T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PİROLİZ EDİLMİŞ ATIK ARAÇ LASTİKLERİNDEN ELDE EDİLEN ATIK YAĞ VE KARBON SİYAHI İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ BAĞLAYICININ REOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Abdullah TAŞCI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONYA, 2010

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PİROLİZ EDİLMİŞ ATIK ARAÇ LASTİKLERİNDEN ELDE EDİLEN ATIK YAĞ VE KARBON SİYAHI İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ BAĞLAYICININ REOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Abdullah TAŞCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA, 2010

Bu tez 24 / 02 / 2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK
(Danışman)

Doç. Dr. S. Bahadır YÜKSEL
(Üye)

Yrd.Doç. Dr. Ergün PEHLİVAN
(Üye)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PİROLİZ EDİLMİŞ ATIK ARAÇ LASTİKLERİNDEN ELDE EDİLEN ATIK YAĞ VE KARBON SİYAHI İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ BAĞLAYICININ REOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Abdullah TAŞCI

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

2010, 107 sayfa

Jüri: Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Doç. Dr. S. Bahadır YÜKSEL

Yrd. Doç. Dr. Ergün PEHLİVAN

Atık olarak elde edilen ürünlerin depolanması veya doğaya bırakılması çok büyük sıkıntılar yaratmakta, çevre kirliliğiyle beraber topluma büyük sorunlar getirmektedir. Günümüzde, bazı endüstriyel ürünlerin üretimi sırasında ortaya çıkan yan ürün veya atıkların değerlendirilmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Atıklar, yeni ürünlerin elde edilmesinde veya mevcut ürünlerin özelliklerini iyileştirebilecek katkı maddesi olarak kullanılabilmektedir. Atık malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi, doğal malzemelerin kullanımını azaltarak tabiatın zarar görmesini engellemekte, aynı zamanda atık malzemelerin depolanma sorununu ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle atıkların değerlendirilerek ülke ekonomisine kazandırılması gerekmektedir.

Mühendislikte geniş uygulama alanı bulan bitümlü malzemeler fiziksel özellikleri ile tercih edilmektedirler. Yol üstü esnek kaplamaların performans ve dayanıklılık yönünden uzun ömürlü, bakım-onarım yönünden maliyetlerinin düşük olması istenmektedir. Bu nedenle günümüzde esnek kaplamaların esas unsurlarından biri olan bitümün modifiye edilerek esnek kaplamaların performansları arttırılmaya çalışılmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, piroliz edilmiş atık araç lastiklerinden elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ile bitümün modifiye edilmesi ve bu katkı maddelerinin bitümün reolojik özelliklerine olan etkisinin incelenmesidir. Reolojik özellikleri üzerindeki etkileri penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kesme reometresi (DSR), dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT), kiriş eğilme reometresi deneyi (BBR) ile, sıcak karışımdaki stabiliteye olan etkisi de Marshall deneyi ile belirlenmiştir.

Karışımlara uygulanan deneyler, ilave edilen katkı maddelerinin bitümün özelliklerini değiştirdiği sonucuna ulaştırmıştır.. Modifiye edilmiş bitümün penetrasyon derecesi artmış, yumuşama noktası değeri ise azalmıştır. Bunun yanında atık lastik yağı, bitümün yaşlanma etkilerini azaltmıştır. Bitümün PG sınıfı ise PG 64-22'den PG 58-28'e değişmiştir.

Orijinal ve atık lastik yağı katkılı bitümlü bağlayıcılar kullanılarak sıcak karışım deneylerinden biri olan Marshall deneyi yapılmıştır. Kullanılan katkı, kaplama numunesinin stabilitesini azaltmıştır. Ancak bağlayıcı oranı % 4 seçildiğinde akma (deplasman) değeri düşmüştür. Bu da kaplamanın plastik deformasyonlara daha dayanıklı olacağını göstermiştir. Akma değerindeki bu düşme malzemenin daha gevrek olacağı anlamına gelse bile bu değer şartname limitleri dahilinde kalmıştır.

Anahtar Kelimeler:

Bitüm, Modifiye Bitüm, Piroliz, Performans Dereceli (PG) Bitüm, Marshall

ABSTRACT

MS Thesis

Rheologıcal Properties of Modified Bitumen Made With Waste Oil and Carbon Black Obtained by Pyrolysis Method Using by Waste Vehicle Tires

Abdullah TAŞCI

Selçuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Department

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
2010, 105 Pages
Jury: Assoc. Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Assoc. Prof. Dr. S. Bahadır YÜKSEL
Asist. Prof. Dr. Ergün PEHLİVAN

The storage of waste products or leave to the nature will create large environmental problems like pollution in the society. Today, various studies are performed on the assessment of some industrial products during the production of byproducts or waste. Wastes can be used as additives to obtain new products as well to make better the properties of existing products. Evaluation of waste materials and byproducts, reduce to use the natural materials of nature and prevent the damage, it also eliminates the store problem of waste materials. Therefore, it is necessary to evaluate the waste materials to make better the country's economy.

Bituminous pavement has a wide range of applications due to engineering and physical properties. It is required from flexible pavements that low maintenance in terms of costs and long-lasting in terms of performance and durability. Therefore, today the main aspect on the flexible pavement is modification of bitumen to increase the performance.

The purpose of this thesis is to examine the effect of liquefied waste vehicle tires obtained from the pyrolysis on the bituminous mixture. The effects on the rheological characteristics were tested using by penetration, softening point, dynamic shear rheometer (DSR), rolling thin film oven test (RTFOT) and bending beam rheometer (BBR) tests.

Experiments applied on blends showed that supplemental additives changed the properties of bitumen i.e. modified bitumen increased the penetration, the softening point value decreased. Besides, the waste tires oil reduced the aging effects of binder. PG grade of bitumen has been changed from PG 64- 22 to PG 58-28.

Marshall test experiments have been made on the mixture made with base bitumen and modified bitumen. Additives used, reduced the stability of the bituminous mixtures. However, flow (displacement) value decreased for 4% binder content. This would be more resistant to plastic deformation. However, decrease in flow remained in the specification.

Keywords:
Bitumen, Modified Bitumen, Pyrolysis, Nigella Sativa, Performance Grade (PG) Bitumen, Marshall

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve görüşlerini benden esirgemeyen Hocam Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK' e, yapmış olduğum laboratuar çalışmalarımda bana yardımcı olan İnşaat Yüksek Mühendisi Öğr. Gör. Mehmet Ali LORASOKKAY'a ve bana yaşama sevinci veren kızıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……..iii
ABSTRACT…….v
TEŞEKKÜR……..vii
İÇİNDEKİLER……viii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ……...……...xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ……...……..xiv
TABLOLAR DİZİNİ……...…….xv
EKLER DİZİNİ……..……..…….xvii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI 5
3. YOL ÜSTYAPILARI 7
3.1. Altyapı 7
3.2. Üstyapı 7
3.2.1. Üstyapı tipleri 8
3.2.1.1 Rijit üstyapı 8
3.2.1.2 Yarı rijit üstyapı 8
3.2.1.3 Esnek üstyapı 9
3.2.1.3.1. Esnek üstyapı tabakaları 9
4. ASFALT BETONU KAPLAMALARDA MEYDANA GELEN BOZULMALAR 14
4.1. Kalıcı Deformasyonlar 14
4.2. Çatlamalar 15
4.3. Ayrışmalar 16
4.3.1 Folluk tipi oyuklar 17

4.3.2 Sökülmeler 17
4.3.2.1 Tabaka halinde sökülmeler 17
4.3.2.2 Soyulma 17
4.3.2.3 Cilalanma 18
4.3.2.4 Kusma 18
5. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR 19
5.1 Asfalt 20
5.1.1 Asfalt çimentoları (AC) 21
5.1.2 Sıvı petrol asfaltları (Katbek asfaltlar) 22
5.1.3 Asfalt emülsiyonları 23
5.2 Katran 24
5.3 Bitüm Özelliklerinin Belirlenmesi 25
5.3.1 Penetrasyon deneyi 25
5.3.2 Viskozite deneyi 26
5.3.3 Yumuşama noktası deneyi 26
5.3.4 Düktilite deneyi 27
5.3.5 Fraass kırılma noktası deneyi 28
5.3.6 Superpave (Yüksek performanslı asfalt kaplama) deneyleri 29
5.3.6.1 Dönel viskozimetre ile bağlayıcı işlenebilirliklerinin belirlenmesi 30
5.3.6.2 Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) yöntemiyle bağlayıcıların kısa süreli yaşlandırılması 31
5.3.6.3 Basınçlı oksidasyon deneyi (PAV) 32
5.3.6.4 Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi ile bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyesinin belirlenmesi 33
5.3.6.5 Eğilme deneyi (BBR) 34
5.3.6.6 Doğrudan çekme (DTT) deneyi 35

5.4 Bağlayıcıların performans seviyelerinin (PG) belirlenmesi 36
6. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR 38
6.1. Marshall Deneyi 38
6.1.1. Deneyde kullanılan aletler 39
6.1.2. Deney karışımlarının hazırlanması 39
6.1.3. Deney numunelerinin hazırlanması 40
6.1.4. Numunelerin sıkıştırılması 40
6.1.5. Deneyin yapılışı 41
6.1.6. Deney sonuçları ve optimum bağlayıcı oranı tayini 41
6.2. Elek Analizi Deneyi 42
7. BİTÜMÜN MODİFİKASYONU 43
7.1. Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye Edilme Nedenleri 43
7.2. Bitümün Modifikasyon Yöntemleri 45
7.3. Bitüm Katkı Maddelerinde Aranan Özellikler 45
7.4. Modifiye Bitümlerde Aranan Özellikler 46
7.5. Bitümün Modifikasyonu için Kullanılan Katkılar 46
7.6. Bitümün Modifikasyon Türleri 47
7.6.1. Kükürt ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu 48
7.6.2. Kauçuk ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu 48
7.6.3. Termoplastik polimerlerin ilave edilmesi yoluyla bitümlerin modifikasyonu 48
7.6.4. Termoplastik kauçukların ilavesi ile bitüm modifikasyonu 49
7.6.5. Termoset modifiyeli bağlayıcılar 49
8. BİYOKÜTLE 50
8.1. Biyokütle Kaynakları 50
8.1.1. Bitkisel kaynaklar 50

8.1.2. Hayvansal artıklar 51
8.1.3. Şehir ve endüstri atıkları 51
8.2. Biyokütleye Uygulanan Dönüşüm Süreçleri 51
8.3. Termokimyasal Yöntemler 52
8.3.1. Yanma 52
8.3.2. Gazlaştırma 53
8.3.3. Sıvılaştırma 53
8.3.4. Piroliz 53
8.4. Pirolizden Elde Edilen Ürünler 54
8.4.1. Katı ürün 54
8.4.2. Gaz ürün 54
8.4.3. Sıvı ürün 55
8.5. Pirolizi Etkileyen Parametreler 55
8.5.1. Sıcaklık 55
8.5.2. Isıtma hızı 56
8.5.3. Reaksiyon süresi 56
8.5.4. Basınç 56
8.5.5. Parçacık boyutu 57
8.5.6. Piroliz ortamı 57
8.5.7. Katalizör 57
9. DENEYSEL ÇALIŞMA 58
9.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması 58
9.2. Penetrasyon Deneyi Sonuçları 58
9.3. Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları 60
9.4. Superpave Deney Sonuçları 62
9.4.1. Dinamik kesme reometresi (DSR) deney sonuçları 63

9.4.2. Kiriş eğilme reometresi (BBR) deney sonuçları 66
9.4.3. Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deney sonuçları 68
9.4.4. PG Sınıfının Belirlenmesi 70
9.5. Marshall Deneyinin Yapılması 71
9.5.1. Elek analizi ve her dane çapından gerekli oranda alınıp agrega numunelerinin hazırlanması 71
9.5.2. Agregaya katılacak bağlayıcı oranının tayini 74
9.5.3. Marshall test briketlerinin hazırlanması 75
9.5.4. Briket yüksekliklerinin ölçülmesi, havada ve sudaki ağırlıklarının bulunması 77
9.5.5. Marshall test cihazında stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesi ... 79
9.5.6. Orjinal ve modifiye bitümlerin marshall stabilite deneyi sonuçları 80
9.5.7. Optimum bağlayıcı oranının bulunması 81
10. SONUÇ ve ÖNERİLER 83
11. KAYNAKLAR 86
12. EKLER 91

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

r	Numune yarıçapı
P	Uygulanan sabit yük
Mı	Yaşlanmadan önceki ağırlığı
M2	Yaşlanmadan sonraki ağırlığı
L	Mesnetler arası mesafe
m	Sünme oranı
b	Kiriş uzunluğu
G*	Kompleks kayma modülü
h	Numune kalınlığı
S	Sünme sertliği
S(t)	t anında sünme sertliği
δ(t)	t anındaki yer değiştirme
δ	Faz açısı
Pd	d elek boyutundan geçen miktar
d	Herhangi bir elek boyutu
D	En büyük elek boyutunu
F	Filler miktarını
n	0.1 ile 0.7 arasında değişen sabit sayı

AASHTO	Amerikan devlet otoyolları ve resmi taşımacılık birliği
BBR	Kiriş eğilme reometresi
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
DSR	Dinamik kesme reometresi
DTT	Direkt çekme deneyi
EVA	Etilen vinil asetat
PAV	Basınçlı yaşlandırma
PG	Performans Derecesi
RTFOT	Dönel ince film halinde ısıtma deneyi
RV	Dönel viskozimetre
SBS	Polistiren ve polibütadien esaslı polimerler
SUPERPAVE	Yüksek performanslı asfalt kaplama
Vfb	Asfaltla dolu boşluk
VMA	Agregalar arası boşluk

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 4.1.	Zayıf taşıma kapasiteli taban zeminine bağlı tekerlek izi oluşumu	15
Şekil 4.2.	Zayıf bitümlü tabakaya bağlı tekerlek izi oluşumu	15
Şekil 4.3.	Blok çatlaklar	16
Şekil 4.4.	Timsah sırtı çatlaklar	16
Şekil 4.5.	Termal (enine) çatlaklar	16
Şekil 4.6.	Kenar çatlakları	16
Şekil 5.1.	Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması	19
Şekil 5.2.	Düktilite deneyi	28
Şekil 5.3.	Fraass kırılma noktası deneyi	29
Şekil 5.4.	Brookfield viskozimetresi	31
Şekil 5.5.	DSR Deneyinde Numunelere Uygulanan Deformasyon Yönleri	34
Şekil 5.6.	DTT deney aleti	36
Şekil 5.7.	DTT deneyine tabi tutulan bitümlü bağlayıcı	36
Şekil 9.1.	Penetrasyon deney aleti	59
Şekil 9.2.	Orijinal, lastik yağı ve lastik yağı+karbon siyahı katkılı bitümlü karışımın penetrasyon değerlerindeki değişim	60
Şekil 9.3.	Yumuşama noktası deney düzeneği	61
Şekil 9.4.	Orijinal, lastik yağı ve lastik yağı+karbon siyahı katkılı bitümlü karışımın yumuşama noktasındaki değerlerindeki değişim	62
Şekil 9.5.	Yaşlandırılmamış bağlayıcıların ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcıların G*/sinδ sınırındaki sıcaklık değerlerinin grafiksel olarak gösterimi	64
Şekil 9.6.	DSR deney aleti	65
Şekil 9.7.	BBR deney aleti	67
Şekil 9.8.	BBR deneyi kiriş numunesi	67
Şekil 9.9.	Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deney aleti	69
Şekil 9.10.	Marshall deney numunelerinin agrega granülometri eğrisi	72
Şekil 9.11.	Agrega elekleri ve eleme makinesi	73
Şekil 9.12.	Dane çaplarına göre sınıflandırılmış agregalar	73
Şekil 9.13.	Atık lastik yağı numunesi	74
Şekil 9.14.	Isıtma kabı ve sıcak karışım	75
Şekil 9.15.	Marshall briketi numune kapları	76
Şekil 9.16.	Marshall tokmağı	76
Şekil 9.17.	Marshall test briketleri	77
Şekil 9.18.	Marshall test briketlerinin yükseklik ölçümü	77
Şekil 9.19.	Marshall test briketlerinin havada ve suda ölçülmesi	78
Şekil 9.20.	Sıcak su havuzu	78
Şekil 9.21.	Marshall test cihazı	79

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1.1.	Avrupa ülkelerinde hurda lastiklerin kullanım oranları	3
Tablo 1.2.	ABD'de hurda lastiklerin kullanım oranları	3
Tablo 3.1.	Alt temel malzemesi gradasyon limitleri	10
Tablo 3.2.	Granüler temel tabakası gradasyon limitleri	11
Tablo 3.3.	Plent-miks temel tabakası gradasyon limitleri	11
Tablo 3.4.	Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel Tabakası Gradasyon Limitleri	12
Tablo 3.5.	Binder tabakası için gradasyon limitleri	13
Tablo 3.6.	Aşınma tabakası için gradasyon limitleri	13
Tablo 5.1.	Emülsiyon sınıfları	23
Tablo 5.2.	Yüksek performanslı asfalt kaplama (Superpave) bağlayıcı deneyleri	30
Tablo 5.3.	Yüksek performanslı asfalt kaplama (SUPERPAVE) bağlayıcı deneyleri performans özelikleri	30
Tablo 5.4.	Superpave bağlayıcı sınıfları	37
Tablo 7.1.	Modifiyeler ve değişiklik sağladığı özellikler	47
Tablo 8.1.	Biyokütle enerjisi dönüşüm süreçleri ve ürünleri	52
Tablo 8.2.	Piroliz ve sıvılaştırmanın özelliklerinin karsılaştırılması	54
Tablo 9.1.	Penetrasyon deneyi sonuçları	59
Tablo 9.2.	Bitümlü bağlayıcılar üzerine yapılan yumuşama noktası deney sonuçları	61
Tablo 9.3.	Yaşlandırılmamış bağlayıcıların ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcıların G*/sinδ sınırındaki sıcaklık değerleri	64
Tablo 9.4.	DSR deney sonuçları	66
Tablo 9.5.	Bağlayıcılarda RTFOT yöntemiyle yaşlandırılma sonrasında meydana gelen kütle kayıpları	69
Tablo 9.6.	Katkısız bitüm ve atık lastik yağı katkılı bitüm için belirlenen PG sınıflandırması	71

Tablo 9.7.	Marshall deney numunelerinin granülometri değerleri	72
Tablo 9.8.	Marshall deneyinde kullanılacak bağlayıcı miktarları	74
Tablo 9.9.	Orjinal ve modifiye bitümlerin Marshall stabilite ve akma değerleri	80
Tablo 9.10.	Asfalt betonu dizayn kriterleri	81
Tablo 9.11.	Asfalt karışım dizaynı için uyulması gereken kriterlerin sağlandığı bağlayıcı oranları	82
Tablo 10.1.	Tüm deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar	84

EKLER DİZİNİ

EK No	EK Adı	Sayfa No
EK-1	Marshall deneyinde orijinal bitüm kullanılmış numune boyutları ve ağırlıkları	92
EK-2	Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deney sonuçları	93
EK-3	Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Birim hacim ağırlık- Bitüm yüzdesi grafiği	94
EK-4	Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Boşluk oranı- Bitüm yüzdesi grafiği	95
EK-5	Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Stabilite- Bitüm yüzdesi grafiği	96
EK-6	Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Akma- Bitüm yüzdesi grafiği	97
EK-7	Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan VMA (Agregalar arası boşluk)- Bitüm yüzdesi grafiği	98
EK-8	Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Vfb (Asfaltla dolu boşluk)- Bitüm yüzdesi grafiği	99
EK-9	Marshall deneyinde atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numune boyutları ve ağırlıkları	100
EK-10	Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deney sonuçları	101
EK-11	Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Birim hacim ağırlık- Bitüm yüzdesi grafiği	102
EK-12	Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Boşluk oranı- Bitüm yüzdesi grafiği	103

EK-13	Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Stabilite- Bitüm yüzdesi grafiği	104
EK-14	Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Akma- Bitüm yüzdesi grafiği	105
EK-15	Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan VMA (Agregalar arası boşluk oranı)- Bitüm yüzdesi grafiği	106
EK-16	Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Vfb (Asfaltla dolu boşluk)- Bitüm yüzdesi grafiği	107

1. GİRİŞ

Tarihin en eski yol yapım malzemelerinden biri olan asfalt, geliştirilen teknik özellikleri ile yüksek performanslı, uzun ömürlü, güvenilir ve çevre ile uyumlu yolların yapımına imkân tanımaktadır. Bugün Amerika'da 3.63 milyon km, uzunluğundaki kaplamalı yolların %94'ü, Avrupa'nın en gelişmiş ülkelerinden biri olan Almanya'da ise, 130.000 km'lik devlet yolunun tamamı 12.000 km uzunluğundaki otoyolların %72'si asfalt kaplamalı olup, ağır ve hafif trafikli yollarda soğuk ve sıcak olarak hazırlanan karışım olanakları ve çeşitli yüzey kaplama tipleri ile asfalt, tüm dünyada yol kaplamasında en yaygın olarak kullanılan kaplama malzemesidir.

Esnek üstyapıların çoğunluğunda geleneksel bitümlü malzemeler istenen düzeyde performans sağlamaktadır. Bununla birlikte, yollar ile ilgili istekler de her yıl artış göstermektedir. Her geçen gün ticari araç sayısı ile yola etkiyen dingil ağırlıklarında bir artış gözlenmekte olup tekerlek izi oluşumu, yığılma ve oluklaşma gibi kalıcı deformasyonların oluşmasına sebep olmaktadır. Karayolu mühendisinin bu artan sorunlarla başa çıkabilmesi için asfaltın performansını artırması gerekmektedir.

Katı atıklar çevresel kirlilik yaratmanın yanında insan sağlığını da ciddi anlamda tehdit etmektedirler. Gelişmiş ülkeler katı atıkları bertaraf etme çalışmaları doğrultusunda "Ar&Ge" yatırımlarına önemli maddi destek sağlayarak çevresel kirliliği önleme ve ülke ekonomilerine pozitif kazanım sağlama amacıyla geri dönüşüm projelerine büyük önem vermektedirler.

Katı atıklar akla 'evsel çöp' kavramını getirse de bugünün dünyasında 'atık lastikler' sözcüğü gerek kirlettiği alan gerekse bertaraf edilmesindeki zorluklardan dolayı en acil önlem alınması gereken 'çöp' anlamını taşır. Patlamış, eskimiş, hatalı üretilmiş bütün lastikler ömrünü tamamlamış lastikler kapsamına girer ve; yanıcılığı, büyük ebatlarda olup çok yer kaplamasından dolayı hacmi, zehirli yapısı, belli bir toplama alanı olmaması sebeplerinden ötürü dikkate alınması gereken tehlikeli atıklardır.

Piroliz Sisteminde;

- %100 lastik geri dönüşümü sağlanır. Geride hiçbir atık bırakılmaz.
- Proseste hiçbir kimyasal katkı maddesi kullanılmaz. Dolayısıyla çevre dostudur.
- Proses süreci ve sonucunda toprak, hava ve su kirliliği oluşmamaktadır.
- Katma değer yaratır. Elde edilen ürünlerin tamamı piyasa değeri olan sanayi hammaddeleridir.

Geri kazanılmış otomobil lastikleri granülür vaziyette kullanılarak deformasyona karşı dirençte bir iyileşme sağlanabilmektedir. Lastiğin yapısında %34 Doğal kauçuk, %19 Karbon karası, % 18 çelik tel, % 14 çeşitli kimyasallar, % 9 Sentetik kauçuk, % 4 silika ve % 2 oranında yağlar bulunur. Lastiğin büyük bir kısmını oluşturan doğal kauçuk ve sentetik kauçuğun en önemli özelliği yüksek bir elastikiyete sahip olması, yani yeniden eski haline dönebilen bir uzayabilirliğinin olmasıdır. Kauçuklar bitümlü karışımların hem deformasyona direnç, hem de yorulma özelliklerini iyileştirmektedir.

A.B.D.'de araba sahipleri her yıl ortalama 300 milyon lastiği elden çıkarmaktadır. Yani yaklaşık A.B.D.'de her insana bir lastik düşmektedir. Bu lastiklerin 50 milyonu yeniden kaplanmakta veya yeniden kullanılmaktadır. Kalan yaklaşık yıllık 250 milyon hurda lastik kullanılmak için beklemektedir. Bu lastiklerin %85'i otomobil lastiğiyken, geri kalanı kamyon lastiğidir. Bu hurda lastiklerin sayısı yıllar geçtikçe artmaktadır. 3 milyar yığılmış, biriktirilmiş hurda lastiğin olduğu tahmin edilmektedir. Bu hurda lastikler, geniş açık hava depolarında biriktirilmektedir. Bu depolar çevre sağlığını tehdit etmektedir. Ayrıca bu hurda lastik yığınları yangın tehlikesi de oluşturmaktadırlar. Lastikler hurda haline geldiğinde atılmaları, uygun bir işlemle bertaraf edilmeleri zorunludur (Limbachiya ve Roberts, 2004).

Lastik Sanayicileri Derneği (LASDER) verilerine göre her yıl Türkiye'de yaklaşık 180.000 ton ömrünü tamamlamış lastik ortaya çıkmaktadır. Bu verilere göre atık lastiklerin ne kadar önemli bir çevresel sorun olduğu görülmektedir.

Avrupa ülkelerindeki ve ABD'de yapılan istatistikler sonucu son yıllarda hurda lastiklerin kullanım alanları Tablo 1.1 ve Tablo 1.2'de görülmektedir (Limbachiya ve Roberts, 2004).

Tablo 1.1. Avrupa ülkelerinde hurda lastiklerin kullanım oranları

Depolama	Tekrar Kullanma/İhracat	Yeniden Kaplama	Geri Kazanma	Enerji Ede edilmesi
%35	%23	%11	%21	%10

Tablo 1.2. ABD'de hurda lastiklerin kullanım oranları

Depolama	Öğütülmüş Kauçuk	İhracat	Enerji Ede edilmesi	Diğer Uygulamalar	İnşaat
%10	%12	%5	%41	%18	%14

Bu tezin deneysel çalışmaları için kullanılan katkı maddelerini temin ettiğimiz En-tek isimli firma, yaptığı piroliz işlemi sonucunda atık lastikten %35-%42 yağ, %35-%45 karbon siyahı , %12-%15 atık çelik tel, %7-%12 gaz elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Üretici firma pirolizle elde edilen atık yağın ısı üretmek amacıyla brülörlerde ve dizel motorlarda yakılarak enerjiye dönüştürülebileceği görüşündedir.

Hurda lastiklerin geri dönüşümü ile elde edilen ile karbon siyahının kullanıldığı değişik sanayi kollarından bazıları aşağıda belirtilmiştir.

- Kablo
- Taşıyıcı bantlar
- Hortum, paspas
- Siyah poşet
- Araba yedek parçaları
- Isı yalıtım malzemeleri
- Kauçuk malzemelerde boya maddesi
- Taban malzemesi
- Plastik

Piroliz işlemi esnasında yoğunlaştırılamayan gazlar geri dönüşüm firmasına göre;

- Kalori değeri olarak doğal gazdan daha üstündür.
- Uygun şartlarda depolanabilmesi halinde doğal gaz ve propan yerine kullanılabilir.
- Elektrik ve ısı üretmek amacıyla brülörlerde yakılabilir.
- Sistemden ortalama 7%-8% gaz üretilmesi (10 ton atık lastik/gün işleme kapasitesinde) takribi 900-1000 m^3/gün gaz çıkmasına sağlar ki değerlendirilmesi durumunda ciddi bir enerji potansiyeli yaratır.

Son ürün olarak ortaya çıkan hurda telden çelik tel elde edilmektedir. Preslenerek satışa hazır hale getirilen hurda çelik tel, hurdacılara ve haddehanelere satılmaktadır

Tüpraş'tan alınan 2008 yılı verilerine göre ülkemizde 2.260.000 ton bitüm üretilmiştir. Bu üretimin yaklaşık %50'si 1.130.000 ton bitüm asfaltta kullanılmıştır. Ekonomik kıyaslama için SBS modifiye katkısı göz önüne alındığında bu katkı bitüme ağırlıkça %5 kadar eklenecektir. SBS'nin ton fiyatı 3500 $ dır.

1.130.000 × 0,05=56.500 ton modifiye malzemesi

56.500×3500$=197.750.000$ civarlarında bir bedelle modifiye malzemesi alınmaktadır.

Bu çalışma ile hurda lastiklerden piroliz yöntemiyle elde edilmiş atık yağın ve karbon siyahının bitümle karıştırılmasıyla oluşan modifiye edilmiş bağlayıcının özellikleri incelenecektir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

İngiltere'de yapılan çalışmada da çok ince parçalanmış Wellington Rubber Şirketi tarafından sağlanan vulkanize otomobil lastiği kullanılmıştır. Lastik parçacıklarının asfalt betonunun yorulma dayanımına etkisini incelemek için ağırlıkça %2 ve 5 oranında lastik 50 ve 100 penetrasyon bitüme ayrı ayrı 160ºC'de karıştırılmıştır. Karışım yarım saat içinde tamamlanmıştır. Öğütülmüş otomobil lastiğiyle modifiye edilmiş bitümlere kuru sıkıştırma deneyi, önceden belirlenen agregalar karıştırılarak oluşturulan asfalt betonuna ise yorulma deneyi yapılmıştır. Yorulma süresinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. % 5 oranında küçük bir katkı, 50 penetrasyon bitüm için yorulma süresini 2 kat arttırmıştır. 100 penetrasyon bitümle yapılan modifikasyon sonucunda ise yorulma süresinin 23 kat arttığı gözlenmiştir (Çelik, 2000).

1984 yılında Esch altı adet kauçuk katkılı kaplama kesitlerini incelemiştir. Bu kesitlerin toplam uzunluğu 3,4 mildir ve 1979-1983 yılları arasında yapılmıştır. Bu projelerde Plusride (kuru) işlemi kullanılarak iri kauçuk parçaları %3-4 oranında sıcak bitümlü karışıma eklenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda, kauçuk katkılı kaplamaların yorulma davranışının normal bitümlü karışımlardan 10 kat daha iyi olduğu gözlenmiştir (Esch, 1982)

Colin A. Franco (2005), "P.E. New England Rubber- ModifiedAsphalt and Civil Engineering" isimli çalışmasında lastik kırıntılarını sıcak bitümle karıştırıp, çatlamış asfalta enjekte ederek asfalt tamiri yapmıştır.

Weidong Cao (2006), "Study On Properties of Recycled Tire Rubber Modified Asphalt Mixtures Using Dry Process" isimli çalışmasında atık lastiklerin neden olduğu kirliliği en aza indirmek ve asfalt karışımlarının özelliklerini geliştirmek için, geri kazanılmış oto lastiği kauçuğu ile kuru yöntem kullanılarak modifiye edilmiş asfalt karışımlarının özellikleri laboratuarda incelenmiştir. Farklı kauçuk içeriğine sahip (toplam karışım ağırlığının %1, %2 ve %3'ü) üç tip asfalt karışımı ve kauçuk içermeyen bir kontrol karışımı üzerinde testler uygulanmıştır. Tekerlek izi oluşumu testleri (600°C), endirekt çekme testleri (-10°C) ve varyans

analizlerinin sonuçlarına göre, asfalt karışımlarına geri kazanılmış lastik kauçuğunun kuru yöntem kullanılarak eklenmesi asfalt karışımlarının mühendislik özelliklerini geliştirebilmektedir ve kauçuk içeriğinin yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyona ve düşük sıcaklıklarda çatlamaya karşı direncin performansı üzerinde önemli etkisi vardır sonucuna ulaşmıştır.

Mehmet Tahir Deniz ve arkadaşları "Kullanılmış Otomobil Lastiklerinin Bitümlü Sıcak Karışım Performansına Etkisi" isimli çalışmalarında, kullanılmış otomobil lastiği katkılı karışımlarla yapılan kaplamaların geleneksel karışımlarla yapılan asfalt kaplamalara göre daha elastik olduğunu ve düşük sıcaklık nedeniyle meydana gelebilecek çatlak oluşumu potansiyeline karşı direnimi arttırdığını, kullanılmış otomobil lastiklerinin bitümlü sıcak karışıma katılabilecek en uygun oranın %0.5 olduğunu, soğuk iklimlerin hakim olduğu bölgelerde düşük ısı çatlaklarına ve tekerlek izine karşı daha dirençli olduğunu tespit etmişlerdir.

McDonald, 85–100 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcının içerisine bağlayıcı ağırlığının %33'ü kadar vulkanize(biçim alması ve geniş bir sıcaklık aralığında dayanıklılık göstermesi için ham kauçuğun kükürtle birleştirilmesi işlemi) edilmiş lastik parçalarını katmıştır. Lastik katkılı bağlayıcı 215ºC'ye kadar ısıtılıp, jel kıvamına gelinceye kadar karıştırma işlemi sürdürülmüştür.

Limbachiya ve arkadaşları (2004), "Used/Post-Consumer Tyres, Thomas Telford Publish" isimli çalışmalarında lastik parçaları ilave edilen kaplamaların, geleneksel asfalt beton kaplamalarına göre daha elastik olduğunu gözlemişlerdir. İlave edilen lastik parçalarının don kabarması sonucu oluşan çatlama potansiyelini en aza indirdiğini, sıcaklığın etkisiyle kaplamanın yumuşamasını ve genleşmeyi minimuma indirip kaplamanın bozulmasını önlediğini, normal asfalt kaplamalarından daha az kalınlık ve maliyete yapılabileceği sonucuna varmışlardır.

3. YOL ÜSTYAPILARI

Karayolu, önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak saptanmış olan bir güzergâh boyunca, doğal zeminin istenilen yükseltilere getirilmesi ve üzerinde motorlu taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi amacıyla inşa edilen yapıların tümü olarak tanımlanabilir. Karayolu, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır (Ilıcalı ve ark. 2001).

3.1. Altyapı

Tesviye sathıyla doğal zemin çizgisi arasındaki imalata ‘altyapı’ adı verilir. Altyapı; yolun dolgu kesimlerinde, dışarıdan getirilen toprakla oluşturulmuş bir toprak gövde, yarma kesimlerinde ise doğal zemindir. Köprü, viyadük, tünel, menfez ve istinat duvarı gibi sanat yapıları da altyapı sınıfına girer. Altyapı üstyapı tarafından iletilen yükleri geniş bir alana yayar ve belli bir kotta düzgün bir satıh sağlar. Altyapının işlevini görebilmesi için yeterli mukavemette olması gerekir. Altyapı imal edilirken bitkisel toprak, çürük zemin ve sıkıştırılmaya elverişli olmayan zeminler kullanılmamalıdır.

3.2. Üstyapı

Trafik yüklerini taşımak ve doğacak gerilmeleri zemine dağıtmak üzere alt yapı üzerine granürler malzeme serilmesi ile elde edilen taşıyıcı tabakaya ‘üst yapı’ denir. Alttemel, temel ve kaplamalardan oluşan tabakalı yol yapısıdır.

Kaplama, taşıtlara uygun bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak, trafiğin aşındırma etkilerine karşı koymak ve yapıya sızan yüzeysel su miktarlarını ve temel tabakasına iletilen kayma gerilimlerini azaltmak amacı ile temel tabakası üzerine inşa edilen bir tabakadır. Kaplama altındaki temel tabakası, bağlayıcısız ya da bir bağlayıcı madde ile işlem görmüş olan belirli granülometrideki malzemelerden oluşturulur. Ana görevi, üstyapının yük taşıma kabiliyetini artırmaktır. Ayrıca, trafik hareketlerinden doğan yüksek kayma gerilmelerine karşı koyabilecek, drenaja yardımcı olabilecek ve don olaylarına karşıda koruma sağlayabilecek özelliklere sahip olmalıdır. Alttemel ise, trafik yüklerinin taban üzerine yayılmasını sağlamak, ince taneli altyapıların temel tabakasına nüfuz etmesini önlemek ayrıca su ve don tesirlerine karşı direnim sağlamak, tampon bölge görevi yapmak amacı ile tesviye yüzeyi üzerine serilen tabakadır (Umar ve ark. 1985)

3.2.1. Üstyapı tipleri

Üstyapılar, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin türlerine, özelliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit, yarı rijit ve esnek üstyapı olarak üç ana gruba ayrılmaktadır.

3.2.1.1 Rijit üstyapı

Rijit üstyapılar taban zemini üzerine serilmiş granüler alttemel ve/veya temel üzerine grobeton ve onun üzerine de donatılı veya donatısız beton plakalardan oluşur.

3.2.1.2 Yarı rijit üstyapı

Yarı rijit üstyapılarda, esnek üstyapılardan farklı olarak granüler temel veya alttemel yerine çimento bağlayıcılı granüler temel veya çimento ile stabilize edilmiş alttemel kullanılır. Bu tabakaların üzerine sırasıyla bitümlü temel, asfalt betonu

binder ve aşınma tabakaları serilir. Türkiye 'de dizayn trafik değerleri çok yüksek olan devlet ve otoyollarında bu tür üstyapılar kullanılmaktadır (Önalp ve ark. 1993).

3.2.1.3 Esnek üstyapı

Esnek üstyapılar taban zemini üzerine serilmiş granüler alttemel ve temel tabakaları üzerine bitümlü kaplamaların serilmesi şeklinde inşa edilirler. Esnek üstyapı, tesviye sathı ile sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini, kaplama, temel ve alttemel tabakaları yolu ile tabii zemine dağıtan bir üstyapı şekli olup, stabilitesi, adezyon, tane sürtünmesi ve kohezyon gibi faktörlere bağlıdır. Esnek üstyapı belirli özelliklere sahip malzemelerden oluşmuş bir seri tabakayı içerir. Tabaka kalınlıkları tabanın taşıma gücü ve trafik yüklerine bağlı olarak hesaplanır (Önalp ve ark. 1982).

3.2.1.3.1. Esnek üstyapı tabakaları

a. Üstyapı Tabanı

Yol üstyapısı ve banketlerin oturduğu altyapı zeminin üst yüzeyi olan tesviye yüzeyi altında kalan, yarma veya dolgularda üstyapının taşıma gücüne etkisi olabilecek bir derinliğe kadar (25~85 cm) devam eden tabakadır. Üstyapı tabanı; sıkıştırılmış taban zemininden, kimyasal maddelerle stabilizasyon yapılmış taban zemini veya granüler malzemeden, kırma taş veya çakıl gibi doğal granüler malzemelerden oluşabilmektedir. Kullanılan malzeme çeşidi ne olursa olsun, kaplama ömrü boyunca olduğu gibi yapım sırasında da taban yeterli sertliğe sahip olmalıdır.

b. Alttemel

Temel tabakasını taşımak üzere taban üzerine yerleştirilen, belirli fiziksel özelliklere sahip malzemeden oluşmuş bir üstyapı tabakasıdır.

Alt temel tabakası, Tablo 3.1'de belirtilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin su ile karıştırılarak, ince tesviyesi tamamlanmış dolgu ve yarmadan oluşan üstyapı tabanı üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde, projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulur.

Tablo 3.1. Alt temel malzemesi gradasyon limitleri

Elek Açıklığı		**TİP-A %**	**TİP-B %**
mm	**inç**	**Geçen**	**Geçen**
75	3	100	-
50	2	-	100
37,5	1 1/2	85 - 100	80 - 100
25	1	-	60 - 90
19	3/4	70 - 100	-
9,5	3/8	45 - 80	30 - 70
4,75	No.4	30 - 75	25 - 60
2	No.10	-	15 - 40
0,425	No.40	10 - 25	10 - 20
0,075	No.200	0 - 12	0 - 12

c. Temel

Alttemel üzerine hesaplanan bir kalınlıkta inşa edilen, belirli fiziksel özelliklere sahip malzeme ile oluşturulan iyi bir drenaj sağlamak, don etkisini azaltmak gibi fonksiyonları olan bir üstyapı tabakasıdır. Temel ve alttemelin ana görevi, yüzeye uygulanan yükleri kendi içinde dağıtmak ve bu şekilde tabanda kesme ve oturma deformasyonlarının oluşmasını önlemektir. Karayollarında üç farklı temel tipi uygulanmaktadır.

- **Granüler Temel**

Granüler temel malzemesinin 4.75 mm elek üzerinde kalan kısmının ağırlıkça en az %50'sinin iki veya daha fazla yüzü kırılmış olacaktır. Malzemenin 0.075 mm eleği geçen kısmı, 0.425 mm eleği geçen kısmının 2/3'ünden fazla olmayacaktır. Granüler temel tabakasına ait gradasyon limitleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Granüler temel tabakası gradasyon limitleri

Elek Açıklığı		**% Geçen Miktar**		
Mm	**inç**	**A**	**B**	**C**
50	2	100		
37.50	1 1/2	80 - 100	100	
25	1	60 - 90	70-100	100
19	3/4	-	60 - 92	75 - 100
9.5	3/8	30 - 70	40 - 75	50 - 85
4.75	No.4	25 - 55	30 - 60	35 - 65
2.00	No.10	15 - 40	20 - 45	25 - 50
0.425	No.40	8 - 20	10 - 25	12 - 30
0.075	No.200	2 - 8	0 - 12	0 - 12

- **Plent-Miks Temel**

Plentmiks temel tabakası kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzeme kullanılarak Tablo 3.3'de verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde kaba ve ince olmak üzere en az üç ayrı tane boyutu grubunun uygun oranda suyla bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan malzemenin bir veya birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır.

Tablo 3.3. Plent-miks temel tabakası gradasyon limitleri

Elek Açıklığı		**% Geçen Miktar**	
Mm	**inç**	**Tip - I**	**Tip- II**
37.50	1 1/2	80 - 100	100
25	1	60 - 90	70-100
19	3/4	-	60 - 92
9.5	3/8	30 - 70	40 - 75
4.75	No.4	25 - 55	30 - 60
2.00	No.10	15 - 40	20 - 45
0.425	No.40	8 - 20	10 - 25
0.075	No.200	2 - 8	0 - 12

- **Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel**

Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırma taş ve ince malzeme kullanılarak Tablo 3.4'de verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanır. Malzemenin uygun oranlarda çimento ve su ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan karışımın bir veya birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır.

Tablo 3.4. Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel Tabakası Gradasyon Limitleri

Elek Açıklığı		**% Geçen Miktar**
mm	**inç**	
37.5	1 %	100
25	1	72 - 100
19	3/4	60 - 92
9.5	3/8	40 - 75
4.75	No.4	30 - 60
2.00	No.10	20 - 45
0.425	No.40	8 - 25
0.075	No.200	0 - 10

d. Kaplama Tabakası

Üstyapının en üst tabakası olup, genellikle; asfalt betonu veya sathi kaplama olarak inşa edilir. Ana işlevi, trafik yüklerini taşımak, kaymaya, trafiğin aşındırma ve iklim koşullarının ayrıştırıcı etkisine karşı koymak, seyahat konforu ve su yalıtımı sağlamaktır. Kaplama tabakaları yüzeysel kaplamalar, bitümlü sıcak karışımlar ve taş mastik asfalt kaplamaları olarak sınıflandırılmaktadır. (Cüre ve ark. 2005)

- **Yüzeysel Kaplamalar**

Yüzeysel kaplamalar, yol yüzeyine ince bir film halinde asfalt veya katran veya her ikisinin karışımını serip bunun üzerine de tabaka halinde agrega örterek yapılan kaplama şeklidir. Yüzeysel kaplamaların yapımı kolay ve ucuzdur. Kaplamanın uzun ömürlü olabilmesi için gereken kontroller iyi yapılmalıdır.

- **Bitümlü Sıcak Karışım Kaplamaları (Asfalt Betonu)**

Asfalt betonu aşınma tabakasını, binder tabakasını veya bunların her ikisini birden kapsar. Karışımın agrega gradasyonu binder tabakası için Tablo 3.5'de, aşınma tabakası için de Tablo 3.6'da verilmiştir.

Kaba agrega; kırma taş, kırma çakıl veya bunların karışımından oluşacaktır. Kaba agrega taneleri kübik ve keskin köşeli olacaktır. Soyulmaya karşı mukavemeti en az %50 olacaktır. İnce agrega temiz, sağlam ve dayanıklı olacaktır.

Tablo 3.5. Binder tabakası için gradasyon limitleri

Elek Açıklığı		**% Geçen Miktar**
Mm	**inç**	
25	1	100
19	3/4	80 - 100
12.50	1/2"	58 - 80
9.5	3/8	48 - 70
4.75	No.4	30 - 52
2.00	No.10	20 - 40
0.425	No.40	8 - 22
0.180	No.80	5 - 14
0.075	No.200	2 - 7

Tablo 3.6. Aşınma Tabakası için Gradasyon Limitleri

Elek Açıklığı		**% Geçen Miktar**	
Mm	**inç**	**Tip - I**	**Tip- II**
19	3/4	100	-
12.50		83 - 100	100
9.5	3/8	70 - 90	80 -100
4.75	No.4	40 - 55	55 -72
2.00	No.10	25 - 38	36 -53
0.425	No.40	10 - 20	16 - 28
0.180	No.80	6 -15	8 -16
0.075	No.200	4 -10	4 -10

Mineral filler, tamamı 0.425 mm elekten geçip, ağırlıkça en az % 70'i 0.075 mm elekten geçen malzeme olarak tanımlanmaktadır.

Bu üç grup malzemenin her biri bitümlü karışımın ayrı ayrı özelliklerini kontrol eder (Ilıcalı ve ark. 2001).

4. ASFALT BETONU KAPLAMALARDA MEYDANA GELEN BOZULMALAR

Asfalt kaplamalardaki bozulmaları kalıcı deformasyonlar, çatlaklar ve ayrışmalar olarak üç ana grupta toplamak mümkündür. Bu bozulmaların genel nedenleri ise temel, alttemel ve taban zeminin taşıma gücü yetersizliği, trafiğin bozucu etkileri, iklim koşulları ve asfalt betonunun özellikleri olarak sıralayabiliriz.

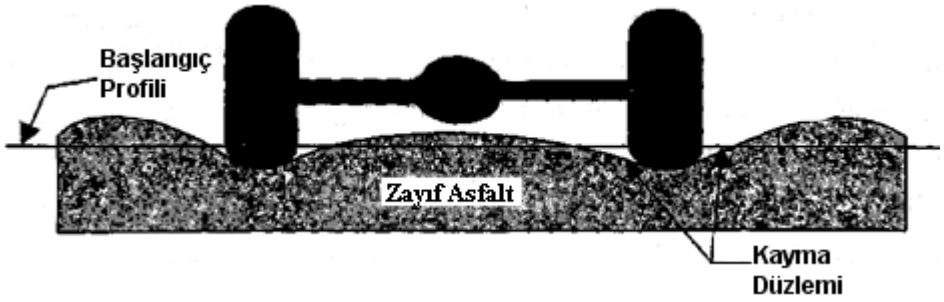
4.1. Kalıcı Deformasyonlar

Karayollarımızda en sık görülen bozulmalardan biri olan kalıcı deformasyon, genel anlamda, kaplama yüzeyinin orijinal kotuna göre değişikliğe uğramasıdır.

Kalıcı deformasyon, alt tabakaların (temel, alt temel ve taban) hareketlerine bağlı olabildiği gibi (Şekil 4.1), asfalt beton kaplamasının stabilitesinin yetersizliğinden de oluşabilmektedir (Şekil 4.2). Yük altında meydana gelen deformasyonlar, geçici (elastik) deformasyonlar ve kalıcı (plastik) deformasyonlar olmak üzere ikiye ayrılır. Stabilite yüksek olduğu sürece toplam deformasyon az olduğu gibi bu deformasyonun geçici kısmı fazla, kalıcı kısmı çok azdır. Stabilitenin düşük olması durumunda ise durum tersinedir. Sadece kalıcı deformasyonların oluşması halinde ise stabiliteden söz edilemez. Yüksek sıcaklıklar asfaltın termoplastik özelliklerinden dolayı stabiliteyi düşürür. Yük tekrarı kalıcı deformasyonların artmasına neden olur. Yani, kalıcı deformasyonların sıcaklık etkisi ve yük tekrarı şekil değiştirmeye sebep olur (Umar ve ark. 1985).



Şekil 4. 1. Zayıf taşıma kapasiteli taban zeminine bağlı tekerlek izi oluşumu



Şekil 4. 2 Zayıf bitümlü tabakaya bağlı tekerlek izi oluşumu

4.2. Çatlamalar

Esnek kaplamalarda en sık rastlanan ve kaplamanın performansını azaltan olumsuz etkilerden biriside çatlakların sebep olduğu bozulmalardır. Esnek kaplamalarda görülen başlıca çatlak türleri yorulma çatlakları ve termal çatlaklardır. Tekrarlı ağır trafik yüklerinin ve taşıtların ani hızlanma ve yavaşlamalarının sebep olduğu yorulma çatlakları, ilk olarak blok çatlaklar (Şekil 4.3) ve daha ileri safhasında da timsah sırtı çatlaklar (Şekil 4.4) olarak karşımıza çıkar. Termal çatlaklar ise, soğuk bölgelerde kaplamanın büzülmesi sebebiyle yolda enine olarak görülen çatlaklardır (Şekil 4.5). Diğer bir çatlak tipide, kaplama kenarından yaklaşık 30 cm içerde ve yol eksenine paralel olarak oluşan kenar çatlaklarıdır (Şekil 4.6). Genellikle banketlerin yeteri kadar yanal destek sağlamadığı kesimlerde görülür. Kenar çatlakları, drenaj yetersizliği, don, üstyapı ile banket arasında büyük nem farkı bulunması (banketlerin aniden kuruması) nedeni ile de oluşabilir. Asfalt ve diğer malzemelerde meydana gelen çatlak oluşumunu üç safhadan oluşur. Birinci safhada,

malzeme içerisinde mikro çatlaklar oluşur, ikinci safhada bu çatlakların bazıları yayılarak makro çatlaklar meydana getirir, son safhada ise makro çatlaklar yayılarak asfalt kaplamalarda kırılmalara sebep olur (Umar ve ark. 1985).



Şekil 4. 3.Blok çatlaklar



Şekil 4. 4.Timsah sırtı çatlaklar



Şekil 4.5. Termal (enine) çatlaklar



Şekil 4.6. Kenar çatlakları

4.3. Ayrışmalar

Agrega danelerinin iklim ve trafiğin mekanik etkisi ile kaplamadan koparak ayrılmasıdır. Ayrışma, asfalt betonu kaplamalı karayollarında çok sık görülen bir bozulmadır. Ayrışma olayı zamanla artar. Kaplamanın ömrünü kısaltır ve yolun seyir konforuyla seyir güvenliğini azaltır. Başlıca ayrışma tipleri aşağıda verilmiştir.

4.3.1 Folluk tipi oyuklar

25-75 cm çapında dairesel, folluğu andıran oyuklardır. Bağlayıcının mekanik etkiyle kopması, karışımın kötü kalitede olması, yüzey tabakasının ince olması, granüler alttemel ve temele tabandan kil yükselmesi, drenaj yetersizliği, bu tip bozulmaların oluşumunda önemli rol oynar.

Folluk tipi oyuklar kaliteli bağlayıcı ve karışım kullanılması, trafiğin gerektirdiği üstyapının inşası, drenaj, özenli yapım ve özellikle yeterli sıkıştırma ile önlenebilir (Ağar ve ark. 1985).

4.3.2 Sökülmeler

Kaplamada kenardan içe doğru ya da yüzeyden alta doğru agregaların zamanla yüzeyden koparak ayrılma olayıdır.

4.3.2.1 Tabaka halinde sökülmeler

Yüzey tabakasının ince olması, alt tabaka ile yüzey tabakası arasında yapıştırma tabakası kullanılmaması ve yapıştırmanın yetersiz olması nedeni ile oluşan bozulmalardır. Daha ziyade derz çatlakları civarında oluşur (Ağar ve ark. 1985).

4.3.2.2 Soyulma

Agrega danelerini saran ince asfalt filminin su, kil ve trafiğin mekanik etkisi ile agregadan ayrılması ve dolayısıyla agrega danelerinin çıplak kalması durumudur.

4.3.2.3 Cilalanma

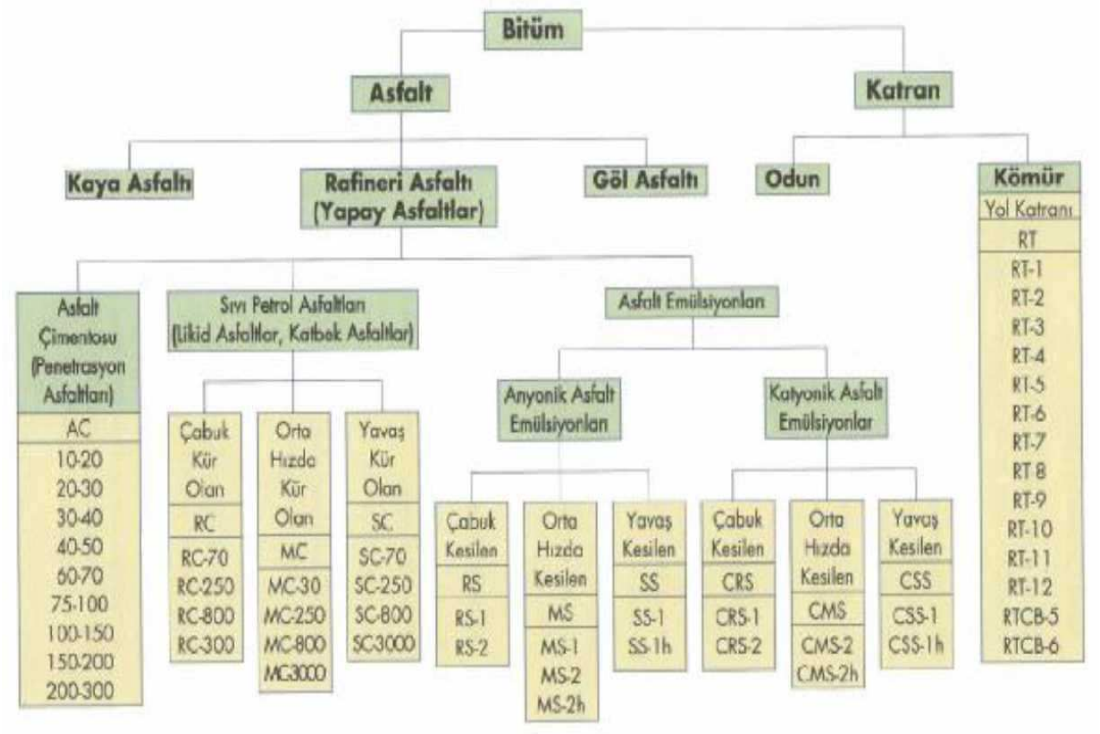
Agregaların aşınarak pürüzlülüklerini kaybetmesidir. Yumuşak karakterli kayaçlardan elde edilen agregalar, önceleri kaplamada pürüzlü ve köşeli olsalar dahi taşıtlardan dolayı oluşan aşınma etkisiyle pürüzlülüklerini kaybederler. Yağış olduğu zaman da bu yollarda sürüş güvenliğinde büyük zafiyetlere neden olur.

4.3.2.4 Kusma

Karışım içindeki asfaltın sıcaklık etkisi ile yükselerek yüzeye çıkması yüzeyde oldukça kalın bir asfalt filmi oluşturması durumudur. Kusma sonucu sürtünme katsayısı düşmektedir. Kusma bazen de yeterli bitüm oranına sahip kaplamalarda çok ağır dingil yükleri altında da oluşabilmektedir. Bunun sebebi karışımdaki boşluk yüzdesinin az olmasından dolayı sıcakla beraber genleşen asfaltın yerleşecek boşluk bulamadan dışarıya çıkmasıdır.

5. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR

Yol inşaatında kullanılan bitümlü malzeme temel olarak bitümden oluşmaktadır. Bitüm, doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da pirojenik kökenli (doğal, ısı etkisiyle olu şan) hidrokarbonların bir karışımı ya da bunların her ikisinin bir kombinasyonu olup çoğunlukla bunların gaz, sıvı, yarı katı veya katı halde olabilen, metal dışı türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbondisülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanır. Bitüm kısaca, bitümlü kaplamaların yapımında kullanılmak üzere kıvamlılık ve kalitesi bakımından özel olarak hazırlanmış olan yumuşatılmış veya yumuşatılmamış bir bağlayıcı olarak tanımlanabilir. Yol üstyapısında kullanılan bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması Şekil 5.1'de verilmiştir (Bitüm El Kitabı 2002).



Şekil 5.1. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması

5.1 Asfalt

En eski mühendislik malzemelerinden biri olan asfalt, doğal halde bulunan ya da ham petrolün damıtılması sırasında elde edilen, rengi koyu kahverengiden siyaha kadar değişebilen, katı, yarı katı ve sıvı halde olabilen kuvvetli bağlayıcı özelliğe sahip hidrokarbonlardan oluşan bağlayıcı bir maddedir. Asfaltlar, kökenlerine göre doğal asfaltlar ve yapay (rafineri) asfaltlar olmak üzere iki gruba ayrılabilirler.

Doğal asfaltlar doğada genellikle mineral maddelerle karışık halde bulunurlar. Kullanılabilir hale getirmek için bir takım işlemlerden geçirmek gerekir. Doğal asfaltlar, jeolojik kuvvetlerin tesiriyle petrolden oluşurlar ve genellikle mineral agrega ile karışık halde olurlar. Doğal asfaltlar kaya asfaltı ve göl asfaltı gibi sınıflara ayrılırlar.

Kaya asfaltı oldukça gözenekli kalkerin, daha seyrek olarak da kum taşının doğal olarak asfaltı emmesinden oluşur. Mineral madde oranı genellikle malzemenin % 90'ını oluşturur, bitüm oranı da % 10 kadardır. Memleketimizde bulunan kaya asfaltları daha çok kum taşı, kalker, kil gibi mineral maddeler ile % 2~12 civarında asfaltın karışımından oluşmaktadır.

Göl asfaltı, doğal asfaltın en geniş çapta kullanılan ve en çok bilinen şeklidir. Mineral malzemenin çok ince daneler halinde bitüm ortamı içinde yayılmış durumdaki asfalt tipidir. Yüzey birikintileri halinde bulunur ve bunların en önemlisi Trinidad göl asfaltıdır. Göldeki malzeme yarı katı bir bitüm ile ince mineral agreganın çok iyi bir karışımıdır. Buradan elde edilen asfalt tipik olarak aşağıdaki bileşime sahiptir:

- Bağlayıcı madde % 54
- Mineral madde % 36
- Organik madde % 10

Çok sert olduğu için uygun bir yumuşatıcı karıştırılarak yol yapımında kullanılabilir.

Yapay asfaltlar, ham petrolün damıtılmasıyla elde edilirler. Bu asfaltlara rafineri asfaltları da denir. Petrol kuyularından çıkarılan ham petrol rafineriye gelir. Buradan pompalarla tanklara boşaltılır. Oradan ısıtma kulelerine sevk edilerek sıcaklığı yükseltilen ham petrol daha sonra damıtma kulelerine gelir. Kolay uçucu olan kısımlar bu kulelerin üst kısmından çıkar ve soğutucularda yoğunlaşarak ayrılır. Bunlar hafif damıtıkları teşkil ederler. Daha az uçucu olanlar aynı şekilde orta damıtıkları, en ağır uçanlar ise ağır damıtıkları oluştururlar. Başlıca asfalt içeren kalıntı maddeleri ise kulenin dibinde birikir. Böylece ham petrolden beş farklı ürün elde edilmiş olur.

a. Benzin (gazolin)

b. Gazyağı (kerosen)

c. Dizel yağlar (mazot)

d. Yağlama yağları

e. Ağır kalıntı maddeleri

Elde edilen bu ürünlerin hepsine gerektiğinde tekrar damıtma işlemi uygulanarak daha değişik petrol ürünleri elde edilebilir (İsfalt A.Ş 2002).

5.1.1 Asfalt çimentoları (AC)

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

Yol üstyapılarında kullanılan asfalt çimentoları, özellik ve kıvam bakımından doğrudan doğruya bitümlü kaplamalarda kullanılmak üzere hazırlanmış petrol kökenli asfalttır. Asfalt çimentosu, kullanılmak üzere akıcı hale getirilebilmesi için mutlaka ısıtılması gerekir. Soğuyunca tekrar sertleşerek bağlayıcılık işlevini yerine getirir. Asfalt çimentoları, kıvamlılığı gösteren ve 10-300 arasında değişen penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılırlar. Penetrasyon derecesi yükseldikçe asfalt çimentosu yumuşar dolayısıyla bağlayıcılık gücü azalır. AC 10-20 en sert, AC 200-300 en yumuşak asfalt çimentosunu ifade eder. Asfalt çimentosu, katbek asfaltlar ve asfalt emülsiyonlarının da ana maddesidir (İsfalt A.Ş 2002).

5.1.2 Sıvı petrol asfaltları (Katbek asfaltlar)

Temel maddesi asfalt çimentosu olan katbek asfaltlar, penetrasyon derecesi bilinen bir asfalt çimentosunun, içinde eriyebileceği bir yağla karıştırılması suretiyle elde edilirler. Katbek asfaltlar, yüzeysel kaplamalarda ve bitümlü makadamlarda kullanılmak üzere agrega ile soğuk halde veya agrega yüzeyindeki nemin kurumasına yetecek kadar sıcaklıkta karıştırılabilmesi mümkün olan bir akışkan asfalt elde etmek maksadıyla geliştirilmiştir. Yolda bağlayıcı olarak kullanılmalarının yanında astarlama işlerinde de kullanılırlar. Bunlar çabuk kür olan RC sınıfı, orta hızda kür olan MC sınıfı ve yavaş kür olan SC sınıfı olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Ayrıca her sınıfta kendi arasında kıvam derecesini belirten kinematik viskozite değerlerine göre de sınıflara ayrılır. RC, MC ve SC harflerinden sonra gelen sayılar o tipin kinematik viskozite alt sınırını gösterir. Asfaltın viskozitesi yükseldikçe yani kıvamı arttıkça bu sayılar da büyür. Örneğin, MC-30 katbek asfalt ı, MC-3000'e göre çok daha ince ve akıcıdır (TS 1083, 1972).

Katbek asfaltlar, yolda kullanıldığında içerisindeki yağların uçması sonucu geriye sadece asfalt çimentosu (AC) kalır. Bu işleme kür olma denir.

Çabuk kür olan katbek asfaltları (RC), asfalt çimentosu ile benzin gibi çok uçucu bir çözücünün karıştırılmasıyla elde edilirler. Bunlar çabuk kurudukları için soğuk iklimlerde ve karışımın çabuk karıştırılması gereken durumlarda kullanılır. Çabuk alev alma durumu söz konusu olduğu için yangına karşı çok dikkatli olmak gerekir.

Orta hızda kür olan katbek asfaltları (MC), asfalt çimentosu ile gazyağı gibi orta derecede uçucu bir çözücünün karıştırılması ile elde edilir. Kuruma süresi RC tipine göre daha hızlıdır.

Yavaş kür olan katbek asfaltları (SC) ise, asfalt çimentosu ile kaynama noktası yüksek bir yağın karıştırılması ile veya doğrudan ham petrolün damıtılmasından elde edilirler (İsfalt A.Ş 2002).

5.1.3 Asfalt emülsiyonları

Asfalt emülsiyonları, birkaç mikron çapındaki asfalt çimentosu küreciklerinin birbirinden ayrı olarak su içerisinde dağılmasından elde edilirler. Asfalt çimentosunun su içerisinde dağılması karıştırma işlemi ile sağlanabilir. Fakat bu şekilde elde edilen emülsiyon uzun ömürlü olmaz ve kısa bir süre sonra asfalt kürecikleri birbirlerine yapışarak sudan ayrılırlar. Bu durumu önlemek amacıyla emülgatör adı verilen kimyasal katkı maddeleri kullanılır. Emülgatör asfalt küreciklerinin çevresini bir film halinde sararak kendi aralarında birleşmesine engel olur. Asfalt emülsiyonu yola serildiğinde, emülgatör yoldaki agrega ve tozlar tarafından emilmesi sonucu kaybolur. Bu olaya “emülsiyonun kesilmesi” denir. Bu kesilme hızlarına göre katbek asfaltlarda olduğu gibi asfalt emülsiyonları da, çabuk kesilen RS, orta hızda kesilen MS ve yavaş kesilen SS olmak üzere üç sınıfa ayrılır. Bu sembollerin yanına emülsiyonun kıvamını (viskozitesini) gösteren rakamlar ve harfler gelir. Önünde "C" harfi olan emülsiyon tipi katyonik emülsiyon olduğunu gösterir. Örneğin RS-1 anyonik, CRS-1 katyonik emülsiyondur. MS-2, MS-1'den daha viskozdur. Bazı sınıfların tanımında yer alan "h" harfi daha sert, "s" harfi ise daha yumuşak temel asfalt çimentosunun kullanıldığını ifade eder. Bazı anyonik emülsiyonların önüne gelen "HF" takısı ise yüzme deneyi tarafından ölçülen yüksek yüzme özelliğini göstermektedir.

ASTM ve AASHTO bu emülsiyon sınıfları için standart şartname geliştirmiştir

Tablo 5.1. Emülsiyon sınıfları

Anyonik Asfalt Emülsiyonu (ASTM D977, AASHTO M140)	Katyonik Asfalt Emülsiyonu (ASTM D2397, AASHTO M208)
RS-1	CRS-1
RS-2	CRS-2
HRS-2	-
MS-1	-
MS-2	CMS-2
MS-2h	CMS-2h
HFMS-1	-
HFMS-2	-
HFMS-2h	-
HFMS-2s	-
SS-1	CSS-1
SS-1h	CSS-1h

Ayrıca asfalt emülsiyonları kullanılan emülgatörün cinsine bağlı olarak üç kategoride sınıflandırılırlar.

- Anyonik
- Katyonik
- İyonik olmayan

Anyonik ve katyonik terimleri bitüm danelerinin çevresindeki elektrik yükleri ile ilgilidir. İki kutup, anot ve katot, sıvıya daldırıldığında elektrik akımı pozitif yüklü olan anot ve negatif yüklü olan katot arasından geçer. Eğer bir elektrik akımı negatif elektrik yüklü bitüm parçacıkları içeren bir emülsiyondan geçirilirse, bitüm danecikleri anoda taşınır ve bu emülsiyonlar anyoniktir. Pozitif elektrik yüklü bitüm danecikleri ise katoda taşınır ve bu emülsiyonlar katyoniktir. İyonik olmayan emülsiyonlarda, bitüm danecikleri nötrdür ve her iki kutba da taşınmazlar (Bitüm El Kitabı 2002).

5.2 Katran

Katran, kömür, odun gibi doğal organik maddelerin karbonize edilmesi veya havasız bir ortamda damıtılmasıyla elde edilen sıvı için kullanılan bir terimdir Zift ile hafif ve ağır yağların doğal veya yapay karışımıdır. Katran, genellikle ham olarak değil, damıtıldıktan sonra kullanılır. Kaplamalarda kullanılan katranın kömür kökenli olması tercih edilir. Katran, ya metalürjik amaçlar için kok elde edilmesi veya havagazı üretimi için kömürün kuru olarak damıtılması sırasında bir yan ürün olarak elde edilir (Abraham 1945).

Katranın agregaya yapışma özelliği asfalta nazaran daha iyi olmasına karşın katranın kıvamı sıcaklığın değişimi ile daha çok değişiklik göstererek daha çabuk bozulur. Bu sakıncayı gidermek maksadıyla katrana mümkün olduğu kadar ağır yağlar katılır. Katranın özelliklerini iyileştirmenin diğer bir yolu ise % 15-20 asfalt ilave etmektir. Böyle katranlara asfaltlı katran adı verilir. Fakat asfalt oranı % 20'yi aşmamalıdır. Aksi taktirde katran dibe çöker.

Katran içerisine su ilave edilmek suretiyle katran emülsiyonları elde edilmesi ve emülsiyon halinde kullanılması da mümkündür. Bu durumda normal sıcaklıkta çok düşük bir viskozite söz konusudur. Katran emülsiyonlarının hazırlanması ve kullanılması oldukça zor olduğu için yol inşaatında hemen hemen hiç kullanılmazlar (İsfalt A.Ş 2002).

5.3 Bitüm Özelliklerinin Belirlenmesi

Bitüme uygulanan deneylerle saptanan özelliklerinin, yol kaplamasının durumuna ve dayanıklılığına etkileri büyüktür. Bitümlü bağlayıcının cinsine göre şartnamelerde çeşitli deneylerden bahsedilmektedir. Bitümlü bağlayıcılara uygulanan bazı deneyler aşağıdaki gibidir.

a. Penetrasyon (TS 118 EN 1426)
b. Viskozite (ASTM D 4402-87)
c. Yumuşama noktası (TS 120 EN 1427)
d. Düktilite (TS EN 13398)
e. Trikloretilende çözünürlük (TS 1090 EN 12592)
f. ince film halinde ısıtma (TS EN 12607-2)
g. Parlama noktası (TS 1080, TS EN ISO 2592, TS 1171)

5.3.1 Penetrasyon deneyi

Penetrasyon dereceli veya oksitlendirilmiş bitümün kıvamı penetrasyon deneyi ile ölçülmektedir. Bu deneyde, belirli boyutlara sahip bir iğnenin, belirli bir yük (100 g) ve sıcaklık (25°C) altında, belirli bir süre (5 saniye) boyunca bitüm numunesi içerisine batmasına izin verilir,iğnenin desimilimetre, dmm, (0.1 mm) cinsinden batma derinliğine penetrasyon değeri denir. Dolayısıyla, bitüm yumuşadıkça iğnenin penetrasyonu artacaktır (İsfalt 2001).

Deney yönteminin hassas bir şekilde izlenmesi önemlidir, çünkü hafif bir sapma, deney sonuçlarında büyük farklılıklara neden olabilir. En çok yapılan hatalar numune hazırlama, deney aleti ve iğnenin bakımsızlığı ile sıcaklık ve sürenin yanlış tayin edilmesidir. Deney sıcaklığı oldukça önemli olup, +/- 0.1 °C hassaslığında kontrol sağlanması zorunludur, iğnelerin, düzgünlüğü, duruşunun doğruluğu ve temizliği düzenli olarak kontrol edilmelidir (İsfalt 2001).

Penetrasyonun değeri kıvamlılıkla ters orantılı olup, penetrasyon değeri yükseldikçe deneye tabi tutulan bitümlü bağlayıcı daha yumuşak bir kıvama sahip olur.

5.3.2 Viskozite deneyi

Viskozite, bitümlerin belli bir sıcaklıkta (veya sıcaklık aralığında) davranış biçimini belirlemesinden ötürü bu malzemenin temel özelliğini oluşturmaktadır.

Çeşitli amaçlar için, bir bitümün viskozitesinin, belirli bir miktarda malzemenin standart bir delikten akması için gereken sürenin saptanması yoluyla ölçülmesi yaygındır. Bu yöntemler, şartname hazırlanması ve karşılaştırma amaçları için uygun olup, gerektiğinde, sonuçlar daha temel viskozite birimlerine de dönüştürülebilir.

5.3.3 Yumuşama noktası deneyi

Penetrasyon dereceli yada oksitlendirilmiş bir bitümün kıvamı, aynı zamanda yumuşama noktasının tayin edilmesiyle de ölçülebilmektedir. Bu deneyde, pirinç bir halka içerisinde bulunan bitüm numunesi üzerine çelik bir bilya (3.5 g) yerleştirilir ve su ya da gliserin banyosunda askıda bırakılır.80°C ya da altında yumuşama noktasına sahip bitümler için su; daha yüksek yumuşama noktası değerlerine sahip bitümler içinse gliserin kullanılmaktadır. Banyo sıcaklığı dakikada 5°C artırılır ve bunun sonucunda bitüm yumuşayarak halka içerisindeki bilyanın

ağırlığıyla yavaşça deforme olmaya başlar. Bitüm ile bilyanın, halkanın 25 mm altındaki bir taban plakasına değdiği anda, suyun sıcaklığı kaydedilir. Kaydedilen sıcaklık değeri bitümün yumuşama noktasını göstermektedir (İsfalt 2001).

5.3.4 Düktilite deneyi

Düktilite, çekilerek uzatıldığı zaman büyük gerilmeler altında kopmaksızın kalabilme kabiliyetidir. Tanım olarak, asfalt çimentosundan yapılmış standart bir briketin, belirli sıcaklık ve hızda kopmadan çekilebildiği uzunluğun cm cinsinden ifadesi olarak tanımlanabilir

Bitümün bağlama yeteneği düktilitesine bağlı olup, düktilite değeri yüksek olan bitümlerin bağlayıcılık özellikleri de yüksek olmaktadır. Ancak, çok yüksek düktülite değerine sahip bitümlerin ısıya karsı fazla duyarlılık gösterdiği belirtilmektedir (Özgan 2005).

Bitümlü bağlayıcıların düktiliteleri, düktilite deneyi ile tespit edilmektedir. Düktilite cihazı, içi 25 °C'de su ile dolu olan ve numuneyi belirli bir hızda (5 cm/min hız ile) yatay olarak çeken özel bir gerilme makinesidir. Numune briket kopuncaya kadar çekme işlemine devam edilir. Briket koptuğu anda düktilite cihazının kenarındaki cetvelden uzama miktarı cm cinsinden okunur. Düktilite cihazında aynı anda 3 numune test edilebilmektedir. Deneye tabi tutulan bitümlü bağlayıcının düktilitesi, bu üç numunenin düktilite sonuçlarının ortalaması olarak kabul edilir (TS EN 13398 2005).



Şekil 5.2. Düktilite deneyi

5.3.5 Fraass kırılma noktası deneyi

Fraass kırılma noktası deneyi, bitümlerin düşük sıcaklıklardaki (-30°C'ye ulaşan sıcaklıklarda) davranışlarını saptamak amacıyla kullanılan az sayıdaki deneylerden biridir. Bu deney A. Fraass tarafından 1937 yılında geliştirilmiştir. Deney, bitümün kritik sertlik değerine ulaştığı ve çatlamaya başladığı sıcaklık değerini saptayan bir araştırma yöntemi durumundadır. Kanada, Finlandiya, Norveç ve İsveç gibi kış mevsiminde çok düşük sıcaklıkların yaşandığı çeşitli sayıdaki ülkeler her bitüm cinsi için izin verilebilen maksimum Fraass sıcaklıklarını kullanmaktadır.

Fraass deneyinde 0.5 mm kalınlığında bitümle kaplanmış bir 41 mm x 20 mm'lik çelik plak yavaşça bükülmekte ve serbest bırakılmaktadır. Plağın sıcaklığı, bitüm kritik sertlik değerine ulaşıp çatlamaya başlayıncaya dek dakikada 1°C düşürülmektedir. numunenin çatlama yaptığı sıcaklık kırılma noktası olarak adlandırılmakta ve eşit-rijitlik sıcaklığını temsil etmektedir (İsfalt 2001).



Şekil 5.3 Fraass kırılma noktası deneyi

5.3.6 Superpave (Yüksek performanslı asfalt kaplama) deneyleri

Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (SUPERPAVE) asfalt deneyleri, malzemenin doğrudan arazi şartlarındaki performansı ile ilgili özelliklerini ölçmektedir. Bu deneyler asfaltın; yaşlanma, işlenebilirlik, oluklanma, yorulma ve termal etkilere karşı performanslarının belirlendiği bir seri deneyler grubudur. Tablo 5.2 ve 5.3'de bu deneylerin listesi, kullanım amaçları ve deneyle ilgili performans özellikleri gösterilmektedir (Dinç 2000).

Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (SUPERPAVE) bağlayıcı şartnamesinin en önemli özelliği, asfaltın ömrü boyunca karşı karşıya kalacağı üç kritik durumun deneylerle simüle edilmiş olmasıdır. Orijinal asfalt numunesi üzerinde uygulanan deneyler taşıma, depolama ve işlemeyi kapsayan ilk aşamayı temsil eder. İkinci aşama, karışım hazırlama ve serme sırasındaki asfaltı temsil eder. Döner ince film etüvünde asfalt, sıcaklık ve havaya maruz bırakılarak oksidasyonu sağlanır ve serme sırasındaki sertleşme tahmin edilir. Üçüncü aşama ise, bağlayıcının uzun süre sonundaki yaşlanmasıdır. Bu durum da, basınçlı oksidasyon deneyi ile simüle edilmektedir (Öztürk 2004).

Tablo 5.2 Yüksek performanslı asfalt kaplama (Superpave) bağlayıcı deneyleri (Dinç 1999)

Döner ince film deneyi (RTFO)	Bağlayıcının oksidasyonunu (yaşlanmasını) ya da sertleşmeyi simüle eder.
Basınçlı oksidasyon deneyi (PAV)	
Dinamik kesme deneyi (DSR)	Orta ve yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı özelliklerini ölçer.
Dönel viskozite deneyi (RV)	Yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı özelliklerini ölçer.
Eğilme deneyi (BBR)	Düşük sıcaklıklarda bağlayıcı özelliğini ölçer.
Doğrudan çekme deneyi (DTT)	

Tablo 5.3 Yüksek performanslı asfalt kaplama (SUPERPAVE) bağlayıcı deneyleri performans özelikleri (Dinç 1999)

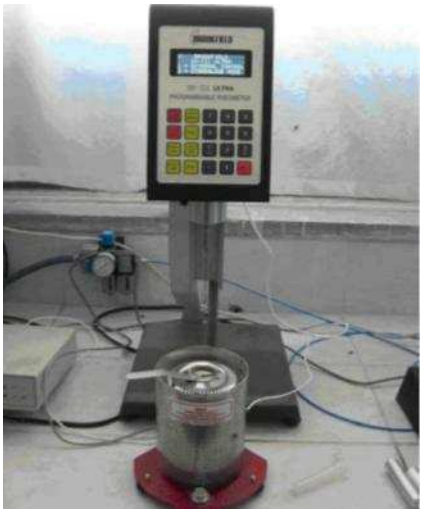
Deney Adı	**Performans Özelliği**	
Dönel Viskozite Deneyi	İşlenebilme ve Pompalanabilme	Akma
Dinamik Kesme Deneyi	Kalıcı Deformasyonlar	Oluklanma
	Yorulma Çatlakları	Yapısal Çatlak
Eğilme Deneyi	Termal Çatlamalar	Düşük Isı Çatlağı
Doğrudan Çekme Deneyi		

5.3.6.1 Dönel viskozimetre ile bağlayıcı işlenebilirliklerinin belirlenmesi

Dönel viskozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak“Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalama ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Deneyde, bağlayıcı içerisinde 20 rpm hızla dönen bir milin,

dönmeye karşı gösterdiği direnç ile viskozite değerleri elde edilmektedir (Şekil5.5). Orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C'deki viskozite değerlerinin 3 Pa.s'yi aşmaması istenmektedir (McGennis 1994, Zaniewski 2004).

Deney için bağlayıcıdan yaklaşık olarak 30 gr. numune alınmakta ve sıcaklığı 150°C'den daha düşük olan etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilmektedir. Bu malzemeden yaklaşık olarak 11 gr. numune bölmesine doldurulmakta, numune bölmesi sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilmektedir. Numune 15 dakika sabit sıcaklıkta bekletildikten sonra deney yapılmaktadır. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten itibaren üç adet okuma yapılmakta ve bu üç değerin ortalamasından bağlayıcının viskozitesi elde edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımların (BSK) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla viskozite değerleri kullanılmaktadır. Bu amaçla 135°C ve 165°C sıcaklıklarda RV deneyi uygulanmaktadır.



Şekil 5.4. Brookfield viskozimetresi

5.3.6.2 Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) yöntemiyle bağlayıcıların kısa süreli yaşlandırılması

Bitümlü bağlayıcılarda, agregayla plentte karıştırılması, taşınması, depolanması, uygulama ve ayrıca servis ömrü boyunca oksidasyon ve uçucu madde kaybı olması gibi çeşitli nedenlerden ötürü yapısal sertleşme meydana gelmektedir.

Bağlayıcılarda meydana gelen toplam yaşlanmanın büyük bir kısmının, agregayla plentte karıştırma sırasında kısa bir süre içerisinde meydana geldiği belirlenmiştir. Bağlayıcılarda kısa bir süre içerisinde oluşan bu yaşlanmayı laboratuar ortamına yansıtmak için birçok metot geliştirilmiş fakat en çok kabul gören ve tercih edileni, dönel ince film halinde ısıtma deney (RTFOT) yöntemi olmuştur. Bu yöntemde, asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın birleşik etkisi değerlendirilmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimi tespit etmek amacıyla gerekli malzeme elde edilebilmektedir. TS EN 12607-1'de belirtilen bu deney, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır (Lav ve ark. 2004).

Deneyde, her bir şişeye 35 gram bitümlü bağlayıcı doldurulup düşey eksende dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 4000 ± 200 ml/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişeleri tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır. Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek için, geri kalan altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmek için kullanılmaktadır. Kütle kaybı formül (1) kullanılarak belirlenmektedir. Formülde M1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir (TS EN 12607-1 2003)

$$\textbf{Kütle Kaybı}, \% = [(M_1-M_2) / M_1] * 100 \qquad (1)$$

5.3.6.3 Basınçlı oksidasyon deneyi (PAV)

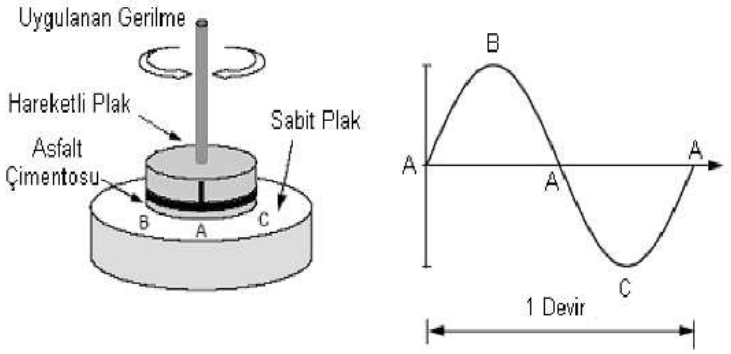
Dinamik Kayma Reometresi deneyi, bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna ve normal sıcaklıklarda yorulmaya karşı dayanımını tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla işlem görmemiş (yaşlandırılmamış) ve

RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken, bağlayıcıların yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla PAV (basınçlı yaşlandırma kabı) yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını tespit etmek için ise 8 mm çapında ve 2000 mikron yüksekliğindedir

5.3.6.4 Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi ile bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyesinin belirlenmesi

Dinamik Kayma Reometresi deneyi, bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna ve normal sıcaklıklarda yorulmaya karşı dayanımını tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla işlem görmemiş (yaşlandırılmamış) ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken, bağlayıcıların yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla PAV (basınçlı yaşlandırma kabı) yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını tespit etmek için ise 8 mm çapında ve 2000 mikron yüksekliğindedir (Yılmaz ve ark. 2008).

Bölge iklim şartlarına göre belirlenmiş deney sıcaklıklarında bağlayıcılar Şekil 5.5'de görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına yerleştirilmektedir. Hareketli üst plaktaki A noktası, B noktasına gitmekte geri dönerek tekrar A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir/saniye'dir. Deneyde ortam şartlarını yansıtması amacıyla ön koşullandırma yapılmakta ve daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır (McGennis 1994, Zaniewski 2004).



Şekil 5.5. DSR Deneyinde Numunelere Uygulanan Deformasyon Yönleri (Zaniewski 2004)

Dinamik kayma deneyi, asfalt çimentosunun kompleks kayma modülü (G*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir. G*, tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı asfalt çimentosunun gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Faz açısı, uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman farkına (Δt) eşit olmaktadır. Faz açısının 0° olması numunenin elastik davranış gösterdiğini, 90° olması ise viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Bitümlü bağlayıcılar viskoelastik özellik gösterdiğinden normal şartlarda faz açısı 0° ile 90° arasında değişmektedir. Faz açısının düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir. Deney sonucu elde edilen kompleks kayma modülü (G*) ve faz açısı (δ) değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan "G*/sinδ" belirlenmektedir. AASHTO TP5-98 standardına göre "G*/sinδ" değerinin yaşlandırılmamış bağlayıcılar için minimum 1000 Pa, RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise 2200 Pa olması gerekmektedir (Kuloğlu ve ark. 2008).

5.3.6.5 Eğilme deneyi (BBR)

Asfalt, düşük sıcaklıklarda DSR ile alınacak sonuçlara güvenilmeyecek kadar sertleşir. Bu nedenle, asfaltı düşük sıcaklıklarda gözlemek üzere Amerika Birleşik Devletleri'nde Stratejik Karayolu Araştırma Programı tarafından eğilme reometresi geliştirilmiştir. Deney genellikle sıfırın altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve sabit yük uygulanan kiriş şeklindeki asfalt bir çubuğun, bu yük altında zaman içindeki

sehimi izlenir. Deney sıcaklığı, asfaltın servis durumundaki karşılaşacağı en düşük sıcaklığa göre değişir. Bu deneyde RTFO ve PAV deneyleri ile yaşlandırılmış numuneler kullanılır. Böylece servis durumundaki veya karışım ve serme sırasındaki asfalt deneyde temsil edilmiş olur. Deney bilgisayar kontrollü yapılır ve yine bilgisayar tarafından anlık zaman-deformasyon ile zaman-sünme sertliği grafikleri çizilerek 60 sn sonundaki sünme sertliği "S" ve sünme oranı "m" hesaplanır (Dinç 1999).

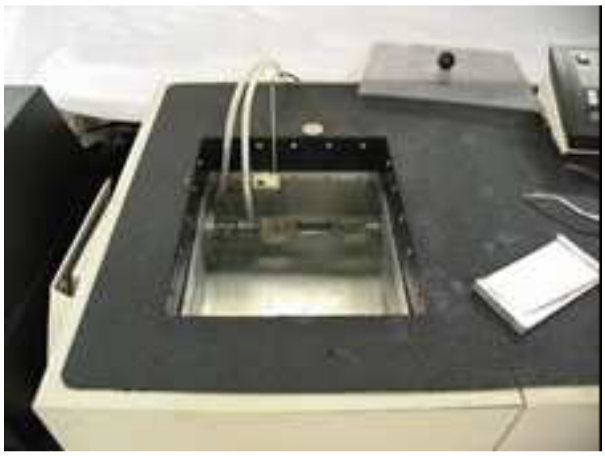
$$S_{(t)} = \frac{PL^3}{4bh^3\delta_{(t)}} \qquad (2)$$

S(t) : t anında sünme sertliği (MPa)
P : Uygulanan sabit yük (N)
L : Mesnetler arası mesafe (102 mm)
b : Çubuk uzunluğu (15.5 mm)
h : Çubuk kalınlığı (6.25mm)
δ(t): t anındaki yer değiştirme (mm)

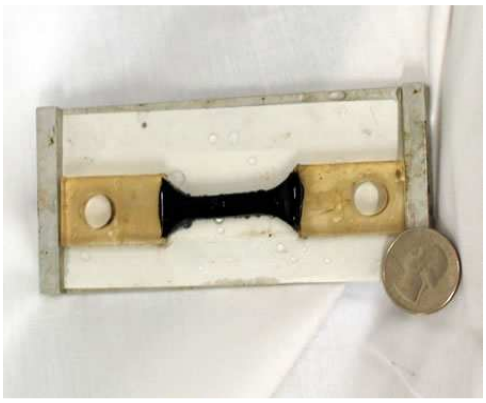
5.3.6.6 Doğrudan çekme (DTT) deneyi

Yapılan araştırmalar, asfaltın düşük sıcaklıklardaki sertliği ile kopma anından önceki uzama oranı arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir. Kopma anından önceki uzaması nispeten fazla olan asfaltlar sünek (düktil), fazla uzamadan kopanlar ise gevrek (kırılgan) olarak nitelendirilirler. BBR deneyi ile ölçülen sertlik, asfaltın zayıflama anından önceki çekmeye karşı kapasitesini anlatabilmekte yeterli değildir. Örneğin, bazı asfaltlar yüksek sünme sertliğine sahip olsa bile çok fazla miktarda çekilebilirler. Bu yüzden Amerika Birleşik Devletleri'nde Stratejik Karayolu Araştırma Programı araştırmacıları, bu tür sert fakat düktil asfaltlar için bir deney geliştirmişlerdir. Bu deneyde RTFO ya da PAV deneyleriyle yaşlandırılmış numuneler kullanılır. Kemik formu verilmiş asfalt numunesi, düşük sıcaklıklarda iki ucundan zayıflama anına kadar çekilir. Bilgisayar tarafından hazırlanan gerilme-

uzama grafiğinde gerilme eğrisinin tepe noktası uzama oranı için kritik noktadır (Dinç 1999).



Şekil 5.6. DTT deney aleti



Şekil 5.7. DTT deneyine tabi tutulan bitümlü bağlayıcı

5.4 Bağlayıcıların performans seviyelerinin (PG) belirlenmesi

Bitümün aşırı sert olması durumunda kaplamada düşük sıcaklıklarda çatlama ve aşırı yumuşak olması durumunda ise yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu ve terleme gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu istenmeyen durumları ortadan kaldırmak maksadıyla bölge iklim şartlarına uygun bağlayıcılar tercih edilmesi gerekmektedir. Superpave sisteminde, uygulama bölgesinin uzun süreli sıcaklık verilerinden faydalanılarak kaplama sıcaklıkları tespit edilmekte ve kaplama sıcaklıklarına bağlı olarak ta bağlayıcı sınıfı belirlenmektedir. Bu sistemde, bağlayıcı sınıfının yüksek ve düşük sıcaklık değerlerinde, bağlayıcıya performans deneyleri uygulanmakta ve elde edilen sonuçlar şartname limitleriyle karşılaştırılmaktadır.

Superpave sistemi bağlayıcı performans seviyelerinin belirlenmesinde, meteoroloji istasyonlarından elde edilen en az 20 yıllık veriler baz alınmaktadır. 20 yıllık süre içerisinde bölgede tespit edilen en yüksek 7 günlük hava sıcaklığı ortalamasından (Tmaks.hava) faydalanılarak yüzeyden 20 mm derinlikteki en yüksek kaplama sıcaklığı (Tmaks), en soğuk 1 günlük hava sıcaklığından (Tmin.hava) faydalanılarak ta kaplama yüzeyindeki en düşük kaplama sıcaklığı (Tmin.) tespit edilmektedir. Bu değerlerin bulunmasında bölgenin enlemi de (E) dikkate alınmaktadır. Kaplamanın en yüksek ve en düşük sıcaklık değerlerinin belirlenmesinde formül (2) ve formül (3) kullanılmaktadır (Yang 1993).

$$T_{maks.}(°C) = (T_{maks.hava} - 0{,}00618 \times E^2 + 0{,}2289 \times E + 42{,}2) \times 0{,}9545 - 17{,}7 \quad (2)$$

$$Tmin.(°C) = 0{,}859 \times Tmin.hava + 1{,}17 \quad (3)$$

Uygulama bölgesi iklim şartları göz önünde bulundurularak tespit edilen en yüksek kaplama sıcaklığından daha yüksek olan sıcaklık sınıfı ve en düşük kaplama sıcaklığından daha düşük olan sıcaklık sınıfı alınarak bağlayıcı performans seviyesi tespit edilmektedir. Superpave sisteminde bağlayıcı türü iki değişkenli olarak PG X-Y şeklinde gösterilmektedir. Burada birinci değişken (X), bağlayıcının gerekli performans şartlarını sağladığı yüksek sıcaklık sınıfını, ikinci değişken (Y) ise bağlayıcının gerekli performans şartlarını sağladığı düşük sıcaklık sınıfını belirtmektedir. Kullanılması düşünülen bağlayıcıların tespit edilen bu sıcaklıklarda Superpave deneylerine tabi tutulmakta ve uygunlukları belirlenmektedir. Tablo 5.4'de Superpave bağlayıcı performans seviyeleri verilmiştir.

Tablo 5.4 **.** Superpave bağlayıcı sınıfları

Yüksek Sıcaklık	Düşük Sıcaklık Sınıfları, Y,	Gösterim
46	-34, -40, -46	PG 46-Y
52	-10, -16, -22, -28, -34, -40, -46	PG 52-Y
58	-16, -22, -28, -34, -40	PG 58-Y
64	-10, -16, -22, -28, -34, -44	PG 64-Y
70	-10, -16, -22, -28, -34, -44	PG 70-Y
76	-10, -16, -22, -28, -34	PG 76-Y
82	-10, -16, -22, -28, -34	PG 82-Y

6. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Dikkatli şekilde oranları saptanmış iri agrega, ince agrega ve filler ile bitümün sabit karıştırma tesislerinde sıcaklık, nem ve bileşim bakımından çok sıkı bir kontrol altında karıştırılmasıyla elde edilen yol kaplama malzemesi bitümlü sıcak karışım olarak adlandırılır.

İyi bir bitümlü sıcak karışımda bulunması gereken ana özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Bitümlü sıcak karışım yüksek stabiliteye sahip olmalıdır,
- Kırılgan olmamalıdır,
- Durabil(Dayanıklı) olmalıdır,
- Kaygan olmamalıdır,
- Mümkün olduğu kadar ekonomik olmalıdır.

Bitümlü sıcak karışımlara birden fazla çeşitli deneyler uygulanmaktadır. Ancak bu çalışmada Marshall deneyi yapılacak olup bu deneyden bahsedilecektir.

6.1. Marshall Deneyi

Bruce Marshall tarafından, ağır uçak tekerleği yüklerine karşı koyabilmek amacıyla arzu edilen kıvam ve asfalt içeriğinin saptanması amacıyla bir karışım dizayn yöntemi düşünülmüştür. Marshall yöntemi tatminkâr düzeyde tasarım kriterleri getirmiştir. Günümüzde, bu ampirik yöntem dünya genelinde yaygın şekilde uygulama görmektedir. Bu deney için her şeyden önce aşağıdaki koşullar sağlanmış olmalıdır:

- Kullanılacak malzeme kalite bakımından ilgili şartnamelere uygun olmalıdır.

- Hazırlanmış agrega karışımları elek analizi şartnamesine uygun olmalıdır.
- Yoğunluk ve boşluk analizi için, karışımda kullanılan bütün agregaların özgül ağırlıkları tayin edilmiş olmalıdır.

6.1.1. Deneyde kullanılan aletler

- Tepsiler ve kaplar: Agrega ve bitümlü bağlayıcıyı ısıtmak ve karıştırmak için,
- Etüv ve elektrikli ısıtma kabı: Agregayı, bitümlü bağlayıcıyı ve aletleri ısıtmak için,
- Kürek, spatula: Karıştırma işleri için,
- Termometre: Cam veya metal gövdeli 10-232ºC sınırlarını taşımalıdır,
- Terazi: Agrega ve bitümlü bağlayıcıyı tartmak için,
- Mekanik karıştırıcı: 2.5 kg kapasiteli olmalıdır. Bitüm ile agregayı karıştırmak için,
- Su banyosu: Numuneleri ısıtmak için,
- Sıkıştırma tablası: Numuneleri sıkıştırmak için,
- Sıkıştırma kalıbı: Bir taban levhası, bir şekil verme kalıbı ve bir üst parçadan oluşur,
- Kriko: Deney numunelerini kalıptan çıkartmak için,
- Stabilite ölçüm kalıbı: İç eğrilik yarı çapları 5 cm olacak şekilde hassasiyetle işlenmiş alt ve üst dairesel parçalardan oluşmuştur.

6.1.2. Deney karışımlarının hazırlanması

a. Agrega ve mineral filler sıcaklıkları karıştırma sıcaklığına gelinceye kadar ısıtılır.

b. Bitümlü bağlayıcının sıcaklığı da karıştırma sıcaklığına gelinceye kadar ısıtılır. Bağlayıcının uzun müddet ve tekrar tekrar ısıtılmasından kaçınılmalıdır.

c. Bitümlü bağlayıcı ve agregalar bir mala veya mekanik bir karıştırıcı ile karıştırılır ve bu işlem mümkün olduğu kadar çabuk tamamlanmalıdır. Karıştırma işleminin 2 dakika içinde bitmesi gerekir.

d. Karıştırmanın sonucunda, karışımın sıcaklığı grafikle bulunacak sıkıştırma sıcaklığı alt limit değerinin altına düşmemelidir. Şayet sıcaklık, bu değerin altına düşmüşse karışım atılmalı ve işlem tekrarlanmalıdır. Karıştırma sırasında ve karıştırmadan sonra malzemenin yeniden ısıtılmasına müsaade edilmemelidir.

6.1.3. Deney numunelerinin hazırlanması

Özel bir karışım veya agrega granülometrisi için Marshall metodu ile optimum bağlayıcı miktarı tayininde, çeşitli bağlayıcı oranlarına sahip numune serileri hazırlanır. Bu numunelerin belirli bazı deneylere tabi tutulması sonucu saptanan değerlere dayanılarak çizilen deney eğrilerinden bir optimum değer bulunur. Deney numuneleri, bitüm oranını her numune serisinde %0.5 artırarak ve tahmin edilen optimum bitüm oranının en az %2 aşağısından başlayarak, yine tahmin edilen optimum değeri %2 aşacak şekilde değişik yüzdelerde hazırlanır.

Optimum bitüm oranını tayin etmek için, daha önce tahmini optimum bitüm oranının yaklaşık olarak saptanması gerekir. Yeterli deney neticeleri elde etmek için her bir bağlayıcı oranında genellikle 3 numune hazırlanır.

6.1.4. Numunelerin sıkıştırılması

a. Karışım hazırlanmadan önce, sıkıştırma tokmağı ile sıkıştırma kalıbının iç yüzü temizlenmeli ve bir etüvde 93-147ºC ye kadar ısıtılmalıdır.

b. Isıtılmış kalıp taban levhası üzerine yerleştirilerek içine 10.16 cm çapında filtre kâğıdı konulmalıdır.

c. Karışım, sıkıştırma kalıbı içine yerleştirilerek ısıtılmış bir spatula veya bir maşa ile 25 defa darbelenir, kalıp içindeki numune üzerine 10.16 cm çapında filtre kâğıdı konulur ve sıkıştırmaya geçilir.

d. Sıkıştırma tokmağı ile numuneye, trafik değeri 100 psi lastik basıncı olması için 50 darbe, trafik değeri 200 psi lastik basıncı olması için 75 darbe vurulur.

e. Numuneler sıkıştırıldıktan kısa bir müddet sonra kalıptan çıkarılarak, düz bir satıh üzerine dikkatlice konur ve oda sıcaklığında bir gece soğumaya bırakılır.

f. Sıkıştırılmış numunelerin yüksekliği 6.35 ±0.8 cm olmalıdır.

g. Numuneler, birim ağırlığının tayin edilebilmesi için havada ve suda tartılır.

h. Tartılmış ve ölçülmüş numuneler 60ºC lik su banyosu içinde 30 dakika bekletilerek, deneye hazır hale getirilir.

6.1.5. Deneyin yapılışı

a. Deneye başlamadan önce, deney kalıbının alt ve üst çenelerinin iç yüzleri ve kılavuz çubukları ince bir yağ tabakası ile yağlanmalıdır.

b. Numune su içinden dikkatlice çıkarılarak, kurutulur ve aletin çenesi içine deney vaziyetine uygun şekilde konur.

c. Numune deney makinesine uygun şekilde yerleştirilir, flowmetre de deney durumuna uygun konulduktan sonra alet çalıştırılır. Numunenin üzerinde bulunduğu çene, numunede kırılma oluşuncaya kadar dakikada 2 inçlik bir hızla yükseltilir.

d. Stabiliteyi saptayan kırılma, yük ölçme göstergesinde varılan en yüksek değerde meydana gelir. Bu değer o numunenin stabilitesi olarak kaydedilir.

e. Numunede meydana gelen akma ise akma göstergesinde mm olarak okunur. Örneğin göstergede herhangi bir numune için 0.19 inç değeri okunuyorsa, onun akma değeri 19 olarak kaydedilir.

6.1.6. Deney sonuçları ve optimum bağlayıcı oranı tayini

Deney sonucunda;

a. Bitümlü bağlayıcı yüzdesi-stabilite,

b. Bitümlü bağlayıcı yüzdesi-akma,

c. Bitümlü bağlayıcı yüzdesi-birim ağırlık,

d. Bitümlü bağlayıcı yüzdesi-boşluk yüzdesi,

e. Bitümlü bağlayıcı yüzdesi-Vb/VMA,

f. Bitümlü bağlayıcı yüzdesi-VMA, eğrileri çizilmektedir. Bu eğrilerden hareket edilerek optimum bitüm oranı saptanır. Aşağıdaki beş koşulu gerçekleştiren bitüm oranlarının ortalaması optimum bitüm oranı olarak kaydedilir.

a. Maksimum stabilitenin verdiği bitüm oranı,

b. Maksimum birim ağırlığının verdiği bitüm oranı ,

c. %4 boşluk oranının verdiği bitüm oranı,

d. %80 Vb/VMA değerinin verdiği bitüm oranı,

e. Minimum VMA(Agregalar arası boşluk) değerinin verdiği bitüm oranı.

6.2. Elek Analizi Deneyi

İri, ince ve filler olmak üzere 3 ayrı grupta getirilen agregalar TS 130'da da belirtildiği gibi 20 mm, 14 mm, 10 mm, 6.3 mm, 3.35 mm, 2 mm, 1.18 mm, 0.3 mm ve 0.075 mm nolu eleklerden elenmiştir. Elenen agregalar üzerinde kaldığı eleklere göre gruplara ayrılmıştır. Cooper ve ark. (1995) tarafından asfalt betonu olarak adlandırılan sıcak karışımların hazırlanması için ortaya formül (4) konmuştur.

$$P_d = \frac{(100-F).\left(d^n - 0{,}075^n\right)}{\left(D^n - 0{,}075^n\right)} + F \qquad (4)$$

Bu eşitlikte

Pd: d elek boyutundan geçen miktarı (%),

d: Herhangi bir elek boyutunu (mm),

D: En büyük elek boyutunu (mm),

F: Filler miktarını (%),

n: 0.1 ile 0.7 arasında değişen sabit sayıyı göstermektedir.

7. BİTÜMÜN MODİFİKASYONU

Bitümlü kaplamaların gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli olması arzulanmaktadır. Ancak, bitümlü bağlayıcıların yol kaplamalarında bağlayıcı olarak tek başlarına kullanılması beraberinde çeşitli sorunlar getirmektedir.

Ham petrol fiyatlarındaki artışlar, yüksek maliyetlerin daha ince kaplamaların tercih edilmesini doğurması, dolayısıyla kaplamaların hizmet ömürlerinin düşmesi, trafik yüklerinde meydana gelen önemli artışlar, deformasyonların oluşması ve bakım-onarım maliyetlerinin yüksek oluşu gibi problemlere karşı dayanımlarının arttırılmasının gerekliliği bu sorunlardan dolayı bitümlü bağlayıcıların performanslarının iyileştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar ile bitüm modifiye edilerek performansları artırılmaya çalışılmaktadır.

Yol üst yapılarının yüksek sıcaklıklarda yeterli rijitliğe sahip olması tekerlek izi gibi deformasyonlara karşı direncin artmasına, düşük sıcaklıklarda ise yeterli esnekliğe sahip olması çatlamalara ve kırılmalara karşı direncin artmasını sağlayacaktır. Kaplamanın trafik yükleri altında yorulma nedeniyle meydana gelen çatlamalar ile su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenilen seviyede kayma direncinin elde edilerek sürüş emniyetinin sağlanması da yine bitümün modifiye edilmesinde amaçlanan hedefler arasındadır.

7.1. Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye Edilme Nedenleri

Yol üst yapılarının yüksek sıcaklıklarda yeterli rijitliğe sahip olması tekerlek izi gibi deformasyonlara karşı direncin artmasına, düşük sıcaklıklarda ise yeterli esnekliğe sahip olması çatlamalara ve kırılmalara karşı direncin artmasını sağlayacaktır. Kaplamanın trafik yükleri altında yorulma nedeniyle meydana gelen çatlamalar ile su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenilen seviyede kayma direncinin elde edilerek sürüş

emniyetinin sağlanması da yine bitümün modifiye edilmesinde amaçlanan hedefler arasındadır.

Genel olarak bitümün modifiye edilme sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir

- **a.** Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde etmek ve böylece kalıcı deformasyonları azaltmak,
- **b.** Yüksek servis sıcaklıklarında daha sert karışımlar elde etmek ve böylece tekerlek izlerini azaltmak,
- **c.** Kayma direnci yüksek yüzeyler elde etmek,
- **d.** Karışımların stabilitesini ve mukavemetini arttırmak,
- **e.** Karışımların yorulma direncini arttırmak,
- **f.** Yaşlanmış bitümlü bağlayıcıları gençleştirmek,
- **g.** Düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirmek,
- **h.** Agregaların üzerinde daha kalın bağlayıcı filmleri oluşturarak, bağlayıcı ve agregaların birbirine yapışma özelliğini artırarak, soyulmayı azaltmak,
- **i.** Akmayı ya da kusmayı azaltmak,
- **j.** Yakıt dökülmelerine karşı direnci sağlamak,
- **k.** Kaplama tabakalarının kalınlıklarını azaltmak ve daha ince aşınma tabakalarının kullanımını sağlamak,
- **l.** Çatlakları geciktirmek,
- **m.** Uygulama alanlarını artırmak,
- **n.** Absorpsiyonu minimize etmek,
- **o.** Kaplamaların performansını yükseltmek,
- **p.** Kaplamaların uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak

Bağlayıcıya veya karışıma çeşitli katkı maddeleri ilave edilmesiyle bu özellikler tam olmasa da kısmen sağlanabilmektedir (Çubuk 2007).

7.2. Bitümün Modifikasyon Yöntemleri

Modifikasyon işlemi genel olarak katkı maddesi önceden bitüme katılması ile modifiye bitüm elde edilmesi veya katkı maddesinin asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılması ile modifiye karışım elde edilmesi şeklinde yapılabilmektedir.

Bitümlü bağlayıcıların özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan test yöntemleri, daha kısa sürelerde yapılabilmektedir. Karışıma yönelik testler ise bitümlü bağlayıcılara uygulanan test yöntemlerine göre daha uzun süre, daha fazla işlem ve daha kapsamlı test ekipmanlarını gerektirmektedir. Ayrıca, hizmet aşamasının performansını belirlemede daha temsili olmaktadır.

Modifiye edilmiş bitüme, çeşitli standart test yöntemleri uygulanmak suretiyle, katkılı bitümün katkısız bitüme göre özelliklerindeki değişimlerin tespit edilebilmesi mümkün olabilmektedir. Böylece modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesine ve değerlendirilmesine imkan sağlanabilmektedir.

7.3. Bitüm Katkı Maddelerinde Aranan Özellikler

Bitümlü bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılacak olan katkı maddelerinin uygulamada etkili, pratik ve ekonomik olması bakımından bazı koşulları sağlaması istenilmektedir (Ilıcalı 2001).

a. Kolay elde edilebilmelidir,
b. Bitümle uyuşmalıdır,
c. Bitüm karışım sıcaklığında özelliğini kaybetmemelidir,
d. Bitüm ile homojen olarak karışabilmelidir,
e. Bitümün yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale gelmeden akışkanlığa karşı direncinin artmasını sağlamalıdır,
f. Düşük sıcaklıklarda ise kaplamanın çok kırılgan veya sert olmasını önlemelidir,
g. Uygun maliyette olmalıdır.

7.4. Modifiye Bitümlerde Aranan Özellikler

Modifikasyonda kullanılacak katkı maddelerinin bitüm ile karıştırılmasından sonra, elde edilen modifiye bitümden beklenen özellikler ise şunlardır (Ilıcalı 2001).

- **a.** Depolama, uygulama ve hizmet sırasında sahip olduğu özelliklerini kaybetmemelidir,
- **b.** İşlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdır,
- **c.** Depolama, uygulama ve hizmet sırasında fiziksel ve kimyasal olarak stabil olmalıdır,
- **d.** Uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilmelidir

7.5. Bitümün Modifikasyonu için Kullanılan Katkılar

Modifiye bitüm eldesinde kullanılan katkı malzemeleri günümüzde çeşitlilik arz etmekte olup, gelecekte daha da artacağı beklenmektedir. Kullanımı oldukça artan modifiye bitümler konusundaki çalışmalarda katkı maddesi olarak polimerlere ve kimyasal reaksiyon modifikasyonlarına ilginin arttığı görülmektedir. Polimer modifikasyonlarında plastiklerin, elastomerlerin, işlenmiş kauçukların ve fiberlerin ana modifikasyon başlıklarını oluşturduğu görülmektedir. Kimyasal reaksiyonlu modifikasyonlarda ise katkı reaksiyonları, vulkanizasyon ve nitrasyon reaksiyonları dikkat çekmektedir.

Tablo 7.1'de bazı yaygın kullanılan modifiyeler ve değişiklik sağladığı özellikler verilmektedir.

Kimyasal katkı maddelerinin bitüme ilavesi ile bitümün viskozite, sertlik, yumuşama, adezyon, yaşlanma, soyulma ve işlenebilirlik gibi özelliklerinde iyileştirmeye gidilebilmektedir. Yorulma direncini artırmak için stiren-bütadien (SBR), etil-vinil-asetat (EVA), oksidan vb., kalıcı deformasyon direncini artırmak için stiren-bütadien-stiren (SBS), mineral filler, vb., düşük ısı çatlağı direnci için SBS, genleştirici katkılar, vb., sertleşme direnci için SBR, oksidan, antioksidan,

mineral elyaflar, vb., soyulmaya karşı organik esaslı metal katkı maddeleri kullanılabilmektedir (Tunç 2004).

Tablo 7.1 Modifiyeler ve değişiklik sağladığı özellikler (Ilıcalı 2001)

Bazı Yaygın Kullanılan Modifiyelerin Rolü	
Katkılar	**Kimyasal Katkıların Rolü**
Yağ	Bitümün yapısı, Bağlayıcılık, Viskozite Penetrasyon değeri, Yumuşama
Filler tozu	Yumuşama noktası, Viskozite, Sertlik, Yoğunluk, Maliyet, Mekanik sağlamlık
Fiberler	Tiksotropik, Çatlak direnci, Viskozite
Balmumu	Viskozite (sıcak), Sertlik (soğuk) Bağlayıcılık, Adezyon
APP (Ataktik polipropilen) EVA (Etilen vinil asetat)	Sertlik, Penetrasyon değeri, Frass kırılma noktası, Yumuşama noktası
SBS (stiren-butadien-stiren)	Penetrasyon değeri, Yumuşama noktası, Elastik geri dönüş, Düşük sıcaklık kırılganlığı
Solvent	Viskozite
Emülsifikasyon	Viskozite, Islatma kabiliyeti, Uygulama sıcaklığı
Islatma ajanları	Islatma kabiliyeti, Adezyon

EVA (etilen vinil asetat), SBS (polistiren ve polibütadien esaslı polimerler), termoset veya termoplastik polimerler, doğal ve yapay kauçuk, vb. modifiyerler bitüme katıldığında elde edilen özellikler farklı olduğundan dolayı bitümle uyumu için gerek cins gerekse miktar doğru saptanmalıdır. Bunun için modifiye bitüm üzerinde yapılacak bir takım deneyler (viskozite, yumuşama noktası, soyulma, kırılganlık, vb.) yapılarak sonuçlar modifiye edilmemiş bitümle karşılaştırılmalıdır (Tunç 2004).

7.6. Bitümün Modifikasyon Türleri

Kullanılan katkılar yani modifiyeler gerek cins gerekse miktar olarak farklı bitümlerde farklı sonuçlar yaratmaktadır. Bunun nedeni asfalten ve malten olarak

belirtilen iki ana grubun her bitümde farklı oranlarda olmasıdır. Aynı şekilde katkı cinsinin ve miktarının belirlenmesi de önemli bir etkendir.

7.6.1. Kükürt ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu

Kükürt kullanım miktarına göre, kükürtlü asfalt denilen ve kükürdün az miktarda kullanıldığı uygulamalar ve fazla miktarda kükürt kullanılan uygulamalar olmak üzere iki şekilde modifiyer olarak kullanılmaktadır. Az miktardaki uygulamalarda kükürt bitümün seyreltilmesi işlevini görür. Fazla miktarda uygulamalarında ise kükürdün işlenebilirliği arttırdığı, silindir kullanmadan yani sıkıştırma gerekmeden, sadece finişer ile serilebilecek derecede çalışılabilir ve hizmet süresince deformasyona karşı yüksek dirençli bir karışım elde edilmektedir (Shell Bitüm el Kitabı 2004).

7.6.2. Kauçuk ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu

Polibütadien, doğal kauçuk, bütil kauçuk, klorofin, düzensiz stiren-butadien-kauçuk, vb. gibi bileşenlerin çoğu bitüm ile birlikte kullanılmakta olup, başlıca etkileri viskoziteyi artırmaktır. Genellikle kullanılmış taşıt lastiklerinden elde edilen bu malzeme bitümlü karışımlara yüksek sıcaklıklarda karıştırılarak kullanılır (Gürü ve ark. 2005).

7.6.3. Termoplastik polimerlerin ilave edilmesi yoluyla bitümlerin modifikasyonu

Termoplastik bu polimerler, ısıtıldıklarında önce yumuşarlar sonra kıvamlı akışkan haline gelirler. Polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistiren ve etilen vinil asetat (EVA) modifiye karışımlarda denenmiş olan başlıca polimerleri oluşturmaktadır.Termoplastik polimerler bitüm ile karıştırıldıklarında ortam sıcaklığında birleşerek bitümün viskozitesini artırırlar (Basan 2001).

Ancak, termoplastikler bitümün elastisitesini belirgin şekilde artıramadığı, ısıtıldıklarında ayrıştığı ve soğuma ile kaba bir dağılıma sebep oldukları belirtilmektedir. Bununla birlikte bu kısıtlamalar kabul edilerek 70 pen bitüm içerisinde % 5 EVA kullanımı oldukça yaygındır (Shell Bitüm el Kitabı 2004).

7.6.4. Termoplastik kauçukların ilavesi ile bitüm modifikasyonu

Fiziksel olarak düz ve dallanmış zincir yapısına sahip olan bu polimerler, ısıtıldıklarında önce yumuşarlar sonra kıvamlı akışkan haline gelirler. Polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistiren ve etilen vinil asetat (EVA) modifiye karışımlarda denenmiş olan başlıca polimerleri oluşturmaktadır.Termoplastik polimerler bitüm ile karıştırıldıklarında ortam sıcaklığında birleşerek bitümün viskozitesini artırırlar (Basan 2001).

Ancak, termoplastikler bitümün elastisitesini belirgin şekilde artıramadığı, ısıtıldıklarında ayrışıtığı ve soğuma ile kaba bir dağılıma sebep oldukları belirtilmektedir. Bununla birlikte bu kısıtlamalar kabul edilerek 70 pen bitüm içerisinde % 5 EVA kullanımı oldukça yaygındır(Shell Bitüm el Kitabı 2004).

7.6.5. Termoset modifiyeli bağlayıcılar

Yüksek oranda çapraz bağ içeren polimerler ısıtıldıkları zaman termoplastikler gibi yumuşamazlar ve erimezler, hatta aksine sertleşirler. Sıcaklık daha da artırılırsa doğrudan ısısal bozunmaya uğrarlar yani kimyasal olarak parçalanırlar. Bu nedenle ısıtılınca sertleşen polimerlere ısı ile sertleşen anlamına gelen termoset polimerler denir (Basan 2001).

Biri sertleştirici diğeri bir reçineden oluşan iki sıvı bileşenin kimyasal reaksiyona girmesinden termoset polimerler elde edilmektedir. Bitüm ile karıştırılan iki bileşenli epoksi reçinesi karışımları bitümünkinden çok termoset reçinelerin özelliklerini yansıtmaktadır (Shell Bitüm el Kitabı 2004).

8. BİYOKÜTLE

Biyokütle, Yunanca yaşam anlamına gelen bios'dan ve kütle anlamına gelen mass sözcüklerinden oluşan bir terimdir. Yüzyıllık periyottan daha kısa bir süreçte yenilenebilen karada ve suda yetişen bitkiler, hayvansal artıklar, besin endüstrisi ve orman yan ürünleri ile kentsel atıkları içeren tüm madde "biyokütle" olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel yakıtlarda olduğu gibi biyokütledeki enerji, hidrojen ve karbon atomlarının birleşmesiyle oluşan kimyasal enerjidir. Bu karbon ve hidrojenin kaynağı karbondioksit ve sudur. Fotosentez biyokütleyi oluşturan ilk basamaktır. Bitkiler havadaki karbondioksiti ve topraktaki suyu fotosentez yoluyla yanabilir organik bileşiklere dönüştürürler (Hıcks ve ark. 1983).

8.1.Biyokütle Kaynakları

Enerji üretiminde kullanılabilecek biyokütle kaynaklarını; bitkisel kaynaklar, hayvansal atıklar, şehir ve endüstri atıkları şeklinde sınıflandırabiliriz.

8.1.1. Bitkisel kaynaklar

Bitkisel kaynaklar olarak; orman ürünlerini, 5-10 yıl arasında büyüyen ağaç türlerini içeren enerji ormanlarını, bazı su otlarını, algleri sayabiliriz. Enerji bitkileri olan tatlı darı, şeker kamışı, mısır gibi bitkiler; diğer bitkilere göre CO2 ve suyu daha iyi kullanırlar ve kuraklığa karşı daha dayanıklıdırlar. Bu bitkilerden alkol ve değişik yakıtlar üretilmektedir. Türkiye'de, bitki artıkları (fındık ve ceviz kabuğu, ayçiçeği küspesi, pamuk çiğiti ve mısır sapı) enerji amacıyla değerlendirilmektedir. Biyokütleden yakma yolu ile enerji elde edilmesinde yanma verimi orta kaliteli bir kömüre eş değerdir. Ayrıca biyokütlelerin çoğu kömürden daha az miktarda kül ve kükürt içermektedir (URL1).

8.1.2. Hayvansal artıklar

Hayvansal gübrenin samanla karıştırılıp kurutulmasıyla elde edilen tezeğin köylerimizde yakıt olarak kullanımı ve yine hayvansal gübrenin oksijensiz ortamda fermantasyonu ile biogaz üretimi oldukça yaygındır. Ülkemizde biyogaz üretim potansiyeli 2,8-3,9 milyar m3 olarak belirlenmiştir (URL1).

8.1.3. Şehir ve endüstri atıkları

Çöplerde depolanan, yerlerinde ve evsel atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurları eğer önceden stabilize edilmemiş ve biyokimyasal aktiviteleri durdurulmamışsa, aerobik organizmalar tarafından ayrıştırılarak metan gazına dönüştürülebilirler. Bu amaçla çöp toplanan alanlarda oluşan gazları toplayacak şekilde sondaj boruları belirli bir düzene göre yerleştirilerek oluşan gazlar toplanmaktadır. Çıkan gazlar arıtılarak gaz jeneratörüne gönderilmekte ve burada elektrik elde edilmektedir. Diğer uygulama alanları ise doğal gaz sisteminde ve araçlarda yakıt olarak, kimya endüstrisinde saf metan haline getirilerek kullanılması olarak sıralanabilir. Çöp ve katı maddelerden enerji elde etmenin diğer bir yolu ise piroliz ve yüksek sıcaklıklarda yakılmalarıdır. Çöp ve katı atıkların uygun yakma tesislerinde havayla yakılması ile elde edilen enerji ısı enerjisinde veya elektrik üretiminde değerlendirilmektedir (URL1).

8.2.Biyokütleye Uygulanan Dönüşüm Süreçleri

Biyokütle, farklı süreçler uygulanarak faydalı enerji şekillerine dönüştürülebilir. Dönüşüm süreçlerini özellikle biyokütlenin miktarı ve türü, istenilen enerji şekli, çevresel standartlar, ekonomik koşullar ve uygulanan projenin özellikleri etkilemektedir. Pek çok durumda istenen enerji şeklini öncelikle uygulanan süreç ve ardından seçilen biyokütlenin türü ve miktarı belirlemektedir. Biyokütle üç ana ürüne dönüştürülebilir: güç/ısı üretimi, yakıt ve faydalı kimyasallar.

Biyokütleden enerji elde etmek için termokimyasal ve biyokimyasal yöntemler olmak üzere iki temel süreç bulunmaktadır. Kimyasal yöntemler ise biyokütleden enerji elde etmek için üçüncü bir yöntemdir (Mckendry 2002).

8.3.Termokimyasal Yöntemler

Biyokütleye yanma, gazlaştırma, sıvılaştırma ve piroliz olmak üzere dört temel termokimyasal yöntem uygulanmaktadır. Bu süreçlerden elde edilen ürünler Tablo 8.1'de verilmektedir

Tablo 8.1 . Biyokütle enerjisi dönüşüm süreçleri ve ürünleri (Ossenbrink 2004)

Dönüşüm Süreçleri	**Ürünler**
Kömürle birlikte/direkt yakma	Isı (yemek pişirme, ısıtma, proses ısısı, buhar, elektrik)
Gazlaştırma	Elektrik, ısı hidrokarbon yakıtlar, metanol, hidrojen
Piroliz/kömürle birlikte piroliz	Biyoyağ , kok, gaz
Sıvılaştırma	Sıvı yakıt
Hidroliz ve alkolik fermantasyon	Etanol
Ekstraksiyon	Biyodizel
Anaerobik sindirim	Biyogaz, metan, karbondioksit

8.3.1. Yanma

Yakma, kısaca, biyokütlenin oksijen veya hava varlığında 800-1000 °C aralığında ısıl olarak bozundurulması işlemidir (McKendry 2002). Yakma, biyokütleden ısı, elektrik ve buhar üretiminde ilk akla gelen ve uzun zamandan beri kullanılan bir yöntemdir. Dünya'daki biyoenerji üretiminin %97'si yakma teknolojileri kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Bridgwater 2003).

8.3.2. Gazlaştırma

Gazlaştırma, biyokütlenin yüksek sıcaklıklarda (800-900 °C), hava, oksijen ya da buhar varlığında gaz ürünlere dönüştürülmesidir. Elde edilen gaz ürünler CO, H_2O , CH_4, CO_2 ve N_2 gazlarının bir karışımı olup "ürün gazı" olarak adlandırılmaktadır. Gazlaştırma sonunda elde edilen bu gaz ürünler ısı, buhar ve elektrik üretiminde yakıt olarak kullanılmaktadır (McKendry 2002).

8.3.3. Sıvılaştırma

Sıvılaştırma, biyokütlenin düşük sıcaklıklarda/yüksek basınçta veya orta sıcaklıklarda/yüksek basınçta H_2 ilavesiyle, uygun katalizör ortamında, kolaylıkla satılabilir sıvı ürünlere dönüştürülmesidir. (McKendry 2002)

Sıvılaştırma işlemlerinde sıklıkla kullanılan katalizörler alkali hidroksitler ve karbonatlardır. Katalizörlerin sıvılaştırma işlemi sırasında tam olarak nasıl bir rol üstlendiklerine dair çok az tanımlama bulunmaktadır. Sıvılaştırma işlemleri genellikle yüksek basınçlı hidrojen atmosferinde gerçekleştirilmektedir (Demirbaş 2001).

8.3.4. Piroliz

Biyokütlenin sıvı, katı ve gaz ürünlere havasız ortamda ısıtılmasıyla dönüşümüne "piroliz" denilmektedir. Meydana gelen katı ürün, organik sıvı, gaz gibi ürünlerin miktarları biyokütlenin bileşimine, piroliz sıcaklığına, ısıtma hızına ve alıkonma süresine bağlı olarak değişmektedir. Düşük sıcaklık ve alıkonma süresi, katı ürünün verimini, yüksek sıcaklık ve alıkonma süreleri ise gaz ürün verimlerini arttırmaktadır. Piroliz sırasında CO, CO_2, H_2, C_2H_4, C_2H_6, gazları ve az miktarda su buharı oluşmaktadır. Hızlı piroliz yöntemi sıvı ürün verimi üretiminde en etkin yöntemdir. Yaklaşık 500 °C'de en yüksek sıvı ürün verimine ulaşılmaktadır. Eğer ani piroliz (flash) yöntemi kullanılırsa, bu sıcaklıkta % 80 oranında sıvı ürün verimine ulaşmak mümkün olmaktadır (Hıcks ve ark. 1983).

Sıklıkla sıvılaştırma ve piroliz birbiriyle karıştırılmaktadır. Tablo 8.2'de sıvılaştırma ile pirolizin karsılaştırması yapılmıştır.

Tablo 8.2 Piroliz ve sıvılaştırmanın özelliklerinin karsılaştırılması (Demirbaş 2001)

Süreç	**Sıcaklık (°C)**	**Basınç (MPa)**
Sıvılaştırma	525-600	5-20
Piroliz	650-800	0,1-0,5

8.4.Pirolizden Elde Edilen Ürünler

Pirolizden katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç çeşit ürün elde edilmektedir.

8.4.1. Katı ürün

Pirolizle katı ürün elde edilmesi çok eski zamanlardan gelen bir teknolojidir. 19.yy.'da odunun piroliziyle sıvı ürün eldesi geliştirilmiş, bu sayede asetik asit, metanol, aseton gibi kimyasallar üretilmeye başlanmıştır. Katı ürünün kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır:

- Evsel (ısınma, yemek pişirme)
- Tarımsal (tütün prosesleri)
- Metalurjik (bakır, bronz,çelik, nikel, ve elektromanganez)
- Kimyasal (CS_2, CO, sodyum siyanat, aktif karbon, karbon siyahı, gaz kimyasallar, gübre, ilaç üretimi) (Karaosmanoğlu ve ark. 1999).

8.4.2. Gaz ürün

Pirolizden elde edilen gaz ürün orta ısıl değerli bir yakıt gazı olup, güç santrallerinde, ısıtma ve kurutma işlemlerinde kullanılabilmektedir. Düşük

sıcaklıklarda, CO, CO_2, H_2O daha yüksek sıcaklıklarda ise CO, CO_2, H_2O, H_2, CH_4, C_2H_6, C_3H_8 gibi gazlar açığa çıkmaktadır (Wıllıams ve ark. 2000).

8.4.3. Sıvı ürün

Pirolizden elde edilen sıvı ürünler, su ve suda çözünen düşük molekül ağırlıklı organik bileşiklerle, biyo-yakıt olarak adlandırılan suda çözünmeyen yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir (Brıdgwater 2003).

8.5.Pirolizi Etkileyen Parametreler

Sıcaklık başta olmak üzere, ısıtma hızı, reaksiyon süresi, basınç, parçacık boyutu, piroliz ortamı, katalizör ve reaktör geometrisi piroliz verimlerini etkileyen parametrelerdir

8.5.1. Sıcaklık

Piroliz sıcaklığı uçucu maddenin miktar ve bileşimini etkileyen önemli bir parametredir. Pirolizin başlıca üç safhası vardır. 1. safha 100-300 °C arasındadır. Uçucu maddenin çıkışı çok fazla olmayıp, genellikle karbonoksitler ve su oluşmaktadır. Bozunmanın ikinci evresini oluşturan aktif safhada bütün uçucu maddenin % 75'i açığa çıkmaktadır. Üçüncü kademe ise genellikle kömür için geçerlidir. Burada katı ürün oluşumuyla birlikte ikinci bir gazlaştırma meydana gelmekte ve bunu takiben yoğuşmayan gazlardan özellikle hidrojen oluşmaktadır (Hıcks ve ark. 1983).

8.5.2. Isıtma hızı

Isıtma hızı açısından yavaş ve hızlı olmak üzere iki tür piroliz vardır. Yavaş pirolizde ısıtma hızı 1-10°C/dk mertebesinde iken hızlı pirolizde 102 °C/sn' nin üzerindedir. Hızlı pirolizde yüksek ısıtma hızından dolayı kalma süresi de düşük olup saniye hatta mili saniye mertebesindedir. Yavaş pirolizde ise kalma süresi uzun olup metalurjik kok üretiminde olduğu gibi gün mertebesine ulaşabilmektedir. Hızlı pirolizin yavaş pirolize göre avantajlarından biri de uçucu ürün veriminin yüksek olmasıdır. Çünkü yavaş pirolizde oluşan uçucu ürünler ikincil, üçüncül parçalanma reaksiyonları verebilmektedir. Hızlı pirolizin bir diğer avantajı ise bozunmanın ve bozunma ürünlerinin kontrolü açısından olup yavaş ısıtma koşullarında bozunma ürünlerinin kontrolü güçtür (Erşahan ve ark. 1996).

8.5.3. Reaksiyon süresi

Literatürde reaksiyon süresinin de piroliz ürün dağılımına etkisi olabileceği saptanmıştır. Rahman ve arkadaşları tarafından; dört farklı katı atığın pirolizi, farklı reaksiyon sıcaklıklarında ve reaksiyon sürelerinde yapılmıştır. 600 °C piroliz sıcaklığında maksimum sıvı ürün verimine ulaşılmış ve reaksiyon süresinin 35 dakikadan 5 dakikaya indirilmesi, sıvı ürün verimini %16'dan % 27,6'ya yükselttiği bulunmuştur (Rahman ve ark. 2001).

8.5.4. Basınç

Basınç uçucu madde verimini etkilemektedir. Yüksek basınç parçalanma reaksiyonlarını hızlandırarak, hafif hidrokarbon gazlarının artmasına neden olmakta, düşük basınçta ise katran ve hafif yağların verimleri daha yüksek olmaktadır (Hıcks ve ark. 1983).

8.5.5. Parçacık boyutu

Parçacık boyutu piroliz verimini etkiler ve ısıtma hızıyla ilgilidir. Büyük parçalar çok daha yavaş ısınacağından, ortalama partikül büyüklüğü sıcaklıkları daha düşük olacaktır. Böylece uçucu verimlerinin daha düşük olması beklenir. Partikül büyüklükleri yeteri derecede küçük ise düzgün bir şekilde ısınacaktır. Kömür taneciklerinde yapılan çalışmalarda elde edilen verilere göre 50 mikron altında tanecik büyüklüğünün verime etkisi yoktur (Hıcks ve ark. 1983).

8.5.6. Piroliz ortamı

Ürün dağılımı ve yapısını etkileyen diğer bir parametre de pirolizin gerçekleştiği ortamdır. Piroliz, normal, sürükleyici gaz (N_2, He gibi), hidrojen (hidropiroliz) ve su buharı gibi ortamlarda gerçekleştirilebilmektedir.

Sürükleyici gaz olarak N_2, He, Ar gibi gazlar kullanılmaktadır. Sürükleyici gaz, piroliz sırasında meydana gelen piroliz buharlarını hızlı bir şekilde ısıl parçalanma, polimerleşme ve yoğuşma gibi ikincil reaksiyonlara girmeden uzaklaştırmakta ve sıvı ürün veriminde artış sağlamaktadır (Hıcks ve ark. 1983).

8.5.7. Katalizör

Hızlı pirolizden elde edilen ürünler, katalizörlerle daha yararlı ürünlere (kimyasal ürünlere ve yakıtlara) dönüştürülebilmektedir. Zeolit katalizörleri varlığında piroliz buharları katalitik olarak parçalandığında, benzin, dizel yakıt ve diğer hidrokarbon ürünler elde edilmektedir. Katalizörün yüzey alanı, gözenek genişliği ve asitliliği katalizi etkileyen önemli parametrelerdir (Wıllıams ve ark. 2000).

9. DENEYSEL ÇALIŞMA

9.1.Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada katkısız bitüm numunelerine, atık lastik yağı katkılı numunelere ve karbon siyahı+atık lastik yağı katkılı bitüm numunelerine olmak üzere üç seri deney yapılmıştır.

Atık lastik yağı ve karbon siyahı numuneleri En-tek Geri Dönüşüm Ltd.Şti.'inden temin edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada 50/70 pen sınıfı bitüm kullanılmıştır. Deney için bitüm ağırlığının % 3 , % 6 ve % 9'u oranlarında atık lastik yağı ve karbon siyahı içeren üç ayrı karışım hazırlanmış ve sonuçlar saf bitüm değerleriyle karşılaştırılmıştır.

9.2.Penetrasyon Deneyi Sonuçları

Bu deneyde öncelikle penetrasyon cihazı düzgün bir yere yerleştirilir ve gösterge sıfıra getirilir. İstenilen ağırlıkla (genellikle 100 gr) yüklenilen iğne 25 °C' de numunenin yüzeyine değecek şekilde ayarlanır. İğne belirli bir zaman aralığında (5 saniye) serbest bırakılır. Zaman bitiminde penetrasyon değeri göstergeden okunur. İğnenin desimilimetre (0.1 mm.) miktarında batma derinliği penetrasyon değerini belirler. Penetrasyon deneyi Selçuk Üniversitesi Ulaştırma Anabilim dalı Laboratuarında standartlara uygun olarak yapılmıştır. Penetrasyon deney aleti Şekil 9.1.'de gösterilmiştir.

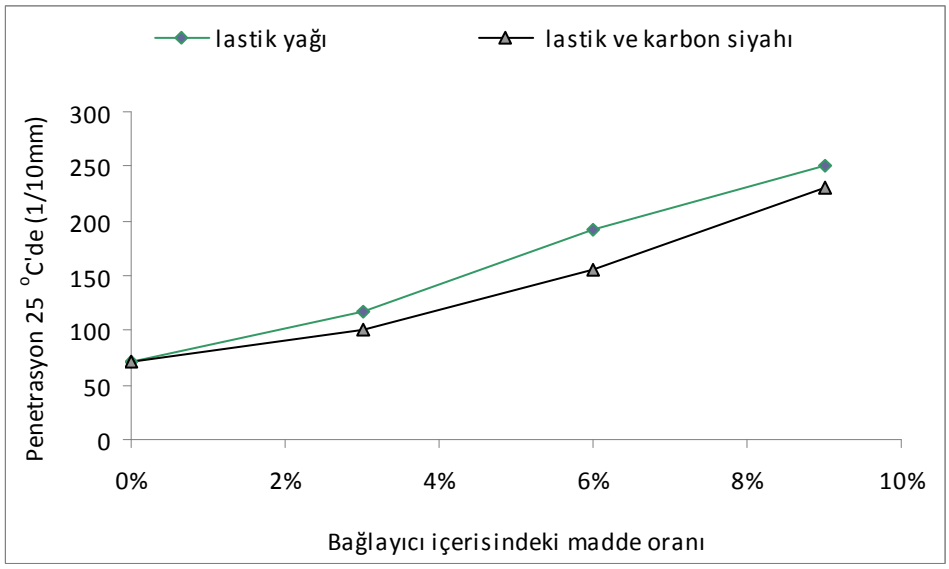


Şekil 9.1. Penetrasyon deney aleti

Penetrasyon deneyi için bitüm içerisine karıştırılan farklı oranlardaki atık lastik yağı ve karbon siyahı miktarı yüzde cinsinden verilmiş, her bir oran için 4 okuma yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Elde edilen penetrasyon değerlerine ait sonuçlar Tablo 9.1' de grafik ise Şekil 9.2.'de verilmiştir.

Tablo 9.1 Penetrasyon deneyi sonuçları

Bağlayıcı içerisindeki madde oranı	**% 0**	**% 3**	**% 6**	**% 9**
	Penetrasyon değeri (1/10 mm)			
Lastik yağı	71,5	116,75	192,75	250
Lastik ve karbon siyahı	71,5	100,75	156,25	231



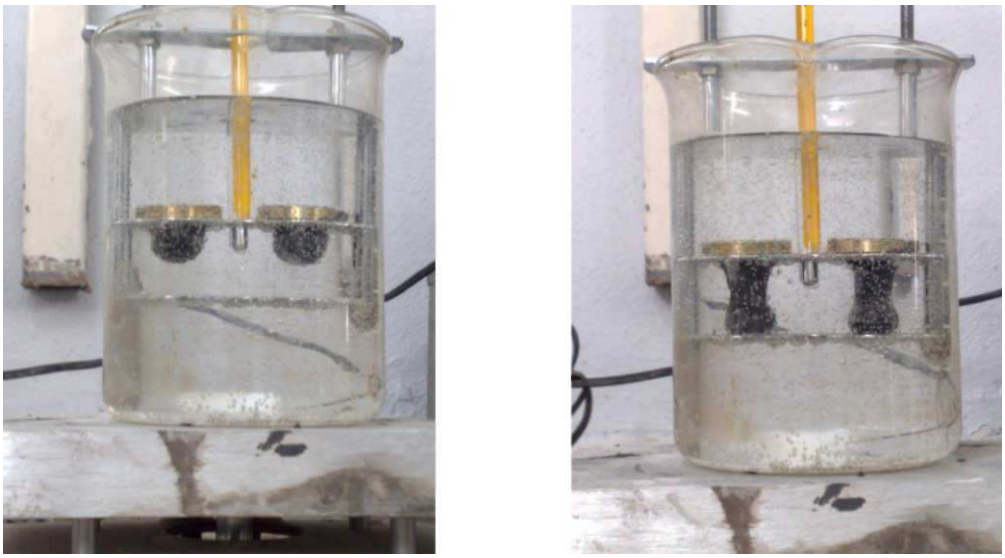
Şekil 9.2.Orijinal, lastik yağı ve lastik yağı+karbon siyahı katkılı bitümlü karışımın penetrasyon değerlerindeki değişim

Yapılan deney sonucunda katkı olarak kullanılan atık lastik yağının, ve lastik yağı+karbon siyahının bağlayıcı penetrasyon değerini arttırdığı görülmektedir. Karbon siyahı, karışımın penetrasyon değerini sadece lastik yağı katkısına göre biraz daha düşük çıkarmaktadır. Penetrasyon değerinin artması bitümün daha yumuşak bir kıvama gelmesini sağlayacaktır. Bu ise çok düşük sıcaklıklardaki uygulamalar için atık lastik yağının katkı maddesi olarak kullanılabileceği, işleme kolaylığı getireceği, düşük sıcaklıklardaki çatlama ve kırılmaları önleyebileceği sonuçlarına ulaştıracaktır.

9.3.Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Penetrasyon dereceli bir bitümün kıvamı, penetrasyon miktarının yanı sıra yumuşama noktasının tayin edilmesiyle de ölçülmektedir. 16 mm çapında ve 6,4 mm kalınlığında pirinç bir yüzük yağlandıktan sonra, deneye tabi tutulacak bitümlü malzeme eritilerek pirinç yüzüğe doldurulur. Bitüm soğutulduktan sonra taşan kısımları ısıtılmış bir spatula ile kesilip alınır. bitüm üzerine 3.5 g ağırlığında çelik bir bilye yerleştirilir. Malzeme su banyosunda deney süresince askıda tutulur. Yumuşama noktası 80 °C' nin üzerinde olan bitümler için su yerine gliserin kullanılır. Banyo sıcaklığı dakikada 5 °C arttırılır ve bunun sonucunda bitüm yumuşar ve üzerindeki

bilyenin ağırlığıyla deforme olmaya başlar. Bitüm ile bilye halkanın 25 mm altında bulunan bir plakaya değdiği anda, suyun sıcaklığı kaydedilir. Deney bir daha tekrarlanır ve ölçülen sıcaklık 0.2 °C göre kaydedilir. İki sonuç arasındaki fark 1 °C' den fazla ise deney tekrarlanır. Yumuşama Noktası deney düzeneği Şekil 9.3.'de gösterilmiştir.

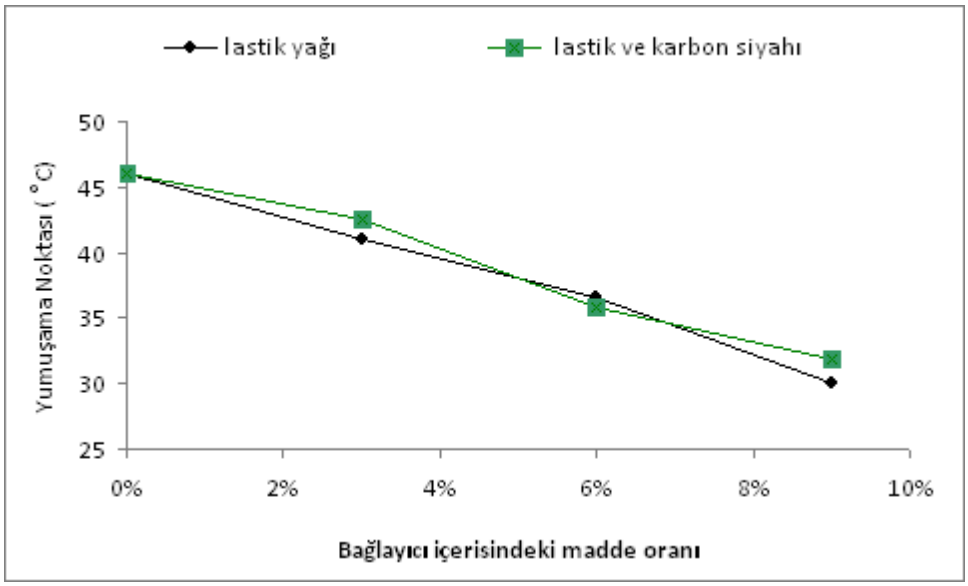


Şekil 9.3. Yumuşama noktası deney düzeneği

Tablo 9.2'de bitüm içerisine karıştırılan atık lastik yağı ve karbon siyahı oranları ve yumuşama noktası sıcaklıkları verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yumuşama noktası değerlerine ait grafik Şekil 9.4.'de verilmiştir. Yumuşama Noktası Deneyi Selçuk Üniversitesi Ulaştırma Anabilim dalı Laboratuarında standartlara uygun olarak yapılmıştır.

Tablo 9.2 Bitümlü bağlayıcılar üzerine yapılan yumuşama noktası deney sonuçları

Bağlayıcı içerisindeki madde oranı	**% 0**	**% 3**	**% 6**	**% 9**
	Yumuşama Noktası (°C)			
Lastik yağı	46	41	36,65	30,1
Lastik ve karbon siyahı	46	42,6	35,8	31,9



Şekil 9.4.Orijinal, lastik yağı ve lastik yağı+karbon siyahı katkılı bitümlü karışımın yumuşama noktasındaki değerlerindeki değişim

Yapılan deney sonucunda katkı olarak kullanılan atık lastik yağının, ve lastik yağı+karbon siyahının bağlayıcının yumuşama noktası değerini azalttığı görülmektedir. Yumuşama noktasının azalması yüksek sıcaklıklarda deformasyonu erken başlatacak gibi görünse de düşük sıcaklık deformasyonlarının azalacağı beklenmekte olup, çok düşük sıcaklıklardaki çatlama ve kırılmaların önlenebileceği düşünülmektedir.

9.4.Superpave Deney Sonuçları

Bitümlü sıcak karışım tabakalarında uygun bağlayıcı kullanılmaması sonucu yüksek sıcaklıklarda başlıca tekerlek izi olmak üzere birçok bozulma meydana gelmektedir.

Superpave sisteminde bitümlü bağlayıcıların kısa süreli yaşlanma özelliklerini belirlemek amacıyla dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) deneyi kullanılmaktadır. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi kullanılarak bağlayıcıların

tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımları belirlenirken bağlayıcıların düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımını tespit etmek amacıyla kiriş eğilme reometresi (BBR) deneyi kullanılmaktadır.

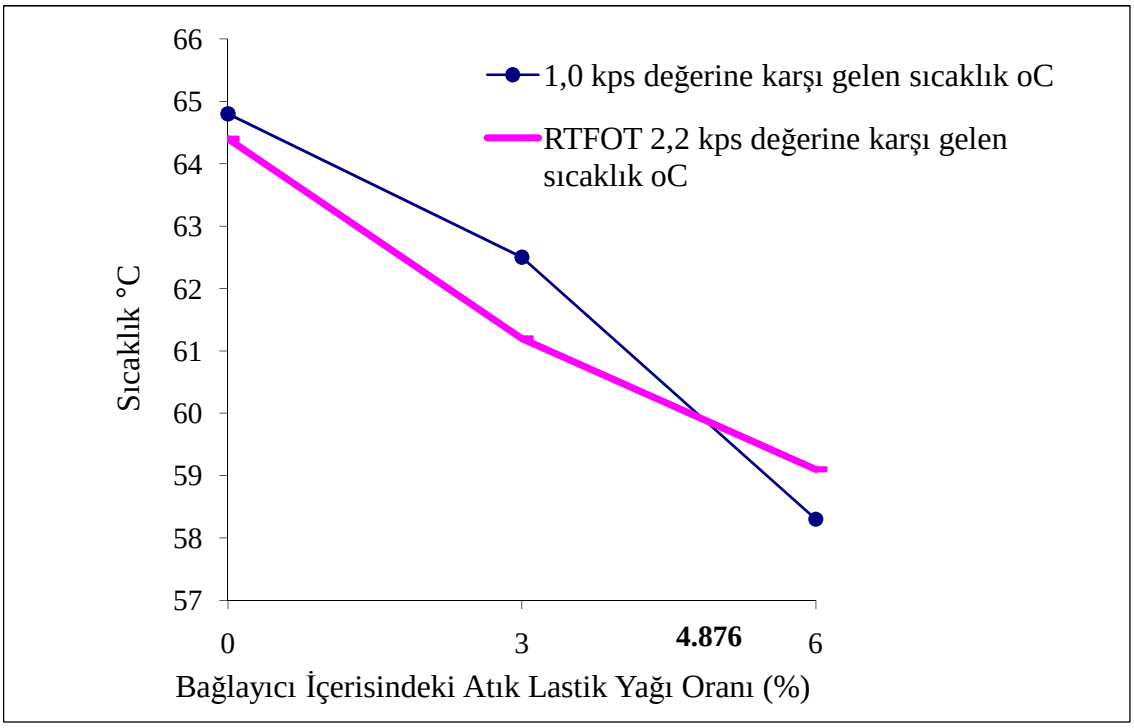
9.4.1. Dinamik kesme reometresi (DSR) deney sonuçları

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) orta ve yüksek servis sıcaklıklarında bitümlü bağlayıcıların özelliğini karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu deney ile kaplama ömrü boyunca yüksek servis sıcaklıklarında tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım değerlendirilebilmektedir. DSR aynı zamanda servis ömrünün ilerleyen dönemlerinde orta servis sıcaklıklarında yorulma çatlağı oluşumuna karşı dayanımın belirlenmesini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla işlem görmemiş (yaşlandırılmamış) ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılır. DSR deney aleti Selçuk Üniversitesinde bulunmadığı için Karayolları Genel Müdürlüğü Bitümlü Karışımlar Laboratuarında yapılmıştır. DSR deneyinde 50/70 pen. katkısız bitüm ve ağırlıkça % 3, % 6 oranlarında atık lastik yağı katkılı bitümlü karışım kullanılmıştır.

Bu deneyde yaşlandırılmamış ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılara uygulanan DSR deneyleri sonucunda tekerlek izi dayanım göstergesi olan $G^*/\sin\delta$ değerinin işlem görmemiş bağlayıcılar için en az 1.0 kPa, RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılarda ise en az 2.20 kPa olması istenmektedir. Tablo 9.3'de yaşlandırılmamış bağlayıcıların ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ sınırındaki sıcaklık değerleri verilmiştir. Şekil 9.5'de ise bu sonuçlar grafiksel olarak ifade edilmiştir.

Tablo 9.3. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcıların G*/sinδ sınırındaki sıcaklık değerleri

Bağlayıcı Türü	Katkısız Bitüm (50/70 pen.)	%3 Atık Lastik Yağı Katkılı Bitüm	%6 Atık Lastik Yağı Katkılı Bitüm
G*/sinδ =1 kpa sonucuna karşılık gelen sıcaklık (°C)	64,8	62,5	58,3
G*/sinδ =2.2 kpa sonucuna karşılık gelen sıcaklık (°C) (RTFOT)	64.4	61,2	59,1



Şekil 9.5. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcıların G*/sinδ sınırındaki sıcaklık değerlerinin grafiksel olarak gösterimi

DSR deneyi sonucunda, 50/70 pen. bitüm içerisinde kullanılan atık lastik yağı miktarı arttıkça tekerlek izine karşı dayanımın azalacağı görülmektedir.

Yaşlandırılmadan önce katkısız bitümün 64.8°C'de, %3 atık lastik yağı içeren modifiye bitümün 62.5°C ve %6 atık lastik yağı içeren modifiye bitümün 58.3°C sıcaklıkta Superpave şartnamelerini sağladığı tespit edilmiştir.

Yaşlandırılmadan sonra ise katkısız bitümün 64.4°C'de, %3 atık lastik yağı içeren modifiye bitümün 61.2°C ve %6 atık lastik yağı içeren modifiye bitümün 59.1°C sıcaklıkta Superpave şartname değerlerini sağladığı tespit edilmiştir.

Şekil 9.5.'de verilen grafik incelendiğinde yaşlandırma sonrası katkısız bitümün sıcaklık dayanımında % 0.62 oranında düşüş, %3 atık lastik yağı içeren modifiye bitümün sıcaklık dayanımında % 2.08 oranında düşüş gözlenirken % 6 atık lastik yağı içeren modifiye bitümün sıcaklık dayanımında % 1.37 oranında artış görülmüştür. Şekil 9.5 deki grafikten bitüme % 4.86 oranında atık lastik ilave edildiği noktada yaşlanmanın olmadığı görülmüştür.

Deney sonuçlarından elde edilen veriler ışığında, atık lastik yağı katkılı karışımın, RTFOT yaşlandırması sonrasında katkısız malzemeye göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Böylelikle bitüm içerisindeki atık lastik yağı miktarı arttıkça yaşlanma etkileri azalmakta, atık lastik yağı katkısı bitümü gençleştirmektedir.



Şekil 9.6. DSR deney aleti

9.4.2. Kiriş eğilme reometresi (BBR) deney sonuçları

BBR deneyinde RTFOT deneyi ile yaşlandırılmış numuneler kullanılmıştır. Böylelikle servis durumundaki, karışım ve serme sırasındaki bitümün durumu deneyde temsil edilmiş olur. Deney bilgisayar kontrollü yapılmış ve yine bilgisayar tarafından anlık zaman-deformasyon ile zaman-sünme sertliği grafikleri çizilerek 60 sn sonundaki sünme sertliği "S" ve sünme oranı "m" hesaplanmıştır. RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcıların S ve m değerleri Tablo 9.4' de verilmiştir.

Tablo 9.4. DSR deney sonuçları

Katkı oran / katkı tipi				**Katkısız Bitüm**	**% 3.0 Atık Lastik**	**% 6.0 Atık Lastik**
Eğilme - Sünme Rijitliği Tayini **(BBR)** (S ≤ 300 MPa m ≥ 0,300)	Sıcaklık	−12 °C	S	193*	72,6	56
			m	0,320*	0,421	0,457
		−18 °C	S	345*	197	173
			m	0,259*	0,332	0,339
		−24 °C	S	-	478	419
			m	-	0,252	0,267

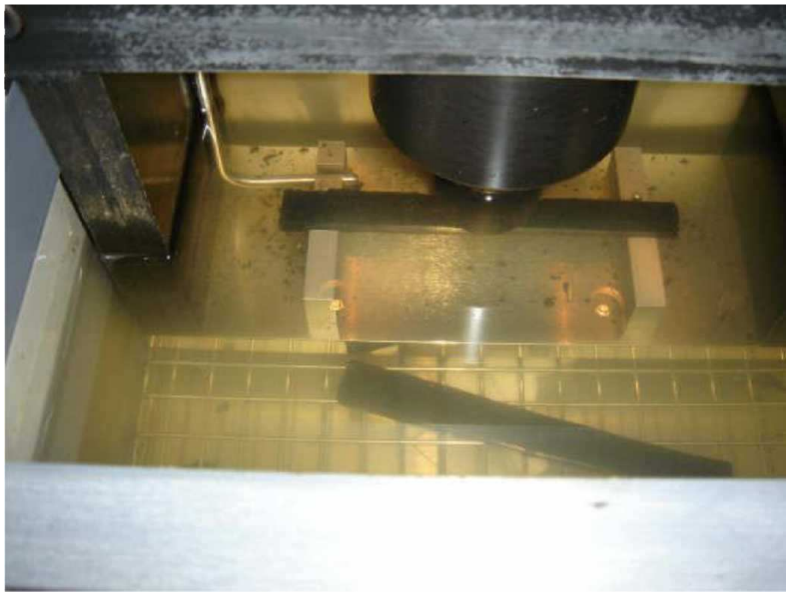
* PAV deneyi sonrasında uygulanan BBR deneyi için elde edilen değerler

Sünme sertliği S, bitümün sünme yüklerine karşı gösterdiği direnç olup, m değeri yükleme süresi boyunca bitüm sertliğindeki değişimi ifade etmektedir. BBR deneyi Karayolları Genel Müdürlüğü Bitümlü Karışımlar Laboratuarı'nda yapılmıştır. Şekil 9.7.'de BBR deney aleti, Şekil 9.8.'de ise BBR deneyi kiriş numunesi gösterilmiştir.



Şekil 9.7. BBR deney aleti

Termal çatlakları tahmin etmek için uygulanan ve sünme sertliğinin ölçüldüğü BBR deneyinde sünme sertliği Superpave Şartnamesinde maksimum 300 MPa, Zamana karşı sünme sertliğinin değişimini ifade eden m değerleri ise şartnamede minimum 0.300 olarak sınırlandırılmıştır.



Şekil 9.8. BBR deneyi kiriş numunesi

Deney genellikle sıfırın altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve sabit yük uygulanan kiriş şeklindeki bitüm çubuğunun, bu yük altında zaman içindeki sehimi izlenir. Deney sıcaklığı, bitümün servis durumundaki karşılaşacağı en düşük sıcaklığa göre değişir.

RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcıların deney sonuçlarından, bitüm içerisine % 3 oranında karıştırılan atık lastik yağı için -12 °C, -18 °C ve -24 °C' de S değerleri sırasıyla 72.6, 197 ve 478 olarak belirlenmiştir. Bitüm içerisine % 6 oranında karıştırılan atık lastik yağı için ise -12 °C, -18 °C ve -24 °C' de S değerleri sırasıyla 56, 173 ve 419 olarak belirlenmiştir. Bu durum sıcaklık düştükçe modifiye bitümün sünme sertliğinin arttığının ve bitümün kırılgan bir davranış sergilediğinin göstergesidir.

Sünme oranı için elde edilen deney sonuçlarından bitüm içerisine % 3 oranında karıştırılan atık lastik yağı için -12 °C, -18 °C ve -24 °C' de m değerleri sırasıyla 0.421, 0.332 ve 0.252 olarak belirlenmiştir. Bitüm içerisine % 6 oranında karıştırılan atık lastik yağı için -12, -18 ve -24 °C' de m değerleri ise sırasıyla 0.457, 0.339 ve 0.267 olarak belirlenmiştir. Böylece sıcaklık düştükçe katkılı bitümün sünme oranının azaldığını gözükmektedir. m değerleri azaldıkça bağlayıcıda daha fazla sertleşme görülür. Sertlikteki bu artış termal çatlamalar oluşmasına neden olur.

9.4.3. Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deney sonuçları

Bu deneyde asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın birleşik etkisi değerlendirilmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişim tespit edilebilmektedir. TS EN 12607-1'de belirtilen bu deney, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır. RTFOT deneyi Karayolları Genel Müdürlüğü Bitümlü Karışımlar Laboratuarında yapılmıştır. RTFO deney aleti Şekil 9.9.'da verilmiştir



Şekil 9.9. Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deney aleti

Yaşlandırma deneyinde kullanılan 8 şişeden 2'si kütle kaybının tespitinde 6'sı ise deneylerde kullanılacak malzemelerin temininde kullanılmıştır. Orjinal ve modifiye edilmiş bağlayıcılarda meydana gelen kütle kaybı değerleri Tablo 9.5' de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, atık lastik yağı oranı arttıkça kütle kayıplarının arttığı kanaatine varılmıştır.

Tablo 9.5. Bağlayıcılarda RTFOT yöntemiyle yaşlandırılma sonrasında meydana gelen kütle kayıpları

Bağlayıcı Türü	**Kütle Kaybı (%)**
Katkısız 50/70 pen. Bitüm	0.11
Atık lastik yağı katkı oranı %3 olan Bitümlü bağlayıcı	1.0
Atık lastik yağı katkı oranı %6 olan Bitümlü bağlayıcı	1.9

AASHTO T240 standardına uygun olarak yapılan RTFOT deneyi sonucunda herhangi bir bitüm için kütle kaybı %1.00 den fazla olmamalıdır.

Bu deney sonucunda bitüm içerisine % 3 oranında karıştırılan atık lastik yağı ile elde edilen modifiye bağlayıcı için kütle kaybı % 1 olarak bulunmuş ve şartname sınırı dahilinde kalmıştır. Ancak %6 oranında katkı içeren karışım için kütle kaybı %1.9 olarak ölçülmüş bu durumda da şartname sınırları dışına çıkmıştır.

9.4.4. PG Sınıfının Belirlenmesi

Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (SUPERPAVE) yönteminde bitümler, sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılmıştır. Bu nedenle bu tür bitümlü bağlayıcılara "Performans Sınıfı (Performance Grade)" bitüm adı verilmiş ve PG simgesi ile tanımlanmıştır. Sistemde, bitümün tanımlanması için yapılan deneylerde bitümden beklenen özellikler aynıdır. Ancak bu özelliklerin beklendiği sıcaklıklar farklılık gösterir. Yani, performans sınıfı bitümlerde fiziksel özellikler sabit kalır ancak, bu özelliklerin elde edileceği sıcaklıklar bitümün kullanılacağı yerdeki iklim şartlarına göre farklılık gösterir (Öztürk ve Çubuk 2004).

Bu çalışmada RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış, %3 ve %6 atık lastik yağı içeren modifiye bitümün performans sınıfı PG 58-28 olarak belirlenmiştir.

Termal çatlama yönünden, katkısız bitüm -22 °C' ye kadar direnç gösterirken, %3 ve %6 atık lastik yağı içeren modifiye bitüm -28 °C' ye kadar direnç gösterebilmektedir. Tablo 9.6’da katkısız bitüm ve atık lastik yağı katkılı bitüm için belirlenen PG sınıflandırması verilmiştir.

Tablo 9.6. Katkısız bitüm ve atık lastik yağı katkılı bitüm için belirlenen PG sınıflandırması

BİTÜM		**Orijinal Bitüm Deneyleri**				**RTFOT Sonrası Bitüm Deneyleri**			SINIFI
				DSR (G*/sinδ>1kpa)			DSR (G*/sinδ>2.2kpa)		
Rafinerisi	Sınıfı	Penetrasyon	Yumuşama Noktası °C	Yenilme Sıcaklığı °C	Sınıfı	Kütle Kaybı, %	Yenilme Sıcaklığı oC	Sınıfı	
İzmit	B 50/70	71.50	46	64.8	64	0.11	64.4	64	PG 64-22
%3 Atık lastik yağı katkılı		116.75	41	62.5	58	1.00	61.2	58	PG 58-28
%6 Atık lastik yağı katkılı		192.75	36.65	58.3	58	1.90	59.1	58	PG 58-28

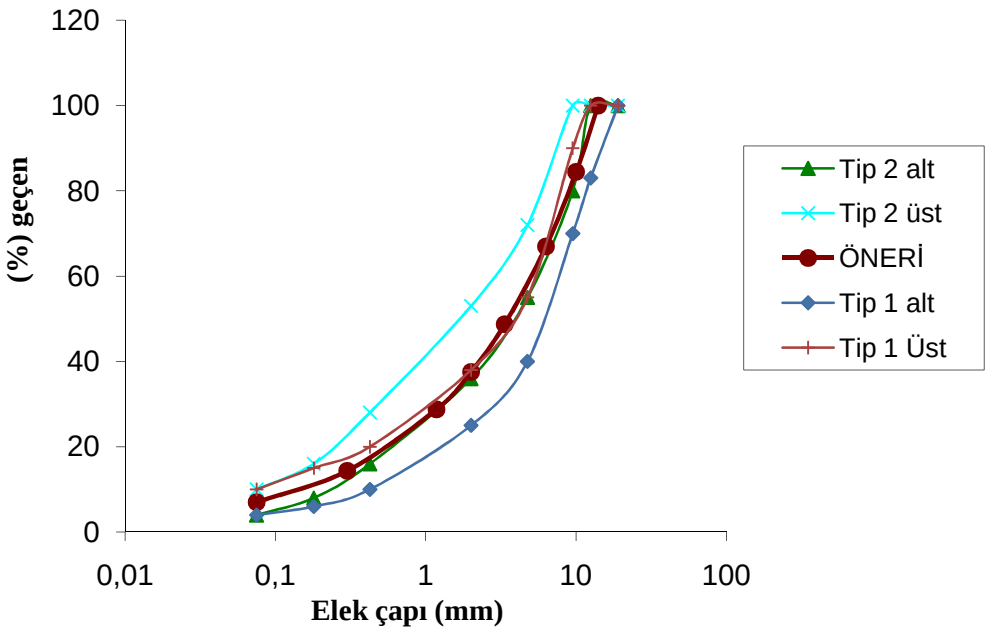
9.5.Marshall Deneyinin Yapılması

Sıcak karışımların stabilitesinin ölçülmesi için yapılan bu deneyde kullanılan agrega ve bitüm Selçuklu Belediyesi Asfalt şantiyesinden temin edilmiştir. Bu dizayn aşınma tabakası için yapılacaktır.

9.5.1. Elek analizi ve her dane çapından gerekli oranda alınıp agrega numunelerinin hazırlanması

Elek analizinde 20, 14, 10, 6.3, 3.35, 2.0, 1.18, 0.3, 0.075 numaralı elekler kullanılmıştır. Agregalar kuru halde elenmiş, önerdiğimiz granülometri eğrisine göre 2400 gramlık (2 numunelik) agrega serileri oluşturulmuştur. Önerilen gradasyon

Karayolları Teknik Şartnamesinde istenen tip 1 ve tip 2 eğrileri arasında kalmıştır Tablo 9.7' de gösterilen ağırlıklarda hazırlanan numuneler 180°C de 1 gün etüvde bekletilmiştir.



Şekil 9.10. Marshall deney numunelerinin agrega granülometri eğrisi

Tablo 9.7. Marshall deney numunelerinin granülometri değerleri

Elek Çapı (mm)	Geçen (%)	Kalan (%)	Geçen (gr)	Kalan (gr)
20	100	0	2400,00	0
14	100	0	2400,00	0
10	84,46	15,53	2027,04	372,72
6,3	66,96	17,49	1357,31	419,76
3,35	48,74	18,22	661,55	437,28
2	37,58	11,15	248,61	267,6
1,18	28,78	8,79	71,55	210,96
0,3	14,34	14,44	10,26	346,56
0,075	7	7,34	0,72	176,16
Tava		7		168
			Toplam	2400



Şekil 9.11. Agrega elekleri ve eleme makinesi



Şekil 9.12. Dane çaplarına göre sınıflandırılmış agregalar.

9.5.2. Agregaya katılacak bağlayıcı oranının tayini

Orijinal bitüm ile yapılacak karışımın hazırlanmasında %3.5, %4, %4.5, %5, %5.5, %6 oranlarında bitüm kullanılmıştır. Bitüm deneye başlanmadan en az 1 saat önceden 180°C lik etüvde ısıtılmaya bırakılmıştır. Atık lastik yağı katkılı bitümlü karışımın hazırlanmasında, şekil 9.5 te gösterilen RTFOT sonrası yaşlanmanın en az olduğu optimum yağ oranı olan % 4.876 seçilmiştir. Bu oranda bir miktar bitümle karıştırılan atık lastik yağı aynı bağlayıcı yüzdeleriyle agregaya karıştırılarak deneyin ikinci adımını oluşturmuştur.

Tablo 9.8. Marshall deneyinde kullanılacak bağlayıcı miktarları

Bitüm veya (Bitüm+Atık yağ) Yüzdesi (%)	**Sıcak karışım toplam ağırlığı (Agrega+bağlayıcı) (gr.)**	**Bitüm veya (Bitüm+Atık yağ) ağırlığı (gr.)**
3,50	2487	87
4,00	2500	100
4,50	2513,1	113,1
5,00	2526,3	126,3
5,50	2539,7	139,7
6,00	2553,2	153,2



Şekil 9.13. Atık lastik yağı numunesi

9.5.3. Marshall test briketlerinin hazırlanması

Etüvde bekletilen agrega numuneleri karıştırma işleminin yapılacağı ısıtma kabına alınmıştır. Kap+agreganın darası alınıp hangi oranda karışım yapılacaksa o oranda bağlayıcı hassas terazi yardımıyla ilave edilerek 150 °C sıcaklıkta karışım homojen oluncaya kadar kürek yardımıyla karıştırılmıştır. Oluşturulan bu karışım önceden etüvde ısıtılan silindirik numune kaplarına yaklaşık 1200 er gram olarak doldurulmuştur. Her bağlayıcı oranı için 4 adet numune hazırlanmıştır. Numuneler biraz sıkışması için dıştan içe doğru 25 vuruş miktarı şişlenmiştir. Numunelerin alt ve üst yüzeylerine filtre vazifesi görmesi için dairesel kağıtlar konulmuştur. Şişlenen numuneler bekletilmeden Marshall tokmağına yerleştirilip her iki yüzüne de 75 adet vuruş yapılmıştır. Bu işlemin ardından silindirik numuneler kriko yardımı ile kaplarından çıkarılıp tebeşir yardımıyla % kaç bağlayıcı ve kaçıncı numune olduğu yazılmıştır.



Şekil 9.14. Isıtma kabı ve sıcak karışım



Şekil 9.15. Marshall briketi numune kapları



Şekil 9.16. Marshall tokmağı



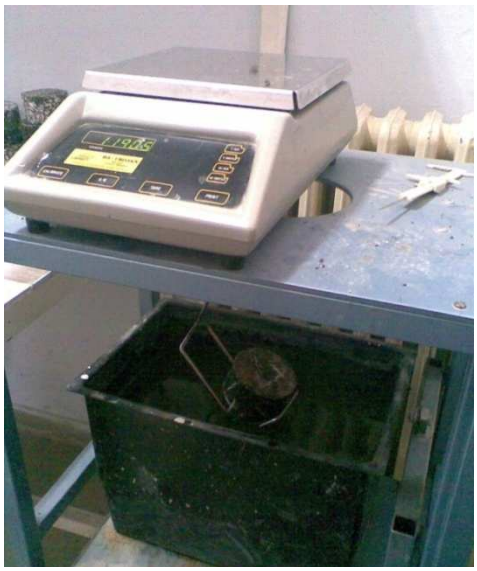
Şekil 9.17. Marshall test briketleri

9.5.4. Briket yüksekliklerinin ölçülmesi, havada ve sudaki ağırlıklarının bulunması

Marshall briketlerinin üç farklı noktasından kumpas ile yükseklik ölçümü yapılıp bu değerler not edilmiştir. Bu işlemin ardından numuneler havada ve suda tartılarak ağırlık değerleri bulunmuştur.



Şekil 9.18. Marshall test briketlerinin yükseklik ölçümü



Şekil 9.19. Marshall test briketlerinin havada ve suda ölçülmesi

Ölçümleri yapılan briketler 60°C ye kadar ısıtılmış sıcak su havuzunda 30 dk.beklemeye bırakılmıştır.



Şekil 9.20. Sıcak su havuzu

9.5.5. Marshall test cihazında stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesi

Sıcak su havuzundan çıkarılan numuneler vakit geçirilmeden test cihazının alt segmanının ortasına yerleştirilmiştir. Üst segman da bunun üzerine tespit edilmiştir. Bu tertibat tazyik makinesine yerleştirilmiştir. Yükleme işlemi başlamadan makinenin dijital göstergesinden yük ve deplasman değerleri sıfırlanmıştır. Numunelere dakikada 2 inçlik sabit bir yük tatbik edilmiş ve bu işe numune kırılana kadar devam edilmiştir. Kırılma anında yük göstergesinden maksimum yük, deplasman göstergesinden de akma değeri tüm numuneler için ölçülmüştür.



Şekil 9.21. Marshall test cihazı

9.5.6. Orjinal ve modifiye bitümlerin marshall stabilite deneyi sonuçları

Bağlayıcı tabakası ve ağır trafikli yollara göre hazırlanan numunelerin test sonuçlarına bakıldığında atık lastik yağı stabiliteyi orijinal bitüme göre düşürmüştür. Bunun yanında % 4, % 5.5, % 6 bağlayıcı oranlarının olduğu numunelerde atık lastik yağı katkısı akma miktarını azaltmıştır. Tablo 9.9 da ki sonuçların tamamı incelendiğinde bağlayıcı oranının % 6 ya kadar olan kısmında stabilite şartname limitini sağlamaktadır.

Atık lastik yağı katkılı % 4, %5.5, %6 oranındaki bitümün akma miktarı katkısız bitümden daha az çıkmıştır. Özellikle % 4 oranındaki katkılı bitüm hem stabilite hem de akma değerleri olarak şartnameyi sağlamaktadır. Akma değerinin küçük olması kaplamanın plastik deformasyonlara olan direncini artırmaktadır.

Marshall deneyine ait kapsamlı tablo ve grafikler Ek'ler bölümünde sunulmuştur.

Tablo 9.9. Orjinal ve modifiye bitümlerin Marshall stabilite ve akma değerleri

	% Bitüm	**Katkısız Bitüm**	**Atık lastik yağı katkılı bitüm**
Marshall Stabilitesi (kg) (en az 900)	3,5	2356	1606
	4	2427	1648
	4,5	1891	1208
	5	1397	1115
	5,5	1172	1016
	6	879	862
Akma (mm) (2-4 arası)	3,5	3,15	3,18
	4	3,78	3,34
	4,5	3,87	5,19
	5	5,05	5,56
	5,5	6,79	6,03
	6	8,34	7,04

9.5.7. Optimum bağlayıcı oranının bulunması

Marshall deneyine tabi tutulan numuneler için:
Birim hacim ağırlık— % bağlayıcı
Boşluk oranı— % bağlayıcı
stabilite— % bağlayıcı
Akma—% bağlayıcı
VMA—% bağlayıcı
Vfb—% bağlayıcı
grafikleri Ek'lerde sunulmuştur.

Tablo 9.10. Asfalt betonu dizayn kriterleri (T.C.K Karayolu Şartnamesi 2006)

Özellikleri	Binder		Aşınma	
	Min.	Maks.	Min.	Maks
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	75		75	
Marshall stabilitesi (kg.)	750	—	900	—
Boşluk (%)	4	6	3	5
Asfaltla dolu boşluk (%)	60	75	65	75
Agregalar arası boşluk (VMA) %	13	—	14	—
Akma (mm)	2	4	2	4
Filler/ Bitüm oranı	—	1.4	—	1.5
Bitüm (ağırlıkça, 100'e)	3.5	6.5	4	7

Karayolu kaplamalarında asfalt betonu dizayn edilirken Tablo 9.10 da verilen limitler dahilinde karışım hazırlanmalıdır. Bu çalışma dahilide yapılan Marshall deneyi sonucunda elde ettiğimiz grafiklerden, orjinal ve atık lastik yağı katkılı bitümlü karışımlar için maksimum stabilite, maksimum birim hacim ağırlık, %4 boşluk oranı, %70 asfalt ile dolu agrega boşluğu oranı (Vfb), minimum VMA, 3.5 mm akma değerlerine karşılık gelen bağlayıcı yüzdeleri bulunup aritmetik ortalamaları alınarak optimum bağlayıcı oranı tespit edilmiş ve Tablo 9.11'de sonuçları verilmiştir.

Tablo 9.11. Asfalt karışım dizaynı için uyulması gereken kriterlerin sağlandığı bağlayıcı oranları

	Maksimum Stabilite (Kg.)	Maksimum Birim Hacim Ağırlık (gr/cm3)	% 4 Boşluk	% 70 Vfb	Minimum VMA %	3,4 mm Akma	**Optimum Bağlayıcı Oranı (%)**
Orijinal Bitüm Oranı (%)	4	4,5	4,2	4,1	4,2	3,7	**4,11**
Atık Lastik Yağı Katkılı Bitüm Oranı (%)	3,7	4,3	4,15	4,1	3,5	4,1	**3,97**

10. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada bitüm modifikasyonuna farklı bir bakış açısı getirdiği düşünülen atık lastik yağı ve karbon siyahının katkı maddesi olarak değerlendirilmesi ve bitümlerin performansları üzerindeki etkisinin incelenmesiyle bağlayıcıların performansı araştırılmıştır.

Literatür çalışmasında örnekleriyle verildiği gibi atık lastikler ya bitümün içerisine karıştırılmış yada doğrudan sıcak karışımın içerisine katılmıştır.

Bu tez çalışması atık lastiğin piroliz yöntemiyle sıvılaştırılıp bitümde kullanılması noktasında yapılan ilk çalışmadır.

Bu amaçla katkısız 50/70 pen. bitüm numunesinin ve ağırlıkça % 3 , % 6, % 9 oranlardaki atık lastik yağı katkılı modifiye bitümlere yumuşama noktası, penetrasyon deneyleri yapılmıştır. Daha sonra bitüm numunesine ağırlıkça % 3 , % 6 oranlarında atık lastik yağı eklenerek yaşlandırmadan önce ve sonra dinamik kesme reometresi, dönel ince film halinde ısıtma deneyi, kiriş eğilme reometresi deneyleri yapılarak bitüm reometre sonuçları incelenmiştir. Son aşamada, Şekil 9.5 deki grafiğe istinaden yaşlanmanın olmadığı % 4.86 oranında, bitüme atık lastik yağı ilave edilmiştir. Oluşan katkılı bitüm bağlayıcı olarak sıcak karışımlarda kullanılmış ve Marshall stabilite deneyi yapılarak sonuçları irdelenmiştir.

Hazırlanan katkısız 50/70 pen. bitüm numunesi ve ağırlıkça % 3, % 6, % 9 oranlardaki atık lastik yağı katkılı modifiye bitümler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, katkı olarak kullanılan atık lastik yağının, bağlayıcının penetrasyon değerini arttırdığı, yumuşama noktası değerini ise düşürdüğü görülmektedir. Karbon siyahı, karışımın penetrasyon değerini sadece atık lastik yağı katkısına göre biraz daha düşük çıkarmaktadır. Penetrasyon değerinin artması bitümün daha yumuşak bir kıvama gelmesini sağlayacaktır. Bu ise çok düşük sıcaklıklardaki uygulamalar için atık lastik yağının katkı maddesi olarak kullanılabileceği, işleme kolaylığı getireceği, düşük sıcaklıklardaki çatlama ve kırılmaları önleyebileceği sonuçlarına ulaştıracaktır. Yumuşama noktasındaki azalma yüksek sıcaklık deformasyonunun erken başlayacağını gösterse de düşük sıcaklık deformasyonlarını azaltarak, çok düşük sıcaklıklardaki çatlama ve kırılmaları önleyebileceği düşünülmektedir.

Karayolları Genel Müdürlüğünde yaptırılmış olan DSR deney sonuçlarından, 50/70 pen. bitüm içerisinde kullanılan atık lastik yağı içeriği arttıkça tekerlek izine karşı dayanımın azaldığı sonucu çıkmaktadır.

Bitümlü bağlayıcılarda oluşan kısa süreli yaşlanmayı laboratuar ortamına taşımak amacıyla RTFOT yöntemi kullanılmıştır. Saf ve modifiye bağlayıcılarda meydana gelen kütle kaybı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, atık lastik yağı oranı arttıkça kütle kayıplarının arttığı tespit edilmiştir.

Katkısız 50/70 pen. bitüm numunesinin ve ağırlıkça % 3 ve % 6 oranlardaki atık lastik yağı katkılı modifiye bitümler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, katkısız bitümün performans sınıfı PG 64-22, %3 ve %6 atık lastik yağı içeren modifiye bitümün performans sınıfı PG 58-28 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle atık lastik yağı katkılı modifiye bitümlerin soğuk iklimli bölgelerde kullanılmasının uygun olduğu düşünülmektedir.

Marshall deneyi sonuçlarına bakıldığında atık lastik yağı stabiliteyi orijinal bitüme göre düşürmüştür. Bunun yanında % 4, % 5.5, % 6 bağlayıcı oranlarının olduğu numunelerde atık lastik yağı katkısı akma miktarını azaltmıştır. Bunun yanında katkılı bağlayıcı oranının % 6 ya kadar olduğu sıcak karışımlarda stabilite şartname limitini sağlamaktadır. Özellikle % 4 oranındaki katkılı bitüm hem stabilite hem de akma değerleri olarak şartnameyi sağlamaktadır. Ayrıca akma değerinin küçük olması kaplamanın plastik deformasyonlara olan direncini artırmaktadır. Tüm çalışmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 10.1'de belirtilmiştir.

Tablo 10.1. Tüm deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar

Bitümün Belirleyici Özelikleri	Atık Lastik Yağı Katkılı Bitümlü Bağlayıcının Özelliklerindeki Değişim Yönü
Penetrasyon Değeri	(+)
Yumuşama Noktası	(-)
Tekerlek İzine Karşı Dayanım	(-)
Bitümün Gençleşmesi	(+)
Sünme Sertliği	(+)
Yaşlanma Sonrası Kütle Kaybı	(+)
Marshall Stabilitesi	(-)
Marshall Deformasyonu Miktarı (Akma)	(-)

Çevre kirliliği yaratan atık malzemelerin katkı olarak kullanılmasının çevresel yönden faydaları göz önüne alındığında bu çalışmanın önemi artmaktadır. Bu materyallerin bitüm modifikasyonunda değerlendirilmesi hem çevre kirliliğini azaltacağı hem de ülkenin doğal kaynaklarının korunmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Yapılan çalışmada atık lastik yağının bitümün reolojik özelliklerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. İlerleyen zamanlarda yapılacak olan çalışmalarda atık lastik yağıyla modifiye edilmiş bitümlü karışımlar üzerinde diğer performans deneyleri yapılmalıdır.

Atık araç lastiklerinden elde edilen bu yağ ve karbon siyahı yalnız yol kaplamalarında değil, bitümün kullanıldığı diğer sanayi dallarında da katkı maddesi olarak kullanılabileceği üzerine çalışmalar yapılmalıdır.

Deneyler esnasında uçuculuğu gözlenen atık lastik yağının bitümle beraber katbek asfalt olarak kullanılabilirliği araştırılmalıdır.

Yüksek sıcaklıkta yapılan Marshall deney numunelerinin hazırlanması esnasında atık lastik yağı katkılı karışımın, orjinal bitümlü karışıma göre silindirik kapları birbirine çok kuvvetli olarak yapıştırdığı gözlenmiştir. Bu gözlemsel durum için başka bir araştırma yapılması önerilmektedir.

Yapılan bu çalışmada biyokütle olarak atık lastik yağı kullanılmış ve 50/70 pen. bitüm içerisine karıştırıldığında elde edilen modifiye bitümün performansı araştırılmıştır. Bitüm içerisinde kullanılmak üzere, çeşitli biyokütle maddelerinin sıvılaştırılarak kullanılması sonucunda elde edilecek bitümlü bağlayıcının performansı bilinmemektedir. Bu nedenle çeşitli biyokütle maddelerinin sıvılaştırılarak bitüm içerisinde kullanılması sonucu elde edilecek olan bitümlü bağlayıcıların performanslarının araştırılması önerilmektedir.

Sonuç olarak, piroliz yöntemiyle sıvılaştırılmış hurda lastiklerin bitümün modifikasyonunda alternatif katkı maddesi olarak kullanılabileceği söylenebilir.

11. KAYNAKLAR

Abraham, H., 1945. Asphalts and Allied Substances, Their Occurrence, Modes of Production, Uses in the Arts and Methods of Testing, Fifth edition, vol D van Nostrand Company.

Ağar, E. ve ark., 1985. Yol Üst Yapısı.

Basan, S., 2001. Polimer kimyası, Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları, Sivas

Bitüm El Kitabı, 2001-2002. İsfalt A.Ş Yayınlar

Bridgwater, A. V., 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass, Chemical Engineering Journal.

Colin A. Franco, 2005. P.E. New England Rubber-ModifiedAsphalt and Civil Engineering.

Cüre, S. ve ark., 2005. Otoyol Esnek Üstyapı İnşaatı Kalite Kontrolünde Kalite Yönetim Sisteminin Uygulanabilirliği.

Çelik, O.N. 2000. Öğütülmüş Atık Otomobil Lastiğiyle Modifiye edilmiş Bitümler İle Yapılan Asfalt Betonunun Yorulma Davranışı. Turk J Engin Environ Sci, Tübitak.

Çubuk, M., 2007. Katkı Maddeleri İle Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi Ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi.

Demirbaş, A., 2001. Yields of hydrogen-rich gaseous products via pyrolysis from Fuel. Biomass and Bioenergy.

Deniz, M. ve ark., 2005. Kullanılmış Otomobil Lastiklerinin Bitümlü Sıcak Karışım Performansına Etkisi.

Dinç, E., 1999.Superpave, TCK 16. Bölge Müdürlüğü.

Dinç, E., 2000 . Superpave, TCK 16. Bölge Müdürlüğü.

Erşahan, H., ve ark., 1996. Kömürlerin Flash Pirolizi Ve Kullanılan Deneysel Teknikler.

Esch, D.C., 1982. Construction and Benefits of Rubber-Modified Asphalt Pavements, Transportation Research Record

Gürü, M., 2004. Improvement of adhesıon of bitumen-aggregate coatings by additives, Cellulose Chem. Technol.

Hıcks, R.E., ve ark., 1983. Synthetic Fuels.

Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., 2001.

Karaosmanoğlu, F., ve ark. 1999. Charcoal From The Pyrolysis of Rapeseed Plant Straw-Stalk, Energy Sources.

Kuloğlu, N., ve ark., 2008. Farklı Penetrasyon Derecelerine Sahip Asfalt Çimentolarının Kalıcı Deformasyona Karşı Dayanımlarının ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi.

Lav, A., ve ark., 2004. Shell Bitüm El Kitabı.

Li, S.,Xu,S.,Liu,S.,Yang,C. Ve Lu,Q., 2004. Fast Pyrolysis Of Biomass İn Free-Fall Reactor For Hydrogen-Rich Gas, Fuel Processing Tech.

Limbachiya, Mukesh C. and Roberts, John J., 2004. Used/Post-Consumer Tyres, Thomas Telford Publish, Kingston University-London.

McDonald, 1974. Hıgh Temperature Performance of Scrap Tire Rubber Modıfıed Asphalt Concrete.

McGennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U., 1994. Background of Superpave Asphalt Bınder Test Methods.

.Mckendry, P., 2002. Energy production from biomass Conversion technologies, Bioresource Tech.

Ossenbrink, H., ve ark. 2004. Progress of Electricity from Biomass, Wind and Photovoltaics in the European Union,

Önalp, A. ve ark., Yol Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerine Türkiye Açısından Bir Bakış.

Özgan, E., Kap, T., 2005. Asfalt çimentolarında bekleme süresi ve ortam sıcaklığının düktüliteye etkisi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.

Öztürk E.A., 2004. Çubuk Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 19.

Rahman A. N. E., Akmal, M. A. Ve Prasad, K. B. S., 2001. Pyrolysis of Solid Wastes, Journal of Scientific & Industrial Research.

TCK, 2006, Karayolu Şartnamesi.

TS 1083 EN 12591, 2002. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Kaplama Sınıfı.

TS EN 12607-1, 2003. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar– Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı.

TS EN 13398, 2005. Bitümlü Maddelerin Düktülite Deneyi İçin Metod. Türk Standartları Enstitüsü.

TS 1090 EN 12592, 2002. Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar-Çözünürlük Tayini, Türk Standartları Enstitüsü.

TS 118 EN 1426, 2002. Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar -İğne Batma Derinliği Tayini, Türk Standartları Enstitüsü.

TS 120 EN 1427, 2002. Bitümler ve Bitümü Bağlayıcılar-Yumuşama Noktası Tayini-Halka ve Bilye Metodu, Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 13398, 2005. Bitümlü Maddelerin Düktülite Deneyi İçin Metod, Türk Standartları Enstitüsü.

TS 1090 EN 12592, 2002. Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar-Çözünürlük Tayini, Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 12607-2, 2003. Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar-Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü.

TS 1080, 2003. Sıvılar-Parlama ve Yanma Noktası Tayini-Tag Açık Kap Cihazı ile, Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 13398, 2005. Bitümlü Maddelerin Düktülite Deneyi İçin Metod. Türk Standartları Enstitüsü.

Tunç, A., 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı. Asil Yayın Dağıtım.

Umar, F., Ağar, E., 1985. Yol Üstyapısı. I.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Weidong Cao, 2006. Study on Properties of Recycled Tire Rubber Modified Asphalt Mixtures Using Dry Process, Construction and Building Materials .

Williams P., 2000. Chishti H., Two stage pyrolysis of oil shale using a zeolite catalyst, Journal of Analytical and Applied Pyrolsis.

Yılmaz, M., ve ark., 2008. Superpave Sistemine Göre Uygulama Bölgesine Uygun Bağlayıcı.

Zaniewski, J.P, 2004. Asphalt Technology Program.

URL1: www.asmud.org.tr

12. EKLER

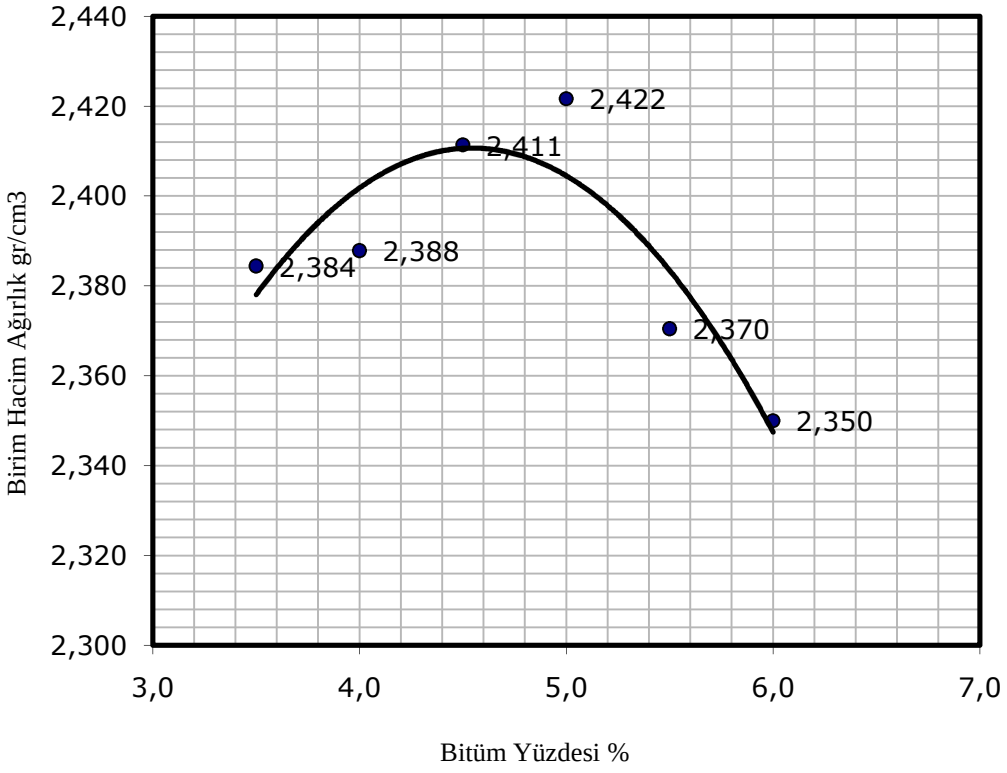
EK-1. Marshall deneyinde orijinal bitüm kullanılmış numune boyutları ve ağırlıkları

Numune No	Bitüm Oranı	Kuru Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	K (cm)	HORTALAMA (mm)	Düzeltme Katsayısı	Ortalama Düzeltme kats.
1	3,5	1205,5	710,5	63,60	63,60	63,20	10,16	63,47	1,000	1,043
2		1167,5	688,5	60,50	61,50	60,60	10,16	60,87	1,074	
3		1202,5	716,0	61,20	61,60	61,60	10,16	61,47	1,055	
4		1208,0	718,5	61,90	61,80	61,70	10,16	61,80	1,043	
1	4,0	1206,5	711,0	61,30	61,90	61,70	10,16	61,63	1,088	1,090
2		1199,5	714,5	61,30	60,80	61,40	10,16	61,17	1,090	
3		1190,0	709,5	61,20	61,00	61,90	10,16	61,37	1,089	
4		1190,5	711,5	61,30	60,90	61,60	10,16	61,13	1,092	
1	4,5	1199,0	716,5	60,70	60,80	61,40	10,16	60,97	1,070	1,074
2		1182,5	705,5	59,10	59,50	60,00	10,16	59,53	1,116	
3		1194,5	714,5	60,00	61,20	60,90	10,16	60,70	1,077	
4		1177,0	702,5	61,70	63,10	62,00	10,16	62,27	1,032	
1	5,0	1197,5	711,0	61,30	61,20	61,20	10,16	61,23	1,060	1,058
2		1208,0	722,0	61,00	61,70	61,60	10,16	61,43	1,053	
3		1198,5	710,0	61,60	61,20	61,00	10,16	61,27	1,055	
4		1205,0	716,0	61,20	60,60	61,60	10,16	61,13	1,061	
1	5,5	1186,0	693,5	64,30	65,10	65,90	10,16	65,10	0,960	1,034
2		1191,5	702,0	60,70	62,00	61,60	10,16	61,43	1,054	
3		1198,5	709,0	60,50	61,70	61,00	10,16	61,07	1,065	
4		1234,5	730,0	62,50	63,50	63,00	10,16	63,00	1,056	
1	6,0	1195,0	704,5	61,00	61,40	60,20	10,16	60,87	1,072	1,030
2		1185,0	695,0	61,50	62,10	61,60	10,16	61,73	1,045	
3		1200,0	708,0	61,90	62,30	62,00	10,16	62,07	1,044	
4		1173,5	680,0	66,20	64,10	65,20	10,16	65,17	0,958	

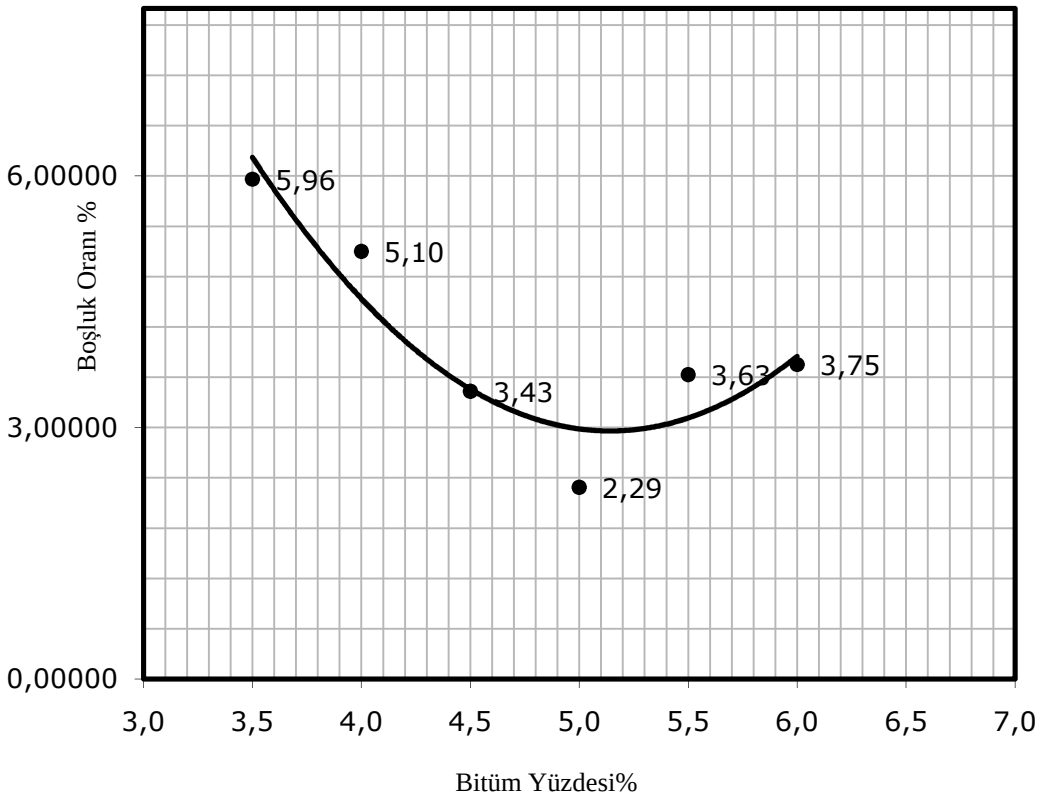
EK-2. Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deney sonuçları

NUMUNE NO	BİTÜM ORANI %	GERÇEK HACİM D2	BİRİM HAC. AĞIRLIĞI D1	ORT. KÜÇÜK BİRİM HACİM AĞIRLIK	TEORİK BİRİM HACİM AĞIRLIK	STABİLİTE (kN)	ORTALAMA STABİLİTE (kN)	DÜZELTİLMİŞ ORTALAMA STABİLİTE	BOŞLUK ORANI (%)	AKMA (mm)	ORT. AKMA (mm)	VMA (%)	Vb	Vfb
1	3,5	2,344	2,435	2,384	2,506	19,30	19,300	23,569	5,96119	2,72	3,158	14,14	8,18	0,58
2		2,367	2,437			23,50	25,239			2,71				
3		2,414	2,472	2,400		24,90	26,270			3,52				
4		2,412	2,468			22,50	23,468			3,68				
1	4,0	2,416	2,465	2,383	2,516	19,60	21,325	24,274	5,10101	3,67	3,783	14,47	9,36	0,65
2		2,420	2,473			24,60	26,814			3,82				
3		2,393	2,477	2,509		25,00	27,225			3,7				
4		2,322	2,621			19,90	21,731			3,91				
1	4,5	2,427	2,485	2,411	2,497	17,00	18,190	18,914	3,43319	4,25	3,878	14,07	10,64	0,76
2		2,451	2,479			18,60	20,758			3,86				
3		2,435	2,479	2,460		17,70	19,063			3,92				
4		2,333	2,481			17,10	17,647			3,45				
1	5,0	2,413	2,461	2,422	2,478	11,30	11,978	13,970	2,28657	5,78	5,075	14,16	11,87	0,84
2		2,427	2,486			13,90	14,637			4,32				
3		2,414	2,433	2,465		11,40	12,027			4,99				
4		2,432	2,464			16,20	17,237			5,21				
1	5,5	2,348	2,408	2,370	2,460	9,70	9,312	11,721	3,63144	7,36	6,793	16,41	12,78	0,78
2		2,393	2,434			11,10	11,699			6,43				
3		2,422	2,448	2,431		11,70	12,451			6,54				
4		2,418	2,447			12,70	13,411			6,84				
1	6,0	2,423	2,436	2,350	2,442	9,41	10,038	8,796	3,73098	6,44	8,343	17,57	13,82	0,79
2		2,369	2,418			7,28	7,608			7,29				
3		2,386	2,439	2,413		9,56	10,035			9,74				
4		2,222	2,378			7,73	7,465			9,9				

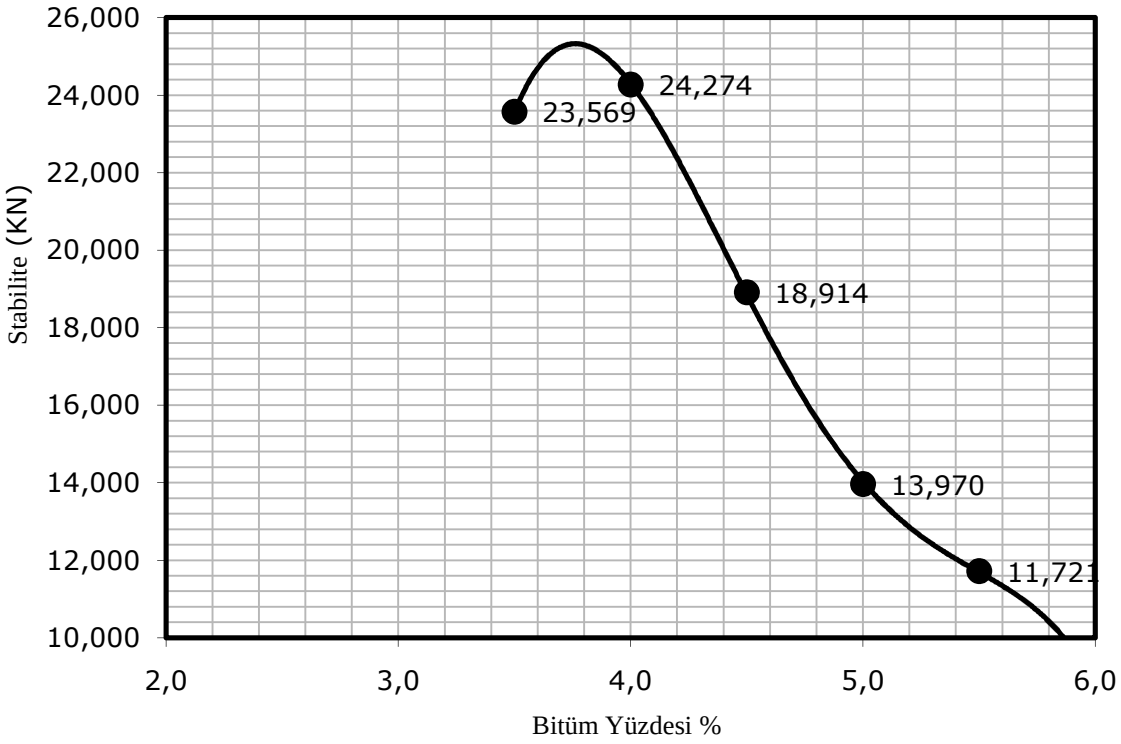
EK-3. Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Birim hacim ağırlık- Bitüm yüzdesi grafiği



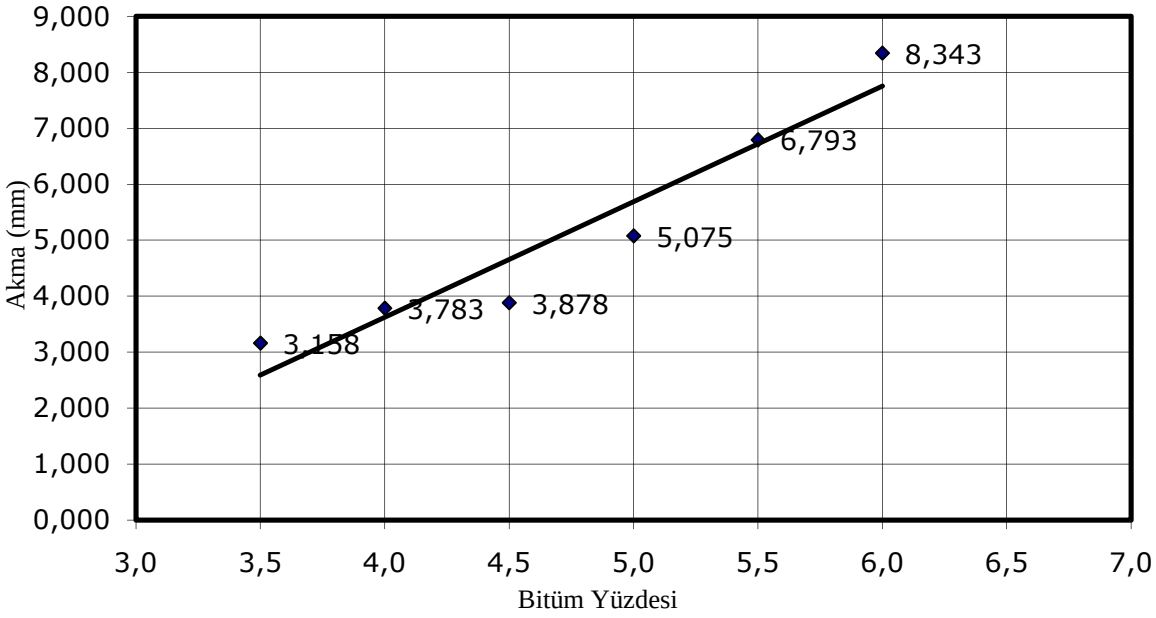
EK-4. Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Boşluk oranı- Bitüm yüzdesi grafiği



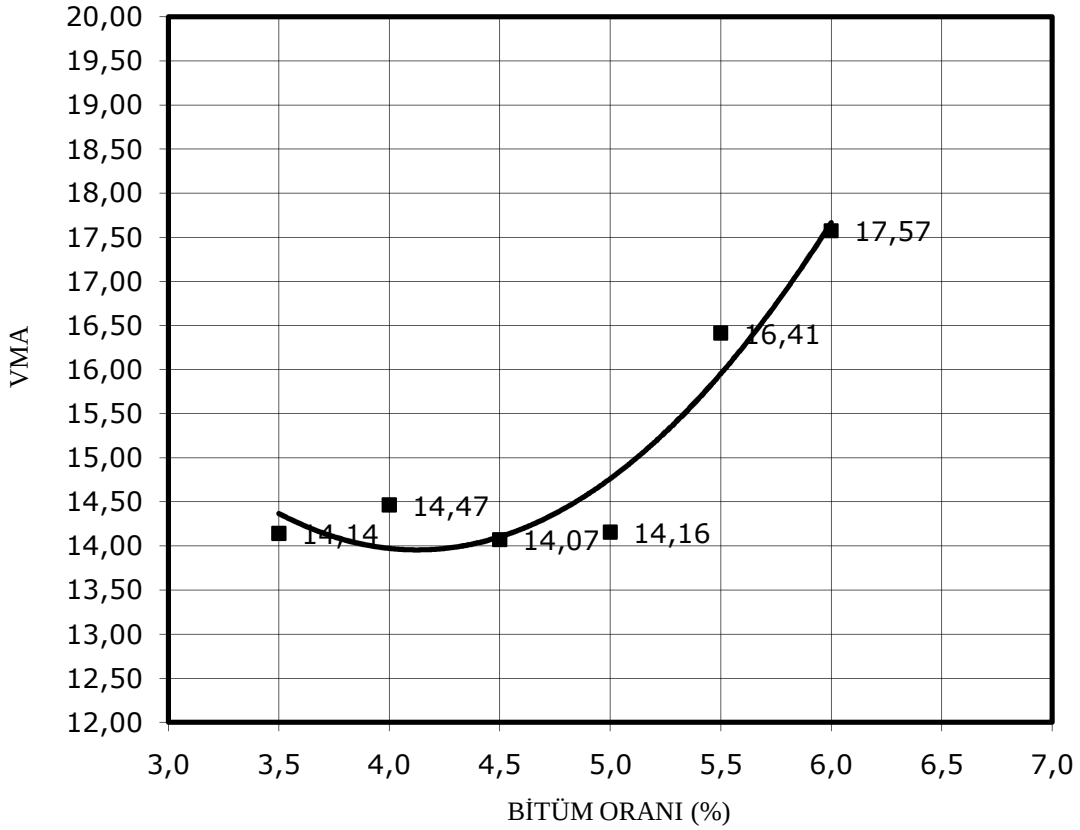
EK-5. Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Stabilite- Bitüm yüzdesi grafiği



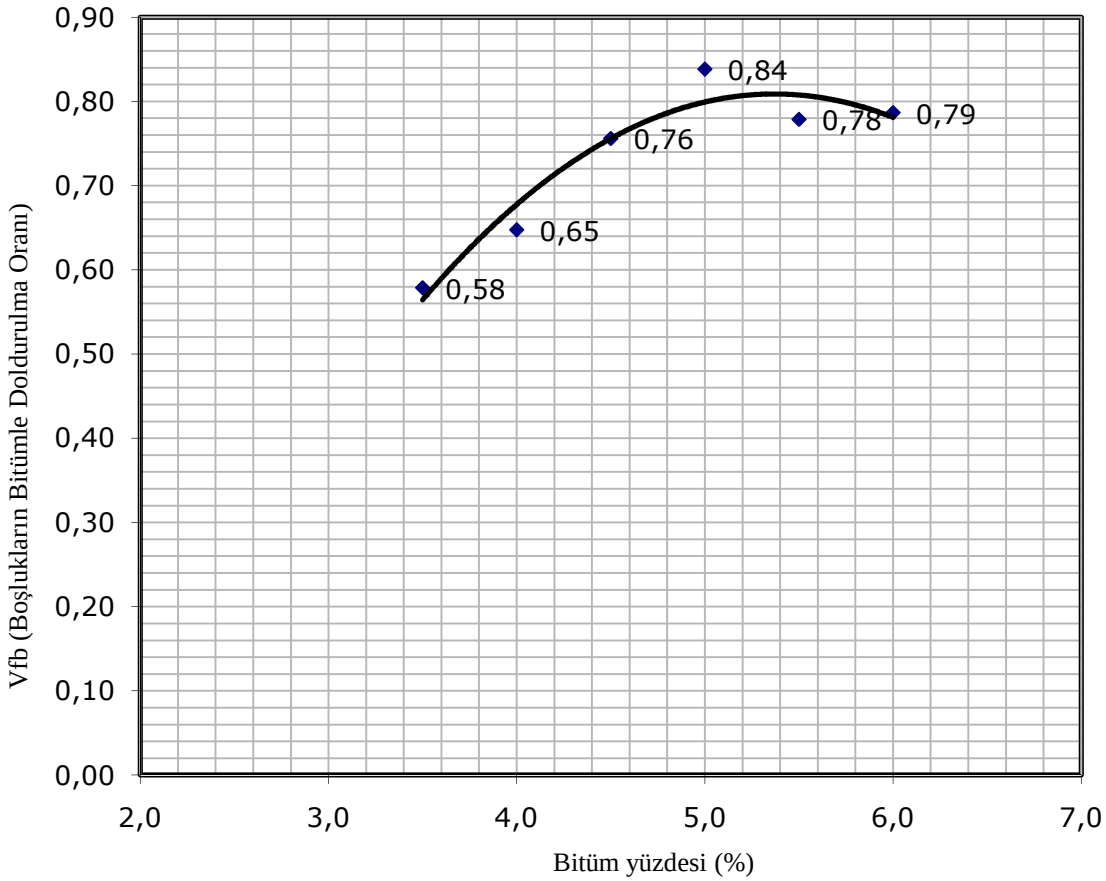
EK-6. Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Akma- Bitüm yüzdesi grafiği



EK-7. Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan VMA (Agregalar arası boşluk)- Bitüm yüzdesi grafiği



EK-8. Orijinal bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Vfb (Asfaltla dolu boşluk)- Bitüm yüzdesi grafiği



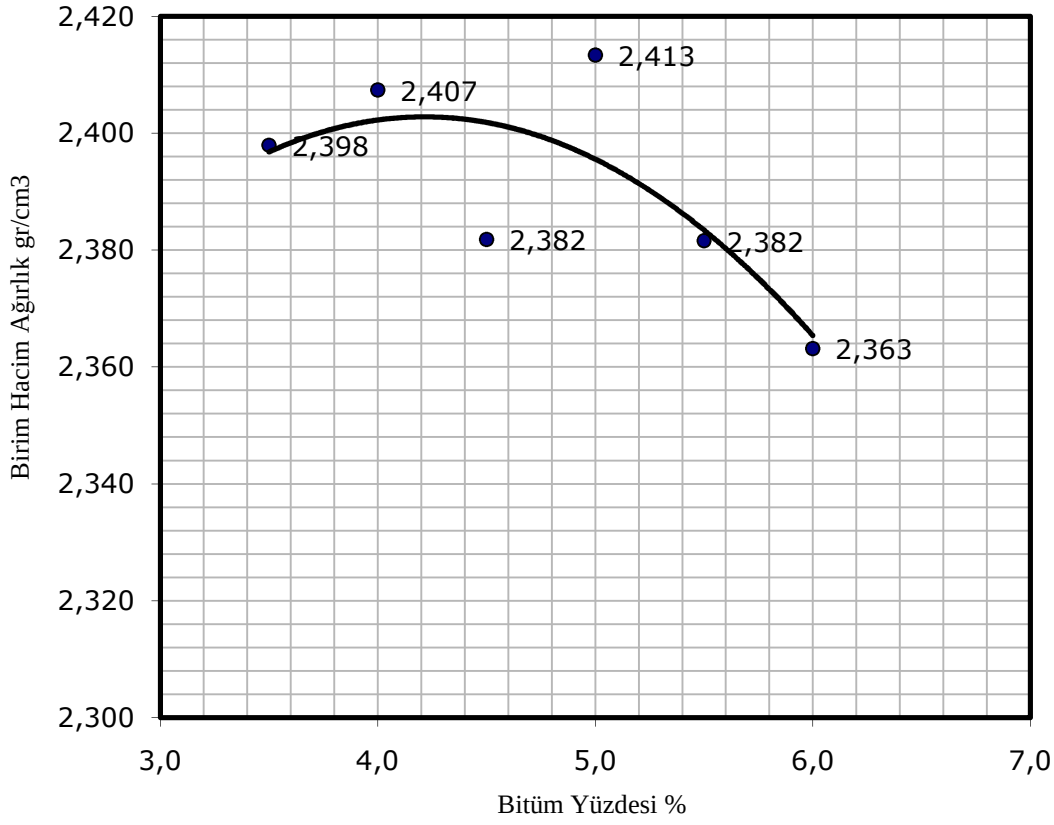
EK-9. Marshall deneyinde atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numune boyutları ve ağırlıkları

NUMUNE NO	BİTÜM ORANI %	KURU AĞIRLIK gr	SUDAKİ AĞIRLIK gr	H1 mm	H2 mm	H3 mm	R mm	HORTALAMA mm	DÜZELTME KATSAYISI	ORTALAMA DÜZELTME
1	3,5	1148,00	680,50	60,00	60,30	60,10	10,16	60,13	1,10	1,067
2		1199,00	713,00	61,90	61,90	62,50	10,16	62,10	1,04	
3		1198,00	715,00	61,90	60,00	61,00	10,16	60,97	1,07	
4		1201,50	716,50	61,20	61,00	61,00	10,16	61,07	1,07	
1	4,0	1195,50	711,00	61,50	61,90	60,90	10,16	61,43	1,06	1,064
2		1171,50	697,00	60,00	59,80	60,30	10,16	60,03	1,10	
3		1205,00	716,00	62,50	62,00	61,90	10,16	62,13	1,03	
4		1200,00	716,50	60,90	61,20	61,00	10,16	61,03	1,07	
1	4,5	1198,00	713,00	61,20	60,70	61,50	10,16	61,13	1,06	1,026
2		1241,00	740,00	62,50	63,00	63,70	10,16	63,07	1,01	
3		1197,50	708,00	62,00	62,00	62,70	10,16	62,23	1,03	
4		1189,00	699,00	62,50	64,20	64,20	10,16	63,63	1,00	
1	5,0	1204,00	718,00	62,00	61,00	60,70	10,16	61,23	1,06	1,054
2		1205,00	716,50	61,00	61,20	60,80	10,16	61,00	1,07	
3		1205,50	716,00	60,80	61,70	61,30	10,16	61,27	1,06	
4		1195,00	705,00	62,50	62,60	62,30	10,16	62,47	1,03	
1	5,5	1198,00	709,00	61,40	61,80	62,00	10,16	61,73	1,05	1,055
2		1199,00	706,50	62,50	61,90	61,40	10,16	61,93	1,04	
3		1195,50	708,00	61,00	61,90	61,80	10,16	61,57	1,05	
4		1149,50	676,50	59,90	61,00	60,50	10,16	60,47	1,09	
1	6,0	1194,00	700,00	62,00	63,20	63,80	10,16	63,00	1,01	1,025
2		1191,50	699,00	63,60	62,30	63,40	10,16	63,10	1,01	
3		1200,00	706,50	62,10	62,00	62,00	10,16	62,03	1,04	
4		1202,50	710,00	61,90	62,00	61,90	10,16	61,93	1,04	

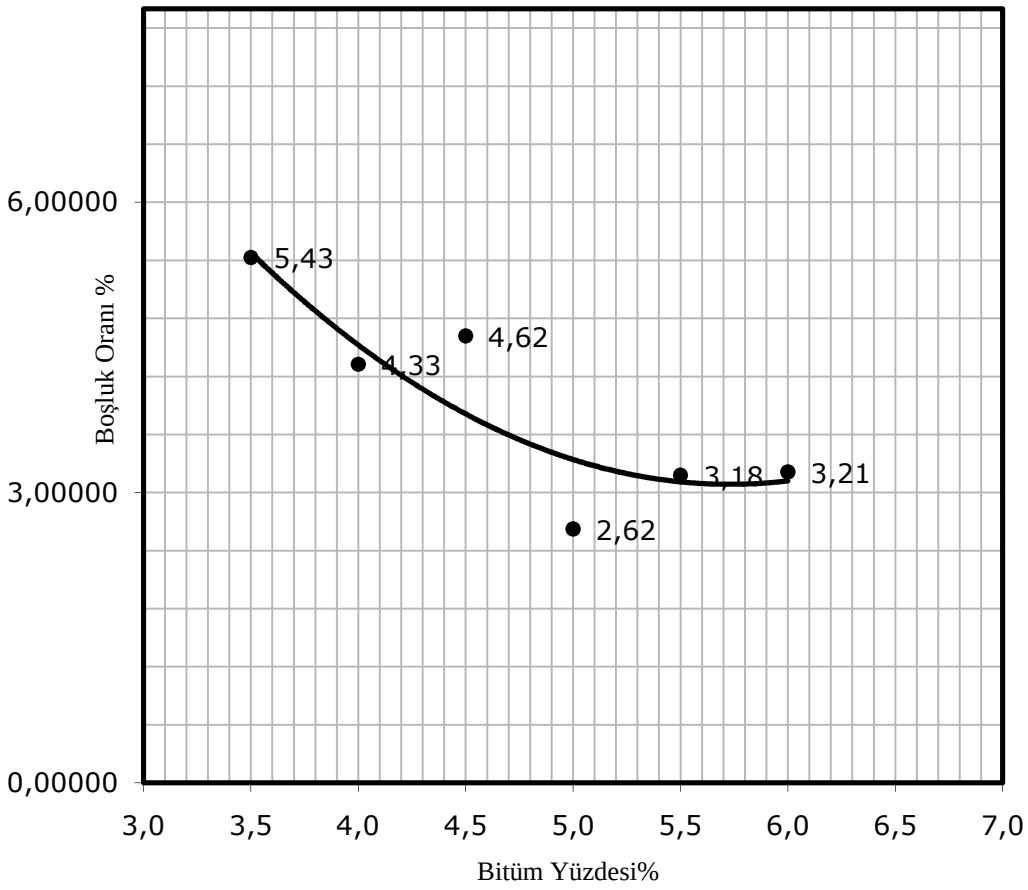
EK-10. Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deney sonuçları

NUMUNE NO	BİTÜM ORANI %	GERÇEK HACİM D2	BİRİM HAC. AĞIRLIĞI D1	ORT. KÜÇÜK BİRİM HACİM AĞIRLIK	TEORİK BİRİM HACİM AĞIRLIK	STABİLİTE (kN)	ORTALAMA STABİLİTE (kN)	DÜZELTİLMİŞ ORTALAMA STABİLİTE	BOŞLUK ORANI (%)	AKMA (mm)	ORT. AKMA (mm)	VMA (%)	Vb	Vfb
1	3,5	2,356	2,436	2,398	2,536	14,6	16,002	16,067	5,42836	3,12	3,188	13,66	8,23	0,60
2		2,383	2,467			15,9	16,457			3,45				
3		2,425	2,480	2,400		14,3	15,287			3,11				
4		2,428	2,477			15,5	16,523			3,07				
1	4,0	2,402	2,467	2,407	2,516	15,8	16,669	16,487	4,32549	3,71	3,343	13,77	9,44	0,69
2		2,408	2,469			15,2	16,705			3,41				
3		2,393	2,464	2,471		15,2	15,717			3,03				
4		2,426	2,482			15,8	16,859			3,22				
1	4,5	2,418	2,470	2,382	2,497	13	13,832	12,085	4,61763	4,77	5,193	15,13	10,51	0,69
2		2,428	2,477			14,3	14,457			4,13				
3		2,375	2,446	2,460		10,6	10,939			5,09				
4		2,306	2,427			9,14	9,113			6,78				
1	5,0	2,427	2,477	2,413	2,478	12,8	13,581	11,152	2,62256	5,36	5,560	14,45	11,83	0,82
2		2,438	2,467			11,3	12,068			4,62				
3		2,428	2,463	2,461		9,62	10,197			5,82				
4		2,361	2,439			8,54	8,762			6,44				
1	5,5	2,395	2,450	2,382	2,460	11,3	11,809	10,161	3,18047	5,61	6,038	16,02	12,84	0,80
2		2,389	2,455			9,61	9,985			7,73				
3		2,396	2,452	2,442		9,47	9,944			5,34				
4		2,346	2,430			8,21	8,908			5,47				
1	6,0	2,339	2,417	2,363	2,442	8,67	8,783	8,622	3,21354	7,8	7,043	17,11	13,90	0,81
2		2,330	2,419			7,72	7,797			6,91				
3		2,387	2,432	2,427		7,92	8,213			7,13				
4		2,396	2,442			9,33	9,694			6,33				

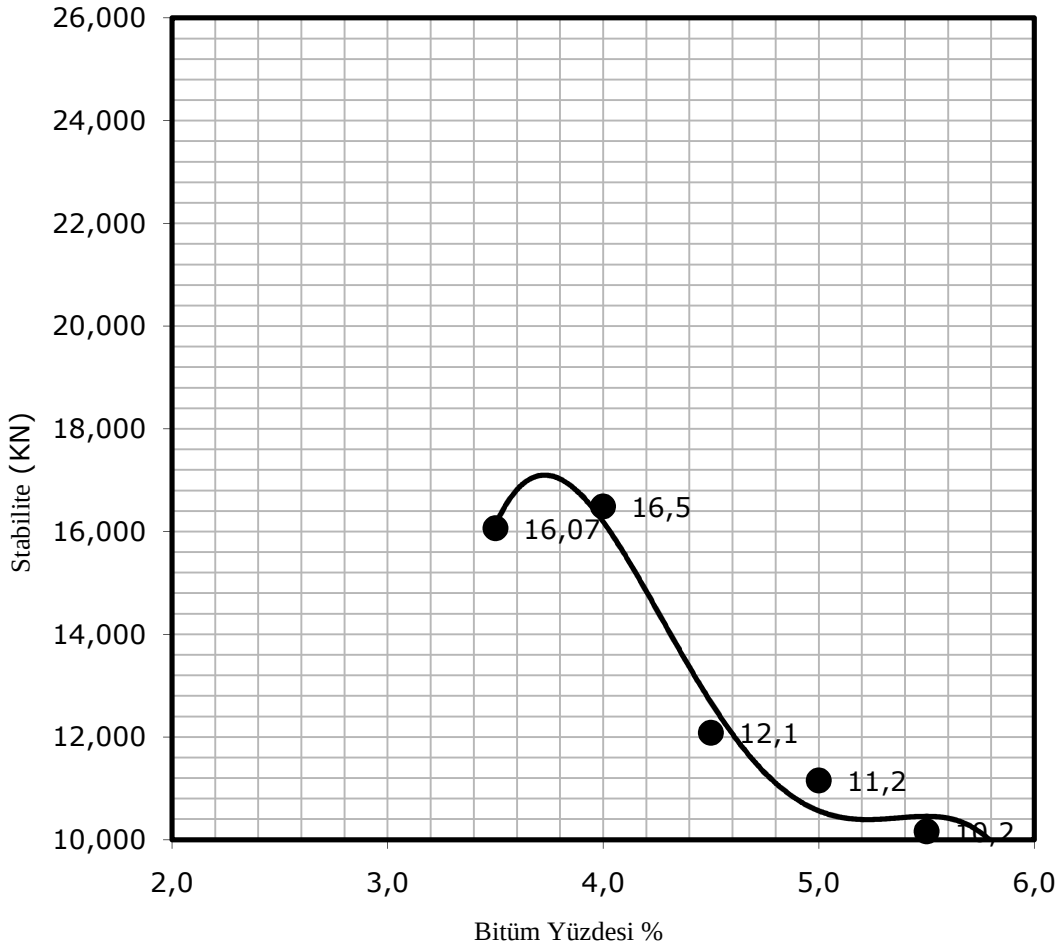
EK-11. Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Birim hacim ağırlık- Bitüm yüzdesi grafiği



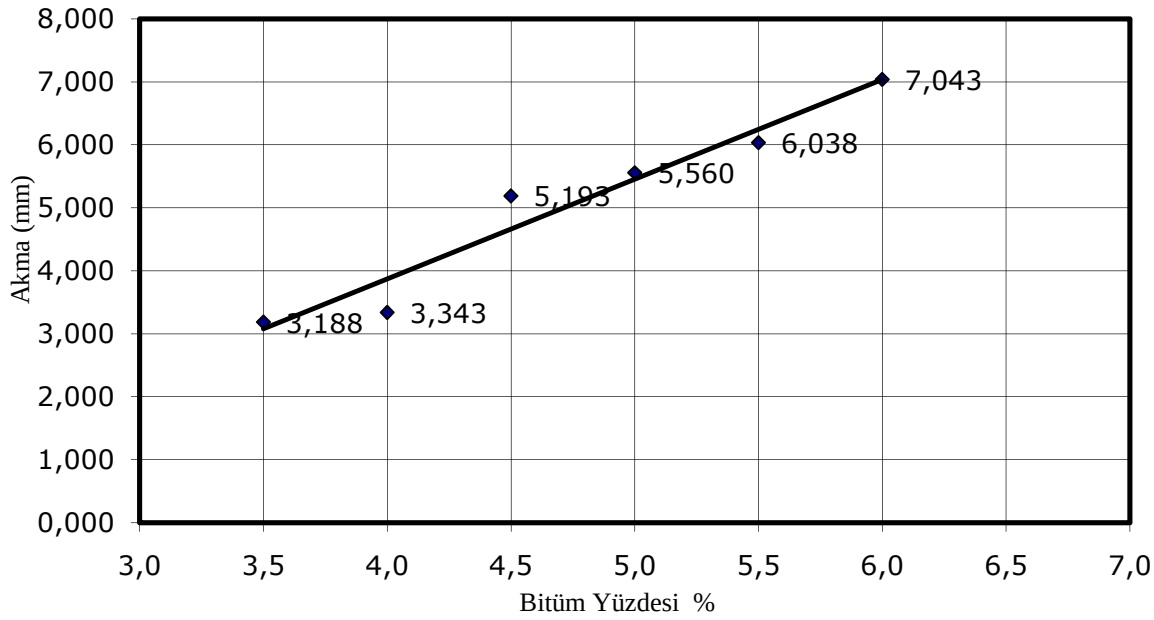
EK-12. Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Boşluk oranı- Bitüm yüzdesi grafiği



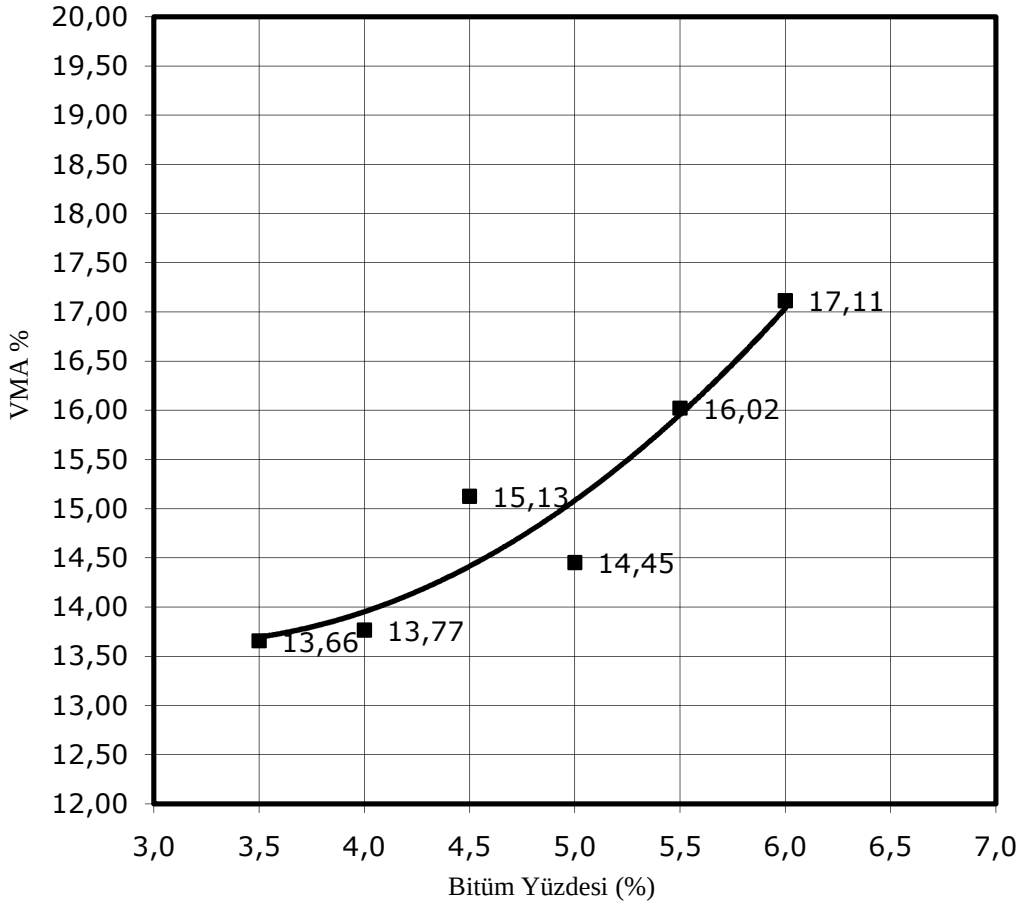
EK-13. Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Stabilite- Bitüm yüzdesi grafiği



EK-14. Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Akma- Bitüm yüzdesi grafiği



EK-15. Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan VMA (Agregalar arası boşluk oranı)- Bitüm yüzdesi grafiği



EK-16. Atık lastik yağı katkılı bitüm kullanılmış numunelerin Marshall deneyi sonucu oluşan Vfb (Asfaltla dolu boşluk)- Bitüm yüzdesi grafiği

