Isparta, 593-602

Kuloglu N., 1999, Effect of astragalus on characteristics of asphalt concrete, Journal of materials in civil engineering, Nov.,11, 4, 183-186.

Kuloğlu, N., 2001, Bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarının rijitliğine etki eden parametreler, Türk J Engin Environ Sci., Tübitak, 25, 61-67

Martin, K. G., 1962, Preliminary microviscometer studies of carbon black bitumen dispersions, Proceedings of the Australian Road Research Board, Vol. 1, Part II

Monismith, C. L., Epps, J. A., Finn, F. N., 1986, Improved asphalt mix design, Proc. Association of Asphalt Paving Technologist, 54, 347-406

Morrison, G. R., Lee, J. K., Hesp, S. M. A., 1994, Chlorinated polyolefins for asphalt binder modification, *Journal of Applied Polymer Science*, 54, 2, 231-240.

Myre, J., 1992, Fatigue of asphalt materials for Norwegian conditions, *Proc. of the 7th International Conf. on Asphalt Pavements*, 3, 238-251

Önal, M. A., Karaca, S., 1990, Asphalt betonu karışım dizayn metotları, KGM Matbaası, Ankara, 265-270 s

Porter, B. W., Kennedy, T. W., 1975, Comparison of Fatigue Test Methods for asphalt materials, Center for Highway Research the Univ. of Texas at Austin Research Report 183-4, 117

Rostler, F. S., White, R. M., Dannenbege, E.M., (1977), Carbon black as a reinforcing agent for asphalt, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving technologist*, 4, 376 s

SHRP A 404-A, 1994, Fatigue response of asphalt – aggregate mixes, National Research Council, Washington DC, 256

Thompson, D. C., 1964, Rubber modifier in bituminous material, Edited by Arnold J. Holberg, Interscience, New York, 1, 9, 375 s

Tığdemir, M., 1999, Bitümlü malzemelerin mekanik özelliklerinin parametrik incelenmesi, Doktora tezi, S.D.Ü., Fen Bil. Enst., Isparta, 112 s

Toropseva, A. M., Belogorodskaya, K. V., Bondarenko, V., 1972, Opredeleeniye plotnosti poroškoobraznıh polimerov, *Laboratorniy praktikum po himii tehnologii visokomolekulernıh soyedineniy*, Moskow, 156s

Tuncan, M., Çetin, A., Tuncan, A., 1997, Lastik ve plastik atıkların asfalt beton kaplamasında değerlendirilmesi, *TMMOB İMO Bildiriler Kitabı*, Eskişehir, 103-119

Türk Standartları Enstitüsü 118/Temmuz 1976, Bitümlü maddelerin penetrasyon deneyi için metot, 3 s

Türk Standartları Enstitüsü 119/ Nisan 1964, Bitümlü maddelerin düktilite deneyi için metot, 3 s

Türk Standartları Enstitüsü 120/ Ocak 1972, Bitümlü maddelerin yumuşama noktası deneyi için metot, 4 s

Türk Standartları Enstitüsü 3720/Eylül 1983, Bitümlü kaplama karışımlarının hesap esasları- Marshall ve Hubbard-Field Metotları ile, 10 s

Uluçaylı, M., 1998, Modifiye bitüm ve modifikasyonun katkılarının kullanımı, 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu, 15-29

Uusitalo, R., Sihvo, A., 1994, Asphalt compositions, and tall oil pitch based additives for use in the manufacture of the asphalt, Finn. FI 91,879., 13 May ,13 s

Yağız, F., Işıksalan, G., Keçeciler, A. F., Akkol, A., 1967, Bitümlü malzemeler, KGM Matbabası, Ankara, 303-309 s

Yıldırım, B., Kuloğlu, N., 1993, Ergani bakır işletmeleri reverber cürufunun yol üst yapısının temel ve alt temel tabakalarında kullanımı üzerinde bir araştırma, TMMOB İMO Bildiriler Kitabı, Ankara, 255-265

Yıldırım, B., Kuloğlu, N., Akyiğit, M., 1993, Ergani bakır işletmeleri cürufunun bitümlü sıcak karışımında agrega olarak kullanılması, TMMOB İMO Teknik Dergi, 619-630

Yıldırım, B., Kuloğlu, N., Güngör, M. M., 1997, Afşin-Elbistan uçucu külünün asfalt betonu kaplamalarda kullanılması, TMMOB İMO Bildiriler Kitabı, Eskişehir, 187-196

Williamson, S. D., Gaughan, R. L., 1992, Field evaluation of rutting and cracking in asphalt with modified binders, Pavement performance and materials proceedings-conference of the Australian Road Board, 16, 2, 223-235

Zanzotto, L., Foley, D., Rodier, C. E., Watson, R. D., 1987, Modified asphalt - are You really coming ? Canadian Technical Asphalt Association Proceedings, Toronto Ont., 92 s



EKLER

EK – 1

Marshall stabilite faktörleri

Numune (mm)		Numune (mm)		Numune (mm)		Numune(mm)		Numune (mm)	
Boy	Faktör	Boy	Faktör	Boy	Faktör	Boy	Faktör	Boy	Faktör
50.0	1.470	55.3	1.256	60.6	1.079	65.9	0.943	71.2	0.834
50.1	1.467	55.4	1.253	60.7	1.076	66.0	0.940	71.3	0.832
50.2	1.463	55.5	1.250	60.8	1.073	66.1	0.938	71.4	0.830
50.3	1.469	55.6	1.247	60.9	1.070	66.2	0.936	71.5	0.829
50.4	1.456	55.7	1.243	61.0	1.067	66.3	0.934	71.6	0.828
50.5	1.453	55.8	1.239	61.1	1.064	66.4	0.932	71.7	0.826
50.6	1.449	55.9	1.235	61.2	1.062	66.5	0.930	71.8	0.825
50.7	1.446	56.0	1.231	61.3	1.056	66.6	0.927	71.9	0.824
50.8	1.442	56.1	1.228	61.4	1.053	66.7	0.925	72.0	0.822
50.9	1.439	56.2	1.224	61.5	1.050	66.8	0.922	72.1	0.821
51.0	1.435	56.3	1.220	61.6	1.047	66.9	0.920	72.2	0.820
51.1	1.432	56.4	1.216	61.7	1.044	67.0	0.918	72.3	0.817
51.2	1.428	56.5	1.214	61.8	1.040	67.1	0.915	72.4	0.816
51.3	1.425	56.6	1.210	61.9	1.038	67.2	0.913	72.5	0.815
51.4	1.421	56.7	1.206	62.0	1.036	67.3	0.911	72.6	0.814
51.5	1.418	56.8	1.202	62.1	1.033	67.4	0.908	72.7	0.812
51.6	1.414	56.9	1.198	62.2	1.032	67.5	0.906	72.8	0.811
51.7	1.411	57.0	1.104	62.3	1.031	67.6	0.904	72.9	0.810
51.8	1.497	57.1	1.190	62.4	1.028	67.7	0.901	73.0	0.809
51.9	1.404	57.2	1.187	62.5	1.026	67.8	0.899	73.1	0.808
52.0	1.400	57.3	1.184	62.6	1.023	67.9	0.897	73.2	0.806
52.1	1.207	57.4	1.181	62.7	1.021	68.0	0.894	73.3	0.804
52.2	1.293	57.5	1.178	62.8	1.018	68.1	0.892	73.4	0.802
52.3	1.390	57.6	1.175	62.9	1.016	68.2	0.890	73.5	0.800
52.4	1.382	57.7	1.172	63.0	1.013	68.3	0.888	73.6	0.799
52.5	1.375	57.8	1.169	63.1	1.011	68.4	0.886	73.7	0.797
52.6	1.368	57.9	1.164	63.2	1.008	68.5	0.885	73.8	0.795
52.7	1.359	58.0	1.161	63.3	1.006	68.6	0.883	73.9	0.794
52.8	1.351	58.1	1.158	63.4	1.003	68.7	0.881	74.0	0.792
52.9	1.344	58.2	1.155	63.5	1.000	68.8	0.879	74.1	0.790
53.0	1.337	58.3	1.152	63.6	0.998	68.9	0.877	74.2	0.788
53.1	1.328	58.4	1.149	63.7	0.995	69.0	0.875	74.3	0.786
53.2	1.320	58.5	1.146	63.8	0.992	69.1	0.874	74.4	0.784
53.3	1.317	58.6	1.143	63.9	0.990	69.2	0.872	74.5	0.782
53.4	1.314	58.7	1.140	64.0	0.988	69.3	0.870	74.6	0.780
53.5	1.311	58.8	1.137	64.1	0.985	69.4	0.868	74.7	0.779
53.6	1.306	58.9	1.133	64.2	0.982	69.5	0.866	74.8	0.777
53.7	1.305	59.0	1.130	64.3	0.900	69.6	0.864	74.9	0.776
53.8	1.302	59.1	1.127	64.4	0.978	69.7	0.862	75.0	0.775
53.9	1.299	59.2	1.124	64.5	0.975	69.8	0.860	75.1	0.773
54.0	1.296	59.3	1.120	64.6	0.972	69.9	0.858	75.2	0.772
54.1	1.293	59.4	1.117	64.7	0.970	70.0	0.856	75.3	0.771
54.2	1.290	59.5	1.114	64.8	0.967	70.1	0.854	75.4	0.770
54.3	1.286	59.6	1.110	64.9	0.965	70.2	0.852	75.5	0.769
54.4	1.283	59.7	1.107	65.0	0.962	70.3	0.850	75.6	0.767
54.5	1.280	59.8	1.104	65.1	0.960	70.4	0.849	75.7	0.766
54.6	1.277	59.9	1.100	65.2	0.957	70.5	0.847	75.8	0.765
54.7	1.274	60.0	1.097	65.3	0.955	70.6	0.845	75.9	0.764
54.8	1.271	60.1	1.094	65.4	0.953	70.7	0.843	76.0	0.762
54.9	1.268	60.2	1.090	65.5	0.951	70.8	0.841	76.1	0.761
55.0	1.265	60.3	1.088	65.6	0.494	70.9	0.839	76.2	0.760
55.1	1.262	60.4	1.085	65.7	0.947	71.0	0.837	76.3	0.759
55.2	1.259	60.5	1.082	65.8	0.945	71.1	0.836	76.4	0.785

EK - 2

$G = \text{Bağlayıcının ağırlığı} = 1,1455 \text{ gr,}$

$P_0 = \text{Piknometre ağırlığı} = 5,2002 \text{ gr,}$

$P_1 = \text{Piknometre + saf su ağırlığı} = 15,2063 \text{ gr,}$

$P_2 = \text{Piknometre + etil alkol ağırlığı} = 13,2786 \text{ gr,}$

$P_3 = \text{Piknometre + bağlayıcı + etil alkol ağırlığı} = 13,5305 \text{ gr.}$

$$\gamma = \frac{G \times \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0}}{G + P_2 - P_3} = \frac{1,1455 \times \frac{13,2786 - 5,2002}{15,2063 - 5,2002}}{1,1455 + 13,2786 - 13,5305} = 1,0350 \text{ gr/cm}^3$$



EK - 3

P_k	=	Kaba agreganın yüzdesi	=	35
P_i	=	İnce agreganın yüzdesi	=	60
P_f	=	Filler'in yüzdesi	=	5
G_i	=	İnce agreganın özgül ağırlığı (gr/cm ³)	=	2,674
G_k	=	Kaba agreganın özgül ağırlığı (gr/cm ³)	=	2,663
G_f	=	Filler'in özgül ağırlığı (gr/cm ³)	=	2,604

$$W_a = \frac{54}{1200} \times 100 = 4,5$$

$$W_b = \frac{54}{1200 + 54} \times 100 = 4,31$$

$$V = 1248,5 - 721,5 = 527 \text{ cm}^3$$

$$D_p = \frac{1244}{527} = 2,361 \text{ gr/cm}^3$$

$$D_{\text{Port}} = (2,361 + 2,378)/2 = 2,370 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{\text{ag}} = \frac{100}{\frac{35}{2,663} + \frac{60}{2,674} + \frac{5}{2,604}} = 2,667 \text{ gr/cm}^3$$

$$D_T = \frac{100}{\frac{100 - 4,31}{2,667} + \frac{4,31}{1,035}} = 2,497 \text{ gr/cm}^3$$

$$V_h = \frac{2,497 - 2,370}{2,497} \times 100 = 5,09$$

$$V_b = \frac{2,370 \times 4,31}{1,035} = 9,87$$

$$V.M.A. = 5,09 + 9,87 = 14,96$$

$$V_r = \frac{9,87}{14,96} \times 100 = 65,98$$