

**KATKI MADDELERİ İLE BİTÜMÜN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ VE ESNEK KAPLAMA MALZEME
OLUŞUMUNDA PROBLEMLERİN GİDERİLMESİ**

Meltem ÇUBUK

**DOKTORA TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2007

ANKARA

Meltem ÇUBUK tarafından hazırlanan KATKI MADDELERİ İLE BİTÜMÜN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ESNEK KAPLAMA MALZEME OLUŞUMUNDA PROBLEMLERİN GİDERİLMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Tez Danışmanı, Kimya Müh. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ayhan İNAL

.....

İnşaat Müh. Anabilim Dalı, O.D.T.Ü.

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

.....

Kimya Müh. Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Ali Y. BİLGESU

.....

Kimya Müh. Anabilim Dalı, A.Ü.

Prof. Dr. Vecihi PAMUK

.....

Kimya Müh. Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Nursel DİLSİZ

.....

Kimya Müh. Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 04/12 /2007

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Meltem ÇUBUK

**KATKI MADDELERİ İLE BİTÜMÜN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ VE ESNEK KAPLAMA MALZEME
OLUŞUMUNDA PROBLEMLERİN GİDERİLMESİ
(Doktora Tezi)**

Meltem ÇUBUK

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2007**

ÖZET

Mühendislikte geniş uygulama alanı bulan bitümlü malzemeler reolojik özellikleri ve termal dirençleri ile tercih edilmektedir. Esnek kaplamaların gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli, daha uzun ömürlü, bakım-onarım maliyeti ve gereksiniminin daha az olması arzulanmaktadır. Bu nedenle de esnek kaplamaların esas elemanlarından biri olan bitüm modifiye edilerek esnek kaplamaların performansları arttırılmaya çalışılmaktadır.

Yol üst yapılarında en çok kullanılan esnek kaplamalar başlıca bitümlü bağlayıcı ve agregadan meydana gelmektedir. Esnek kaplamaların niteliğini belirleyen en önemli etken ise kaplamayı meydana getiren bitümlü bağlayıcı ve agrega malzemelerin özelliğidir. Son yıllarda, yol üst yapılarında adezyon eksikliği, tekerlek izi oluşumu, çatlamalar ve soyulmalar gibi deformasyonlardan kaynaklanan sorunlar sıkça görülmektedir. Bu nedenle esnek kaplamalarda çok sık karşılaşılan kusurların giderilmesinde modifiye bitüm kullanımı gün geçtikçe artmaktadır.

Çalışmada katkı maddeleri ilave ederek bitümün modifiye edilmesi ve bu katkı maddelerinin bitümün reolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi

amaçlanmıştır. Katkı maddeleri olarak ise termoset grubu polimerlerden epoksi reçinesi, fenolformaldehit, termoplastik grubu polimerlerden ticari adıyla teflon olarak bilinen politetrafloretilen (PTFE) ve Mg abietat bileşiği kullanılmıştır.

Bu katkı maddelerinin bitümün reolojisi üzerine etkileri ise viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kesme reometresi (DSR), fark taramalı kalorimetre (DSC), döner ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT), basınçlı oksidasyon deneyi (PAV), asfalt çubuk eğilme deneyi (BBR) ve yüzey enerjisi deneyi ile belirlenmiştir. Modifiye edilmiş bitümün agrega ile karıştırılarak oluşturulan sıkıştırılmamış karışımlara Nicholson soyulma deneyi uygulanarak adezyon performansları incelenmiştir. Ayrıca, orjinal ve modifiye edilmiş bitümler ile Marshall yöntemiyle hazırlanan karışımların stabiliteleri belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar sonunda katkıların bitümün reolojik özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir. Kütlece %2'lik epoksi reçine katkısı bitümün viskozitesini artırmış, adezyon özelliklerini geliştirmiş ve tekerlek izi, yorulma çatlakları, soyulma direncini ve stabilizeyi artırmıştır. Benzer şekilde kütlece %2'lik fenolformaldehit reçine katkısı bitümün viskozitesini artırmış, adezyon özelliklerini geliştirmiş ve tekerlek izi, yorulma çatlakları, soyulma direncini ve stabilizeyi artırmıştır. Kütlece %3'lük PTFE katkısı bitümün viskozitesini artırmış, tekerlek izi ve yorulma çatlaklarına direnci artırmıştır. Mg abietat bileşiği ise bitümün adezyonunu geliştirerek soyulma direncini artırmıştır.

Bilim Kodu : 1.093
Anahtar Kelimeler : Bitümün modifikasyonu, asfalt, magnezyum abietat, fenolformaldehit, PTFE, epoksi reçine
Sayfa Adedi : 210
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Metin GÜRÜ

**IMPROVEMENT OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF BITUMEN
AND ELIMINATION OF PROBLEMS IN FLEXIBLE PAVEMENT
MATERIAL FORMATION BY ADDITIVES
(Ph.D. Thesis)**

Meltem ÇUBUK

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
December 2007**

ABSTRACT

Bituminous materials which are widely used in engineering are preferred for their rheological properties and thermal resistances. Flexible pavements are expected to be qualified in performance and stability, cost efficient in upkeep-repairing. Hence, the bitumen which is one of the main compounds of flexible pavements has been modified to increase the performances of flexible pavements.

Flexible pavements that are used in the top layer of the roads are formed from bituminous binders and aggregates. It is the material properties of the bituminous binders and the aggregates that determine the quality of the flexible pavements. Problems related to the deformations such as adhesion in the top layers of the roads, formation of rutting, crackings and peelings are common in the recent years. Thus modified bitumen usage is spreading in order to eliminate the defects in flexible pavements.

In this study, the modification of the bitumen with additives and the effects of the additives on the rheologic characteristics of the bitumen was studied. Epoxy resin which is a thermosetting group polymer, phenolformaldehyde,

polytetrafluoroethylene which is a thermoplastic group polymer and known as teflon commercially and Mg abietate were used as additives.

The effects of these additives on the rheology of the bitumens were tested by viscosity, penetration, softening point, dynamic shear rheometer (DSR), differential scanning calorimeter (DSC), rolling thin film oven test (RTFOT), pressure ageing vessel (PAV), bending beam rheometer (BBR) and surface energy test. Adhesion performances of the uncompacted modified bitumens and aggregate mixture were tested by Nicholson peeling test. In addition original and modified bitumens and mixtures made with Marshall method were tested for stability.

It is found from the tests that the additives improve the rheologic characteristics of the bitumen. 2% of epoxy resin by mass had increased the viscosity of the bitumen, had improved the adhesion characteristics, had decreased the rutting and fatigue cracks and increased the stripping resistivity and stability. In the similar method, 2% of phenolformaldehyde resin by mass had increased the viscosity of the bitumen, had improved the adhesion characteristics, had decreased the rutting and fatigue cracks and increased the stripping resistivity and stability. 3% of PTFE by mass had increased the viscosity and the resistance to fatigue cracks and rutting of the bitumen. Synthesized Mg abietate mixture had increased the stripping resistivity of the bitumen by increasing the adhesion.

Science Code	: 1.093
Key Words	: Modification of the bitumen, asphalt, magnesium abietate, phenolformaldehyde, PTFE, epoxy resin
Page Number	: 210
Adviser	: Prof. Dr. Metin GÜRÜ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof. Dr. Metin GÜRÜ'ye, yine katkılarından ötürü G.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Doktora öğrencisi Eylem TURAN'a, Kara Yolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı çalışanlarına ve destekleriyle beni yalnız bırakmayan eşime teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma, 2001 K120590 Kodlu DPT Projesi kapsamında yürütülmüş olup, finansal destek sağlayan DPT yöneticilerine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xvii
SIMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ.....	1
2. BİTÜM.....	4
2.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi, Yapısı ve Reolojisi.....	5
2.1.1. Bitümün kimyasal bileşimi.....	5
2.1.2. Bitümün yapısı.....	9
2.1.3. Bitümün reolojisi.....	11
3. BİTÜMÜN ÖZELLİKLERİ.....	12
3.1. Bitüm Özelliklerinin Belirlenmesi.....	12
3.1.1. Penetrasyon deneyi.....	13
3.1.2. Viskozite deneyi.....	13
3.1.3. Yumuşama noktası deneyi.....	18
3.1.4. Düktilite deneyi.....	19
3.1.5. Çözünürlük (bitüm yüzdesi) deneyi.....	19
3.1.6. İnce film halinde ısıtma deneyleri.....	19
3.1.7. Parlama noktası deneyleri.....	20

Sayfa

4. BİTÜM ÖZELLİKLERİNİN PERFORMANSA ETKİLERİ.....	22
4.1. Bitümün Isıya Duyarlılığı.....	23
4.2. Viskozitenin Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi.....	24
4.3. Kohezyonun Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi.....	25
4.4. Adezyonun Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi.....	26
4.4.1. Bitümün yüzey ve arayüzey gerilimi.....	28
4.4.2. Temas açısı ve yüzey enerjisi.....	28
4.4.3. Yüzey aktif maddeler ve bitümün yüzey gerilimine etkisi.....	31
4.5. Bitümün Dayanıklılığı.....	33
4.5.1. Yapım sürecinde bitümün yaşlanması.....	34
4.5.2. Hizmet ömrü boyunca bitümlü karışımın yaşlanması.....	35
4.6. Yapım Süresince Bitüm Özelliklerinin Performansa Etkisi.....	37
4.6.1. Karıştırma ve taşıma.....	37
4.6.2. Serme ve sıkıştırma.....	38
4.7. Hizmet Aşamasında Bitüm Özelliklerinin Performansa Etkisi.....	38
4.7.1. Kalıcı deformasyon.....	39
4.7.2. Bitümlü karışımlarda kasma.....	41
4.7.3. Bitümlü karışımlarda çatlaklar.....	42
4.7.4. Cilalanma.....	45
4.7.5. Bitümlü karışımlarda soyulma.....	45
5. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR.....	54
5.1. Bitümlü Bağlayıcılar.....	54
5.1.1. Katran.....	54

	Sayfa
5.1.2. Asfalt.....	54
5.2. Bitümlü Karışımlar.....	56
5.2.1. Bitümlü karışım türleri.....	56
5.2.2. Bitümlü karışımlardan beklenen özellikler.....	57
6. TERMAL YÖNTEMLER İLE MADDELERİN KARAKTERİZASYONU.....	63
6.1. Maddelerin Camsı Geçiş Sıcaklığı.....	63
6.2. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) İle Camsı Geçiş Sıcaklığının Tespiti.....	65
7. BİTÜMÜN MODİFİKASYONU.....	68
7.1. Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye Edilme Nedenleri.....	68
7.2. Bitümün Modifikasyon Yöntemleri.....	69
7.3. Bitüm Katkı Maddelerinde Aranılan Özellikler.....	70
7.4. Modifiye Bitümlerde Aranılan Özellikler.....	70
7.5. Bitümün Modifikasyonu için Kullanılan Katkılar.....	71
7.6. Bitümün Modifikasyon Türleri.....	73
7.6.1. Kükürt ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu.....	73
7.6.2. Kauçuk ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu.....	74
7.6.3. Organo-mangan bileşiklerinin ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu.....	75
7.6.4. Termoplastik polimerlerin ilave edilmesi yoluyla bitümlerin modifikasyonu.....	75
7.6.5. Termoplastik kauçukların ilavesi ile bitüm modifikasyonu.....	76
7.6.6. Termoset modifiyeli bağlayıcılar.....	76
8. POLİMERLER VE GENEL ÖZELLİKLERİ.....	78

Sayfa

8.1. Polimerlerin Sınıflandırılması.....	79
8.2. Polimerlerin Genel Özellikleri.....	81
8.3. Polimer Modifiye Bitümlerde Kullanılan Polimerlerin Sınıflandırılması.....	82
9. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	84
9.1. Polimerlerin Bitüm Katkı Maddesi Olarak Etkileri.....	84
9.2. Çalışmanın Amacı.....	96
10. MATERYAL VE METOD.....	99
10.1. Malzeme ve Cihazlar.....	99
10.2. Metot.....	101
10.2.1. Modifiye bitümlerin hazırlanması.....	102
10.2.2. Orjinal ve modifiye bitümlerin viskozite, penetrasyon ve yumuşama noktası testleri.....	103
10.2.3. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin camsı geçiş sıcaklıklarının tespiti.....	103
10.2.4. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjilerinin tespiti.....	104
10.2.5. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson soyulma deneyi.....	104
10.2.6. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin SUPERPAVE deneyleri.....	104
10.2.7. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilitesi deneyleri.....	105
11. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	106
11.1. Katkı Maddelerinin Bitümün Viskozitesine Etkisi.....	106
11.1.1. Orjinal bitümün viskozite test sonuçları.....	106

Sayfa

11.1.2. Epoksi reçine modifiyeli bitümün viskozite test sonuçları.....	107
11.1.3. Fenolformaldehit modifiyeli bitümün viskozite test sonuçları.....	112
11.1.4. PTFE modifiyeli bitümün viskozite test sonuçları.....	116
11.1.5. Mg abietat bileşiği modifiyeli bitümün viskozite test sonuçları.....	119
11.2. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Penetrasyon Deneyi Sonuçları.....	122
11.3. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları.....	122
11.4. Modifiye Bitümlerin Kurlenme Süreleri.....	123
11.4.1. Epoksi reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozitesi.....	123
11.4.2. Fenolformaldehit reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozitesi.....	126
11.4.3. PTFE modifiye bitümün zamana bağlı viskozitesi.....	128
11.4.4. Mg abietat bileşiği modifiye bitümün zamana bağlı viskozitesi.....	129
11.5. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Camsı Geçiş Sıcaklıklarının Tespiti.....	131
11.6. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Yüzey Enerjilerinin Tespiti.....	134
11.7. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları.....	136
11.8. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Superpave Deneyi Sonuçları.....	137
11.9. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Marshall Stabilite Deneyi Sonuçları.....	139
12. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER.....	142
12.1. Epoksi Reçine Modifiye Bitümün Değerlendirilmesi.....	143

Sayfa

12.2. Fenolformaldehit Reçine Modifiye Bitümün Değerlendirilmesi.....	146
12.3. PTFE Modifiye Bitümün Değerlendirilmesi.....	149
12.4. Mg Abietat Bileşiği Modifiye Bitümün Değerlendirilmesi.....	150
KAYNAKLAR.....	153
EKLER.....	160
EK-1. Mg abietat bileşiği modifiye bitüm hazırlanması.....	161
EK-2. Epoksi modifiye bitüm hazırlanması.....	163
EK-3. Fenolformaldehit modifiye bitüm hazırlanması.....	164
EK-4. PTFE modifiye bitüm hazırlanması.....	165
EK-5. Dönel viskozimetre deneyi.....	166
EK-6. Bitümlü ve bitümlü bağlayıcılar-ığne batma deneyi tayini.....	168
EK-7. Bitümlü ve bitümlü bağlayıcılar-yumuşama noktası tayini- halka ve bilye metodu.....	170
EK-8. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin camsı geçiş sıcaklıklarının tespiti.....	172
EK-9. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjilerinin tespiti.....	175
EK-10. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson soyulma deneyi.....	182
EK-11. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin SUPERPAVE deneyleri.....	190
EK-12. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri.....	198
ÖZGEÇMİŞ.....	209

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Değme açısı belirlemede kullanılan sıvıların 20 °C’da yüzey enerji bileşenlerinin değerleri (mJ/m ²).....	31
Çizelge 4.2. Olası üstyapı problemleri ve muhtemel nedenleri.....	39
Çizelge 7.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırması.....	71
Çizelge 7.2. Modifiyeler ve değişiklik sağladığı özellikler.....	72
Çizelge 8.1. Endüstride en çok kullanılan polimerler.....	82
Çizelge 10.1. Epoksi reçinenin özellikleri.....	99
Çizelge 10.2. Fenolik reçinenin özellikleri.....	100
Çizelge 10.3. PTFE’nin özellikleri.....	100
Çizelge 10.4. Alacaatlı agregasının kimyasal özellikleri.....	101
Çizelge 10.5. Orjinal ve modifiye bitümlere uygulanan SUPERPAVE deneyleri.....	105
Çizelge 11.1. 50/70 sınıfı bitümün viskozite değerleri.....	106
Çizelge 11.2. Epoksi reçine ile modifiye edilmiş bitümün viskozite değerleri.....	108
Çizelge 11.3. Epoksi reçine modifiye bitümün Arrhenius denklemi kayma değerleri ve aktivasyon enerjileri.....	112
Çizelge 11.4. Fenolformaldehit modifiye bitümün viskozite değerleri.....	113
Çizelge 11.5. Fenolformaldehit modifiye bitümün Arrhenius denklemi kayma değerleri ve aktivasyon enerjileri.....	115
Çizelge 11.6. PTFE modifiye bitümün viskozite değerleri.....	116
Çizelge 11.7. PTFE modifiye bitümün Arrhenius denklemi kayma değerleri ve aktivasyon enerjileri.....	119
Çizelge 11.8. Mg abietat bileşiği modifiye bitümün viskozite değerleri.....	120

Çizelge	Sayfa
Çizelge 11.9. Mg abietat bileşiği modifiye bitümün Arrhenius denkelemi kayma değerleri ve aktivasyon enerjileri.....	121
Çizelge 11.10. Penetrasyon deneyi sonuçları.....	122
Çizelge 11.11. Yumuşama noktası deneyi sonuçları.....	123
Çizelge 11.12. %2 Epoksi reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değerleri.....	124
Çizelge 11.13. %3 Epoksi reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değerleri.....	125
Çizelge 11.14. %2 Fenolformaldehit modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değerleri.....	127
Çizelge 11.15. %3 PTFE modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değerleri.....	128
Çizelge 11.16. Mg abietat bileşiği modifiye bitümün zamana bağlı viskozite verileri.....	130
Çizelge 11.17. DSC cihazı ile belirlenen camsı geçiş sıcaklıkları.....	134
Çizelge 11.18. Nicholson soyulma deneyi sonuçları.....	136
Çizelge 11.19. Orjinal ve modifiye bitüm Superpave deney sonuçları.....	138
Çizelge 11.20. Orjinal ve modifiye bitümlerin Marshal stabilite ve akma değerleri.....	139
Çizelge 12.1. Katkı maddeleri ve etkileri.....	142

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bitüm üretiminin şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.2. Asfaltın kimyasal yapısı.....	7
Şekil 2.3. Aromatiklerin kimyasal yapısı.....	8
Şekil 2.4. Doygu hidrokarbanların kimyasal yapısı.....	8
Şekil 2.5. SOL tipi bitümler.....	9
Şekil 2.6. JEL tipi bitümler.....	10
Şekil 3.1. Dönel viskozimetrenin şematik görünümü.....	14
Şekil 3.2. Isıtmalı kapta deneyin işleyişi.....	15
Şekil 3.3. Dinamik kesme reometresi işleyişi.....	16
Şekil 4.1. Bitümlü karışımda farklı sıcaklıklardaki hareketler.....	25
Şekil 4.2. Adezyon artırıcı katkıların etkisi.....	27
Şekil 4.3. Su altında bir katının yüzeyine yapışmak isteyen bitüm damlacığının şematik gösterimi.....	29
Şekil 4.4. Anyonik yüzey aktif maddelerin bağlanma mekanizması.....	32
Şekil 4.5. Bitümün tabaka kalınlığının yaşlanma indeksi üzerine etkisi.....	35
Şekil 4.6. Karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve servis sırasında bitümün yaşlanması.....	36
Şekil 6.1. DSC ile camsı geçiş noktasının tayininin şematik gösterimi.....	66
Şekil 6.2. DSC sisteminin şematik gösterimi.....	66
Şekil 6.3. Polimerik maddelerde karşılaşılan değişme tiplerini gösteren şematik DSC kaydı.....	67
Şekil 8.1. Stiren monomerinden polistirenin oluşumunun şematik gösterimi.....	78
Şekil 10.1. Epoksi reçinenin sıcaklık ile viskozite değişimi.....	99
Şekil	Sayfa

Şekil 11.1. Orjinal bitümün viskozite eğrisi.....	107
Şekil 11.2. Epoksi reçine ile modifiye edilmiş bitümün katkı miktarına bağlı viskozite değişimi.....	108
Şekil 11.3. Epoksi reçine ile modifiye edilmiş bitümün sıcaklık ile viskozite değişimi.....	110
Şekil 11.4. Epoksi reçine modifiye bitümün Arrhenius denklemi modellemesi.....	111
Şekil 11.5. Fenolformaldehit modifiye bitümün katkı miktarına bağlı viskozite değişimi.....	113
Şekil 11.6. Fenolformaldehit modifiye bitümün sıcaklığa bağlı viskozite değişimi.....	114
Şekil 11.7. Fenolformaldehit modifiye bitümün Arrhenius denklemi modellemesi.....	115
Şekil 11.8. PTFE modifiye bitümün katkı miktarına bağlı viskozite değişimi.....	117
Şekil 11.9. PTFE modifiye bitümün sıcaklığa bağlı viskozite değişimi.....	118
Şekil 11.10. PTFE modifiye bitümün Arrhenius denklemi modellemesi.....	118
Şekil 11.11. Mg abietat bileşiği modifiye bitümün sıcaklığa bağlı viskozite değişimi.....	120
Şekil 11.12. Mg abietat bileşiği modifiye bitümün Arrhenius denklemi modellemesi.....	121
Şekil 11.13. %2 Epoksi reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değişimi.....	124
Şekil 11.14. %3 Epoksi reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değişimi.....	125
Şekil 11.15. %2 Fenolformaldehit modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değişimi.....	127
Şekil 11.16. %3 PTFE modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değişimi.....	129
Şekil 11.17. Mg abietat bileşiği modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değişimi.....	130

Şekil 11.18. Orjinal bitüm ve modifiye bitümlerin DSC eğrileri.....	131
Şekil 11.19. Uçucu kül dolgulu epoksi reçinenin DSC eğrileri.....	132
Şekil 11.20. Lastik dolgulu epoksi reçinenin DSC eğrileri.....	133
Şekil 11.21. Orjinal ve modifiye bitümlerin DSA 100 cihazı ile tespit edilen yüzey enerjisi değerleri.....	135
Şekil 11.22. Orjinal ve modifiye bitümlerin Nicholson soyulma deneyi sonuçları.....	136
Şekil 11.23. Orjinal ve modifiye bitümlerin Marshall stabilite değerleri.....	140
Şekil 11.24. Orjinal ve modifiye bitümlerin akma değerleri.....	141
Şekil 12.1. Mg katkısının bağlanma mekanizması	151

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
b	Çubuk uzunluğu
B	Aktivasyon enerjisi
h	Numune kalınlığı
L	Mesnetler arası mesafe
m	Sünme oranı
P	Uygulanan sabit yük
P	25 °C 'daki penetrasyon
r	Numune yarıçapı
R	Gaz yasası sabiti
S	Sünme sertliği
T	Burulma
G^*	Kompleks kesme modülü
δ	Faz açısı
τ	Kesme gerilmesi
γ	Deplasman
θ	Dönme açısı
$\delta_{(t)}$	t anındaki yer değiştirme
σ	Çekme gerilmesi
t	Zaman
ε	Şekil değiştirme
I_p	Penetrasyon indisi
I_{RaB}	Yumuşama noktası
γ	Yüzey gerilimi
γ_{KG}	Katı ve doymuş buharının arayüzey serbest enerjisi

Simgeler**Açıklama**

γ_{ks}	Katı ve sıvı arayüzey serbest enerjisi
γ_{sg}	Sıvı ve doymuş buharının arayüzey serbest enerjisi
Θ	Temas açısı
W	Sıvıyı yüzeyden ayırmak için gerekli iş
$-\Delta G$	Adezyon enerjisi
γ^{LW}	Apolar yüzey gerilimi
γ^{AB}	Asit-baz yüzey gerilimi
γ^{+}	Elektron alıcı bileşen
γ^{-}	Elektron verici bileşen
η_r	Yaşlanmış bitümün viskozitesi
η_o	Orijinal bitümün viskozitesi
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı
T_m	Erime sıcaklığı
C_p	Isı kapasitesi
μ	Viskozite
$\ln A$	Kayma

Kısaltmalar**Açıklama**

AC	Asfalt çimentosu
AASHTO	Amerikan devlet otoyolları ve resmi taşımacılık birliği
ASTM	Amerikan test ve materyaller topluluğu
BBR	Çubuk eğme reometresi
DSA	Diferansiyel yüzey analizi
DSC	Fark taramalı kalorimetre

Kısaltmalar**Açıklama**

DSR	Dinamik kesme reometresi
DTA	Diferansiyel termal analiz
EVA	Etil vinil asetat
HRA	Sıcak silindirlenmiş asfalt
MB	Modifiye bitüm
MC	Orta kür olan sıvı petrol asfaltları
PAV	Basıncılı oksidasyon kabı deneyi
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PTFE	Politetrafloretilen
RC	Çabuk kür olan sıvı petrol asfaltları
RTFO	Döner ince film ısıtma
RTFOT	Döner ince film ısıtma deneyi
RV	Dönel viskozimetre
SBS	Stiren bütadien stiren
SC	Yavaş kür olan sıvı petrol asfaltları
SPA	Sıvı petrol asfaltları
SUPERPAVE	Yüksek performanslı asfalt kaplama
TFOT	İnce film ısıtma deneyi
TG	Termogravimetri
TMA	Termomekanik analiz
VMA	Agregalar arasında boşluk değeri

1. GİRİŞ

Organik maddelerin milyonlarca yıl önce bakterilerin ve doğal katalizörlerin etkisi ile parçalanmaları sonucu oluştuğu kabul edilen petrol çok sayıda hidrokarbonun bir karışımıdır. Petrolün atmosferik veya vakum damıtması sonucu elde edilen dip ürünü ise bitümdür. Dolayısıyla bitüm, doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya bunların her ikisinin bileşimi olup, bunların sıcaklığa bağlı olarak sıvı, yarı katı ya da katı halde olabilen, metal dışı türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon sülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanır [1].

Bitüm, asfalt ve katran olmak üzere iki ana gruptan oluşmaktadır. Organik temelli olan asfalt ve katranlar, yüksek moleküllü hidrokarbonlar olarak tanımlanabilir. Asfaltın n-heptanda çözülmeyen kısmına asfalten, çözülen kısmına malten adı verilir. Asfaltenler bitümün % 5-25'ini oluştururlar. Maltenler ise bitümün % 40-65'ini oluşturan aromatikler başta olmak üzere reçineler ve doymuş hidrokarbonlardan oluşmaktadır [1].

Bitümü, yapısını oluşturan aromatikler, reçineler, doymuş hidrokarbonlar ve asfalten oranlarının sistematik karışımı, bitümün reolojisinin yapısına bağlı olduğunu göstermiştir [1]. Bu nedenle bitümün modifiye edilmesine karşı duyulan ilgi her geçen gün artmaktadır.

Bitümlü malzemeler reolojik özellikleri ve termal dirençleri sebebiyle yol üst yapılarında tercih edilmekte olup, esnek kaplamaların gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli olmaları içinde pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalardan en önemlisi ise bitümün modifiye edilerek esnek kaplamaların performanslarının artırılması çalışmalarıdır.

Genel olarak penetrasyon cinsi, oksitlendirilmiş (okside, hava üflenmiş) bitümler, sert bitümler ve katbek bitümlerin üretimi yapılmaktadır. Penetrasyon cinsi bitümler genellikle yol inşaatında, daha sert olan bitümler (35 ile 100 penetrasyon

arasındakiler) rijitliğin önemli olduğu karışımlarda, daha yumuşak olan (100 ile 450 penetrasyon arasındakiler) bitümler ise uygulama sırasında yağlama özellikleri ve servis ömründe adezyonun önemli olduğu karışımlarda kullanılır. Oksitlendirilmiş bitümlerin tamamına yakın bir kısmı çatı kaplama, zemin döşeme (parke, marley vb.), mastikleme, boru kaplama işlerinde, boyalar, vb. uygulamalarda kullanılır. Sert bitümler boya imalatı, kömür birikitleme, vb. endüstriyel uygulamalarda yaygın biçimde kullanılır. Katbek bitümler ise, şartnamelerde belirtilen bir viskozitenin sağlanması amacıyla 100 penetrasyon ya da 200 penetrasyon gibi yüksek penetrasyonlu birümlerin gazyağı ile karıştırılması ile üretilir [2].

Yol üst yapılarında en çok kullanılan esnek kaplamaların niteliğini belirleyen, kaplamayı meydana getiren bitümlü bağlayıcı ve agrega malzemelerin özelliğidir. Esnek kaplamalarda en çok karşılaşılan sorunlar ise adezyon eksikliği, tekerlek izi oluşumu, çatlamlar ve soyulmalar gibi deformasyonlardır. Bu nedenle esnek kaplamalarda çok sık karşılaşılan deformasyonların giderilmesinde modifiye bitüm kullanılmaktadır.

Bitümlü bağlayıcıların ve karışımların modifikasyonunda kullanılan en önemli katkı maddesi grubu polimer katkılardır.

Bu çalışmada bitüme, termoset grubu polimerlerden epoksi reçinesi, fenolformaldehit reçinesi ile termoplastik polimerlerden ticari adıyla teflon olarak bilinen politetrafloretillen (PTFE) ve organik esaslı metal katkı maddesi olarak magnezyum abietat bileşiği ilave ederek bitümün modifiye edilmesi ve bu katkı maddelerinin bitümün reolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmalarda, TS 1081 EN 12591 “Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Kaplama Sınıfı Bitümler-Özellikler” Standardına [3] göre, Karayolları Genel Müdürlüğünün yol ağındaki kaplamalarda kullanılan B 40/60, B 50/70, B 70/100, B 100/150 bitüm sınıflarından ülkemizde sıcaklık ve iklim koşullarına göre en fazla kullanılan B 50/70 sınıfı bitüm dikkate alınarak [4], Aliğa Rafinerisi 50/70 sınıfı bitüm tercih edilmiştir.

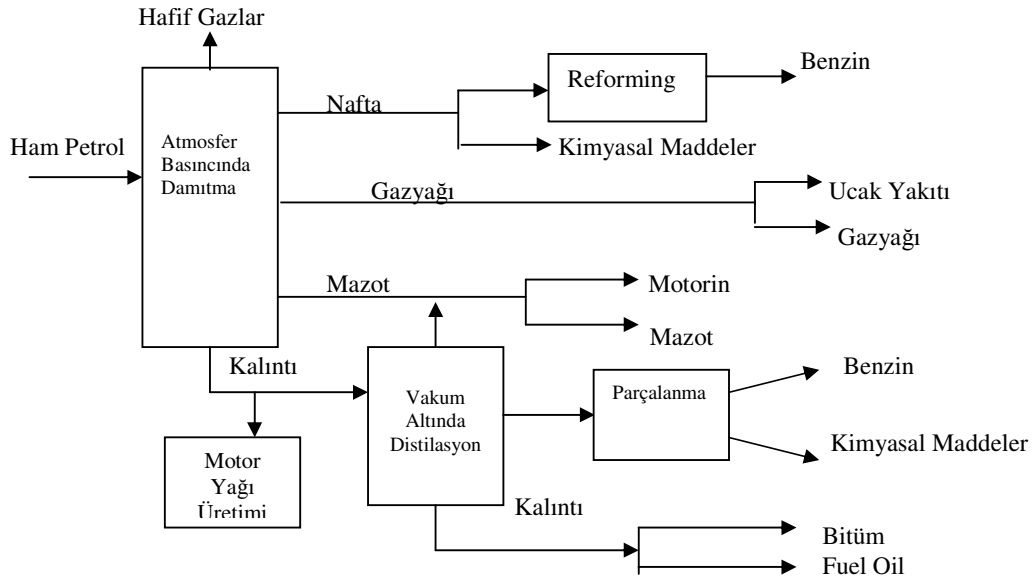
Bitümün reolojik özelliklerini belirleyebilmek için orjinal ve modifiye edilmiş bitüm örneklerine viskozite deneyi yapılmış ve optimum viskozite değerlerinin elde edildiği modifiye bitüm örneklerine penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kesme reometresi (DSR), döner ince film etüvü (RTFO), basınçlı oksidasyon kabı (PAV) ve çubuk eğme reometresi (BBR) testleri ve performanslarına ilişkin ise Marshall stabilitesi ve soyulma deneyleri uygulanmıştır. Katkıların bitümün camsı geçiş sıcaklığına etkisi ise Perkin Elmer marka DSC cihazı ile tespit edilmiştir. Ayrıca, her bir örneğin yüzey enerjileri hesaplanarak katkıların bitümün adezyonuna etkileri araştırılmaya çalışılmıştır.

2. BİTÜM

Bitüm, yol üst yapısında kullanılan en önemli bağlayıcıdır. Doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya bunların her ikisinin bir kombinasyonu olup, çok defa bunların gaz, sıvı, yarı katı ya da katı olabilen, metal dışı türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon disülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanır [1].

Bitümlü bağlayıcılar esas olarak asfaltlar ve katranlar olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Asfaltlarda doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Doğal asfaltlar, mineral maddeler ile karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltlarıdır. Yapay asfaltlar ise ham petrolün damıtılmasından elde edilir. Katran ise başlıca kömürün veya odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılmasından elde edilir.

Bitüm, genel olarak doğal kaynaklıdır. En zengin bitüm kaynağı ise ham petroldür. Şekil 2.1’de ham petrolden bitüm üretiminin basit bir şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 2.1. Bitüm üretiminin şematik gösterimi [2]

Atmosferik veya vakum damıtması sonucu elde edilen dip ürün büyük ölçüde bitüm içerir. Damıtma ile elde edilen bitüm yol yapımında kullanılanlardan farklıdır. Bitüm özelliklerini geliştirici bir işlemde geçirerek yol yapım malzemesi olarak kullanılması mümkündür. Yol yapımı için kullanılacak bitümlerde aranan özellikler ise;

- Düktilite özelliğinin fazla olması,
- Yumuşama sıcaklığının yüksek olması,
- Maddeye şekil verilen sıcaklık aralığının geniş olması,
- Yapışabilme özelliği

dir. Bu fiziksel özelliklerin yanında aranan en önemli kimyasal özellikte bitümün hava ve toprağın oksijen ve nemine karşı yüksek bir oksitlenme direncine sahip olmasıdır. Bu özellikler bitüme 150-350 °C arasında 2-24 saat süre ile hava üfleyerek kazandırılır [5].

2.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi, Yapısı ve Reolojisi

Bitümün belirli bir sıcaklıktaki reolojisi, hem içeriği yani malzemedeki hakim hidrokarbon moleküllerinin kimyasal bileşimi hem de fiziksel yapısı ile belirlenmektedir. Bu unsurlardan biri veya her ikisi değişikliğe uğratılırsa reolojik yapıda da değişikliğe yol açacaktır. Bu nedenle, bitüm reolojisini anlayabilmek için, bir bitümün bileşim ve yapısının reolojiyi etkileyecek ne tür bir etkileşim içinde olduğunu bilmek gerekmektedir [2].

2.1.1. Bitümün kimyasal bileşimi

Bitüm, hidrokarbon molekülleri ile yapısal olarak benzer heterosiklik türler ve kükürt, oksijen ve azot atomları içeren fonksiyonel grupların kompleks bir kimyasal karışımıdır. Bitüm aynı zamanda çok az miktarda oksitler ve inorganik tuzlar ya da kalsiyum, nikel, demir, vanadyum ve magnezyum gibi metaller de içermektedir. Ham petrolardan elde edilen bitümlerin analiz sonuçları genel olarak aşağıdaki elementleri içermektedir [2]:

Karbon	% 82-88
Hidrojen	% 8-11
Kükürt	% 0-6
Oksijen	% 0-1.5
Azot	% 0-1

Bitümün kompozisyonu, elde edildiği ham petrolün kaynağına ve sonra imalat sırasında yapılan işlemler ile kullanma süresince meydana gelen oksitlenmeye göre değişiklik arz etmektedir.

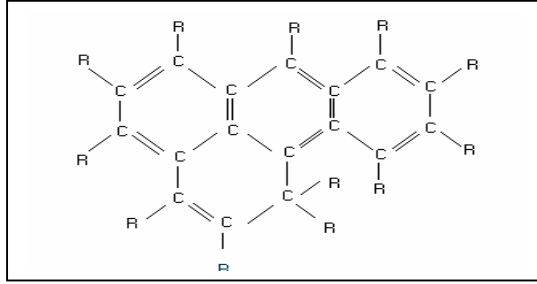
Bitümü fraksiyonlarına ayırmak suretiyle kimyasal yapısı saptanabilir. Bu fraksiyonlarına ayırma işlemi için kullanılan yöntemler ise şu şekilde sıranalabilir [6]:

1. Solvent ekstraksiyonu
2. Destilasyon
3. Kromatografi
4. Kolon kromatografisi ve absorbe edilmeyen çözeltinin filtreye ayrılması

Bitümün kimyasal kompozisyonu oldukça karmaşık olduğundan malzemenin tam bir kimyasal analizi oldukça yoğun incelemeler gerektirmekte ve sonuçta reolojik özelliklerle korelasyonu imkansız hale getirecek miktarda çok veri ortaya çıkmaktadır. Fakat bitümü asfaltenler ve maltenler olarak adlandırılan iki geniş kimyasal gruba ayırmak mümkündür. Maltenlerde ayrıca doymuş hidrokarbonlar, aromatikler ve reçineler olarak alt gruplara ayrılır [2].

Asfaltenler

Asfaltenler, karbon ve hidrojenden oluşan ve bir miktar azot, kükürt ve oksijen içeren, n-heptan içerisinde çözünmeyen oldukça yüksek molekül ağırlığına sahip, polar (elektriksel yüklere sahip) siyah veya kahverengi amorf katılardır.



Şekil 2.2. Asfaltenerin kimyasal yapısı [1]

Asfaltener bitümün % 5 ile % 25 ini oluşturmakta ve miktarı bitümün reolojik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Asfalten miktarının artırılması ile daha düşük penetrasyon ve daha yüksek yumuşama noktasına sahip, daha sert ve sonuç olarak daha yüksek viskoziteli bir bitüm elde edilmektedir [2].

Ancak asfalten içeriğinin sınırları aşması durumunda, yaşlanma sırasında reçinelerin yavaş yavaş asfaltenerlere dönüşmesine ve bitümün istenmeyen sonuçlarının ortaya çıkmasına neden olur [1].

Reçineler

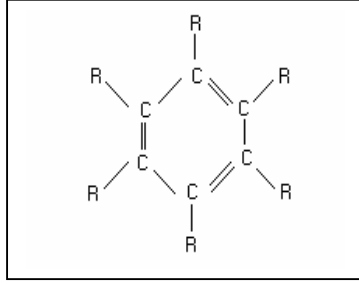
Reçineler, n-heptan içerisinde çözünen, asfaltenerler gibi geniş oranda hidrojen ve karbondan oluşmuş ve az miktarda oksijen, kükürt ve azot içeren maddeler olup, koyu kahverengi renkte katı ya da yarı katılardır. Reçinelerin elektriksel olarak oldukça yüklü olmaları, reçinelerin güçlü bir yapışkan olmalarını sağlamaktadır.

Reçineler asfaltenerleri ayıran ya da yayılmalarını sağlayan katılar olup, reçinelerin asfaltenerlere oranı, bir dereceye kadar bitümün jelatin (GEL) tipi ya da çözelti (SOL) tipi olma özelliğini kontrol etmektedir [7].

Aromatikler

Bitüm içerisindeki en düşük molekül ağırlıklı naftanik aromatik bileşenlerden oluşan ve bitüm içerisine dağılmış asfaltenerlerin yayılımları için gereken ortamın büyük

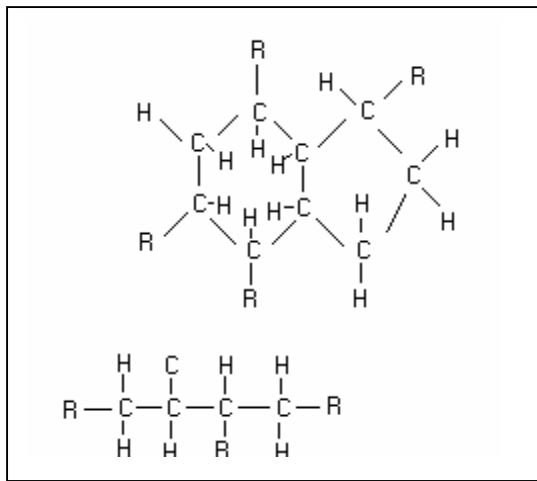
kısmını teşkil eden aromatiklerdir. Aromatikler, toplam bitümün % 40 ila % 65 ini oluşturan koyu kahverengi, viskoz sıvılar olup, doymamış halka sistemlerin hakim olduğu polar olmayan karbon zincirlerinden oluşmakta ve diğer yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbonlar için yüksek çözünme yeteğine sahiptirler [2].



Şekil 2.3. Aromatiklerin kimyasal yapısı [1]

Doygun hidrokarbonlar

Doygun hidrokarbonlar, alkil-naftenler ve bazı alkil-aromatikler ile birlikte düz ve zincir şeklinde alifatik hidrokarbonlardır. Bunlar saman veya beyaz renkteki polar olmayan viskoz yağlar olup, hem parafinik hem de naftanik yağ halkalarını içerir. Doygun hidrokarbonlar bitümün % 5 ila % 20'sini oluşturmaktadır [1].

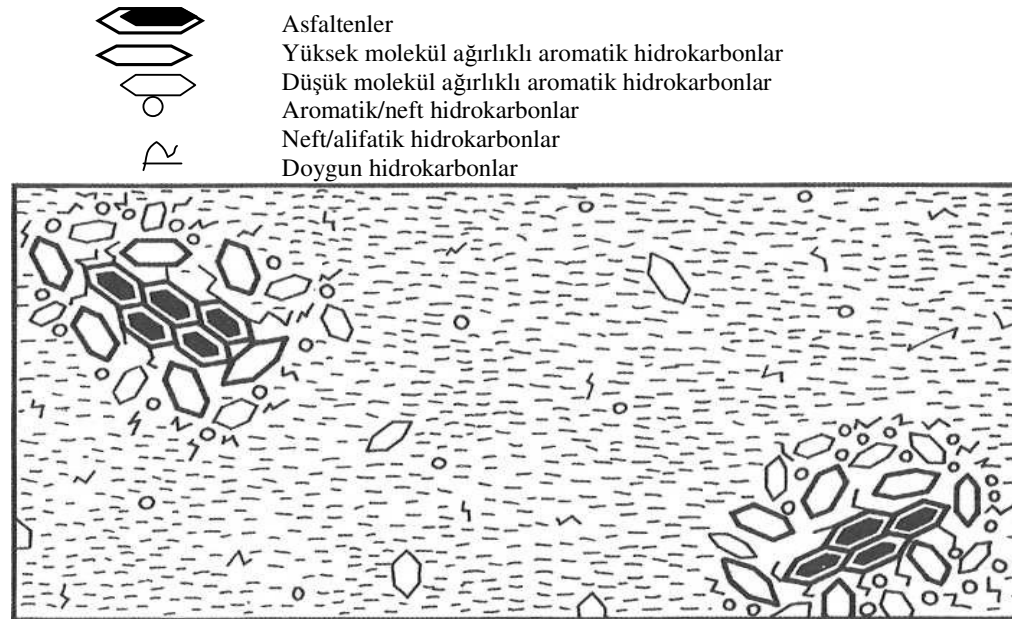


Şekil 2.4. Doygun hidrokarbonların kimyasal yapısı [1]

2.1.2. Bitümün yapısı

Bitüm, asfaltenlerin maltenler içerisinde çözünmüş veya dağılmış bir süspansiyon sistemi olarak tanımlanmaktadır. Asfalten damlacıkları, asfaltenlerin etrafını bir kılıf gibi çeviren yüksek molekül ağırlıklı aromatik reçinelerdir. Damlacıkların merkezinden uzaklaştıkça, daha düşük elektriksel yüklere sahip aromatik reçineler bulunmaktadır.

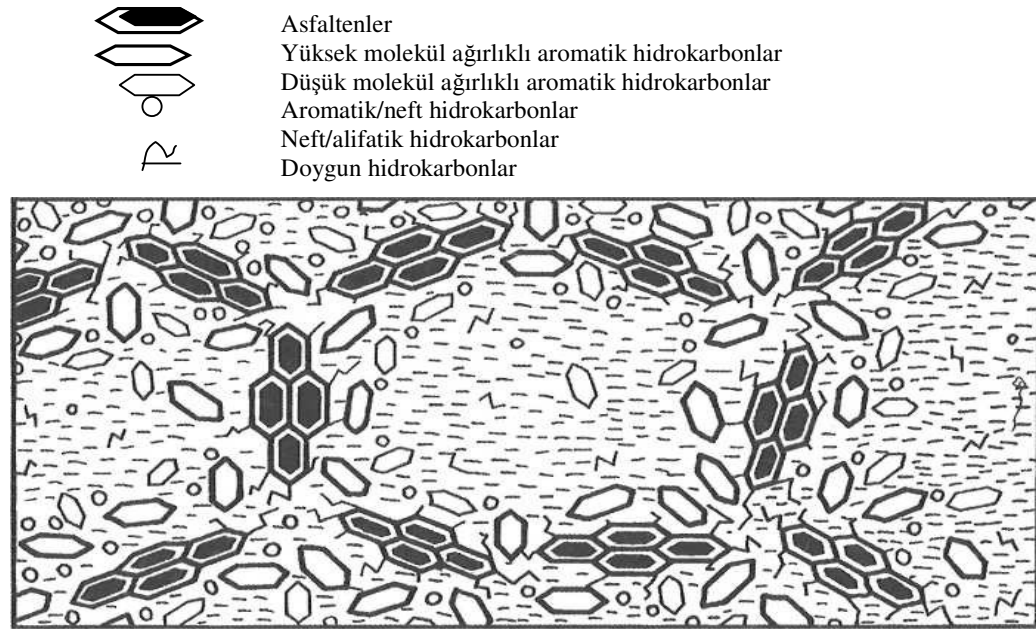
Yeterli miktarda aromatikler ve reçineler bulunduğu anda asfaltenler tamamen dağılır ve oluşan damlaların bitüm içerisindeki hareketliliği oldukça iyi olur. Bunlar çözelti ya da SOL tipi bitümler olarak adlandırılır [2].



Şekil 2.5. SOL tipi bitümler [7]

Yeterli miktarda aromatik ve reçine bileşenleri mevcut değilse ya da bu bileşenler yeterli çözücü güce sahip değilse asfaltenler birbirleriyle daha da ilişkili olabilmektedir. Bunun sonucunda damlaların birbirleriyle bağlantılı olduğu ve içlerindeki boşluklarında diğer maddelerden (doymuş hidrokarbonlar, vs.) oluşan sıvıyla dolmuş bir yapı meydana gelir. Bu bitümler ise jelatinli veya JEL tipi

bitümler olarak adlandırılmaktadır. Bunlara en iyi örnek, çatı kaplamalarında kullanılan oksitlendirilmiş bitümler verilebilir. Uygulamada bitümlerin büyük kısmı orta karakterdedir [2].



Şekil 2.6. JEL tipi bitümler [7]

Asfaltenlerin kolloidal davranışı, bitüm içindeki kümeleşme veya petekleşmeye bağlı olarak değişir. Bunların sistem içerisindeki yayılma dereceleri malzemenin viskozitesini belirgin derecede etkilemektedir [7]. Bu tür etkiler sıcaklıkla azalma göstermekte ve belirli bitümlerin jel karakterleri yüksek sıcaklıklara dek ısıtıldığında kaybolabilmektedir.

Doygunların, aromatiklerin ve reçinelerin viskoziteleri moleküler ağırlık dağılımlarına bağlı olup, moleküler ağırlık arttıkça viskozite de artmaktadır.

Maltenlerin viskozitesi, bitüme dağılmış fraksiyonun yani asfaltenlerin varlığı sayesinde artmış, doğal bir viskozite, yapışkanlık kazandırmıştır. Doygun kısımlar asfaltenlerin belirli derecede kümelenmelerine yol açtığından, maltenlerin asfaltenleri çözme yeteneklerini azaltmaktadır. Bu nedenle, bitümlerin jel

özelliğindeki artış ve sıcaklık bağımlılıklarının düşmesi sadece asfaltten içeriğinden değil aynı zamanda doygun içeriğinden de kaynaklanmaktadır [2].

2.1.3 Bitümün reolojisi

Reoloji, bir maddenin akma ve deformasyonunu sadece maddeye uygulanan yüke değil ayrıca bu yükün uygulanma süresini dikkate alarak belirlemeye çalışan bir bilimdir. Bitüm, reolojik bir malzeme olduğu için yük altında davranışı, üzerine uygulanan yüke ve bu yükün uygulanma süresine bağlıdır. Ayrıca, bitüm termoplastik bir malzemedir ve bu yüzden sıcaklık değişimlerine karşı da duyarlıdır.

Bu nedenle, bitümün davranışı, üzerine uygulanan yüke, yükün uygulanma süresine ve bitümün bu esnadaki sıcaklığına bağlıdır. Bitümün tüm bu özellikleri, katıldığı sıcak karışıma geçer ve bundan dolayı bitümlü karışımlar da, viskoelastik ve termoplastik malzemelerdir. Yaz aylarındaki sıcak havalarda ya da yavaş hareket eden ağır taşıtların altında bitümlü kaplamalar, yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı viskoz sıvılar gibi hareket ederek akarlar. Eğer akmaya karşı direnimsiz ise, kaplamada ağır yük ve/veya yüksek ısıdan dolayı tekerlek izi oluşabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda ise termoplastik özelliklerinden dolayı bitümlü kaplamalar, çok sert veya kırılğan hale gelebilmekte ve kaplamada çatlaklar oluşabilmektedir [8].

Viskozitenin belirlenmesi, reoloji biliminin temel konusudur. Viskozite, iki molekül tabakası arasında, birinin diğerinin üzerinde hareketi esnasında bu harekete engellemeye çalışan direnimsizlik olarak da düşünülebilir. Bitümün kimyasal yapısı, bitümlü karışımların reolojisini etkilediği için, bitümlü karışımların esas elemanlarından biri olan bitümün, viskozite-sıcaklık ilişkilerinin belirlenmesi gerekir.

3. BİTÜMÜN ÖZELLİKLERİ

Penetrasyon cinsi, bitümlerin laboratuvarında belirlenen özellikleri ile yol üst yapılarında kullanılan karışımlarındaki performans ilişkisi uzun yıllardır araştırılmaktadır. Bitüm, karışımda hacimce küçük bir yer tutmasına rağmen dayanıklılık ve bitümlü karışıma viskoelastik özellik kazandırması sebebiyle karışımlarda çok önemli bir role sahiptir.

Bitümün yol üzerinde tatmin edici bir performans göstermesi aşağıda sıralanan dört özelliğin kontrol edilmesi ile sağlanabilir [2]:

1. Reoloji
2. Kohezyon (faz içerisinde yapışkanlık)
3. Adezyon (fazlar arasında yapışkanlık)
4. Dayanıklılık

Reoloji, bir maddenin akma ve deformasyonunun basınç ve zaman içerisinde incelenmesidir. Bitüm reolojisi ise belirli bir sıcaklıkta hem kimyasal bileşenlerinin hem de malzemedeki baskın hidrokarbon yapıların saptanması; bileşimindeki, yapısındaki veya her ikisinde birden olan değişikliklerin etkisinin incelenmesidir. Bitüm reolojisindeki değişimler, o bitümün yapı ve bileşenlerinin etkisi ile oluşmaktadır.

3.1. Bitüm Özelliklerinin Belirlenmesi

Bitümün deneylerle ölçülen özelliklerinin, yol kaplamasının durumuna ve dayanıklılığına önemli bir etkisi olduğu kabul edilmektedir. Bitümlü bağlayıcının cinsine göre şartnamelerde çeşitli deneylerden söz edilmektedir. Genel olarak bitümlü bağlayıcılara uygulanan bazı deneyler aşağıda belirtilmiştir [9];

1. Penetrasyon (TS 118 EN 1426)
2. Viskozite (ASTM D 4402-87)

3. Yumuşama noktası (TS 120 EN 1427)
4. Düktilite (TS EN 13398)
5. Trikloretilende çözünürlük (TS 1090 EN 12592)
6. İnce film halinde ısıtma (TS EN 12607-2)
7. Parlama noktası (TS 1080, TS EN ISO 2592, TS 1171)

3.1.1. Penetrasyon deneyi

Penetrasyon, bitümün sertlik ve kıvamının bir ölçüsüdür. Penetrasyon deneyi standart bir iğnenin belirli ısı, yük ve zaman koşulları altında, numuneye düşey olarak battığı derinliğin ölçülmesinden ibarettir. Bitümlü malzeme, 25 °C’de 100 g yükü ve 5 saniye süreyle penetrasyona uğratılır [10]. Bu koşullar altında yapılan deneyin sonucuna normal penetrasyon denilmektedir.

Penetrasyon birimi santimetrenin yüzde biridir ve aletin göstergesindeki her bir birim 0,1 mm yi göstermektedir. Penetrasyon deneyi sonunda okunan değer 100 ise, deneye tabi tutulmuş olan bitümlü bağlayıcının penetrasyonu 100 demektir. Yani iğne bu bitümlü bağlayıcının içerisine 1 cm girmiştir [11].

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

3.1.2. Viskozite deneyi

Bir bağlayıcının viskozitesi, onun akışkanlık özelliğinin bir ölçüsüdür. Bu özellik bağlayıcının kullanılacağı bitümlü kaplamanın performansına önemli derecede etki eder. Bu nedenle viskozite, bir bağlayıcının en önemli fiziksel özelliklerinden biridir.

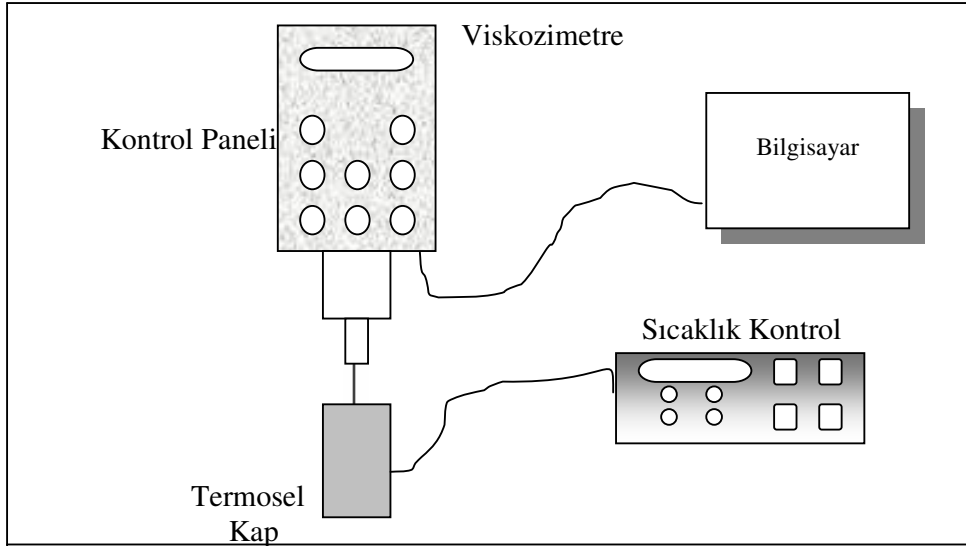
Viskozite deneyi, uygulama sırasında bitümlerin ısıtıldıkları sıcaklık sınırlarında akma özelliğini tayin etmek amacıyla yapılır.

Saybolt-furol viskozitesi asfalt emülsiyonları ve sıvı petrol asfaltları için kullanılmaktadır. Asfalt çimentolarının, pompalama ve doldurma veya boşaltma sırasındaki akma özelliğini tayin etmek için Brookfield Vizkozimetre aleti kullanılır. Bu cihaz ile sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında viskoziteye bağlı olarak bulunur [9].

Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (SUPERPAVE) adı verilen yeni bir karışım tasarımı yöntemi ile hazırlanacak sıcak karışımda kullanılması düşünülen bitümün değişik sıcaklık aralıklarındaki viskozite deneylerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler ise çeşitlidir. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Dönel viskozimetre

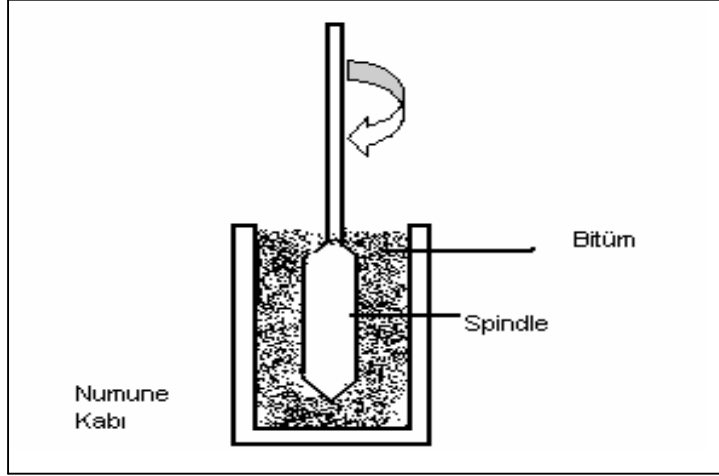
Dönel viskozimetre bitümün yüksek sıcaklıklardaki vizkozitesi, ne derece pompalanabilirlik ve işlenebilirliğe sahip olduğunun tespiti için akış karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılır [12,13].



Şekil 3.1. Dönel viskozimetrenin şematik görünümü

Dönel viskozite cihazında silindirik bir çubuk (spindle) sabit bir sıcaklıkta bitüm numunesi içine daldırılarak, kendi etrafında dönüş hızını sabit tutucak burulma

kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenir. Bitümün agrega ile karıştırılacak kıvamda olup olmadığını anlamak amacıyla yapılan bu deney ayrıca, karışım dizaynında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının da tahmininde kullanılabilecek sıcaklık-viskozite eğrilerinin hazırlanmasını da sağlar [12].



Şekil 3.2. Isıtmalı kaptaki deneyin işleyişi

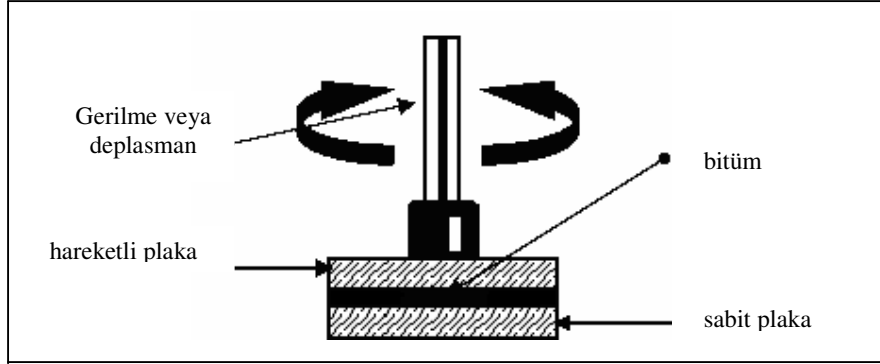
Dinamik kesme reometresi (DSR)

Dinamik kesme reometresi (DSR) bitümlü bağlayıcıların yüksek ve orta derece ısılarındaki kompleks kesme modülü (G^*) ve faz açısını (δ) ölçmek suretiyle hem viskoz hemde elastik davranışını belirlemek üzere kullanılır [14].

Gerilme ve yer değiştirme kontrollü olmak üzere iki çeşit dinamik kesme reometresi bulunmaktadır. Gerilme kontrollü reometrede uygulanan kuvvet sabit tutulur ve buna göre her salınımda yer değiştirme farklı olabilir. Yer değiştirme kontrollü reometrede ise bunun tersine sabit bir deplasmanı sağlayacak kuvvet her salınımda değişmektedir [12].

G^* malzemenin sürekli tekrar eden kesme gerilmelerine tabi tutulmasıyla deformasyona karşı gösterdiği toplam direncin bir ölçüsüdür. δ ise viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarının göstergesidir. G^* ve δ değerlerinin ölçülmesi

suretiyle DSR deneyi bitümlü üst yapının hizmet sıcaklığında nasıl bir sertlik özelliği taşıdığının tahminini mümkün kılar.



Şekil 3.3. Dinamik kesme reometresi işleyişi [12]

Kompleks kesme modülü G^* , toplam kesme gerilmesinin ($\tau_{\text{maks}} - \tau_{\text{min}}$) toplam deplasmana ($\gamma_{\text{maks}} - \gamma_{\text{min}}$) oranıdır.

$$G^* = \frac{(\tau_{\text{maks}} - \tau_{\text{min}})}{(\gamma_{\text{maks}} - \gamma_{\text{min}})} \quad (3.1)$$

Uygulanan gerilme ile meydana gelen yer değiştirme veya uygulanan yer değiştirme ve oluşan gerilme arasındaki gecikme zamanı faz açısı γ ya bağlıdır. İyi bir elastik malzeme uygulanan yüke hemen karşılık verir ve bu da gecikme süresinin veya faz açısının sıfır olduğunu gösterir. Viskoz malzemelerde yükleme ve cevap verme arasında bir gecikme olur ve bu durumda açı 90° ye doğru yaklaşır. Bitüm davranışı ise bu iki durum arasındadır [12].

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (3.2)$$

$$\gamma = \frac{\theta r}{h} \quad (3.3)$$

Burada;

T : Uygulanan maksimum burulma

r : Numune yarıçapı (12,5 veya 4 mm)

θ : Dönme açısı

h: Numune kalınlığı (1 veya 2 mm)

G^* ve δ nın iki şekli kullanılır. Kaplama deformasyonu $G^*/\sin\delta$ değeri deney sıcaklığında, orjinal bitüm için 1 kPa, RTFO işlemi görmüş bitüm için 2,20 kPa dan daha büyük değerlerle sınırlandırılmıştır. Yorulma çatlakları ise $\sin\delta.G^*$ değerinin deney sıcaklığında, PAV işlemi görmüş malzemelerde 5 000 kPa dan küçük değerlerle sınırlandırılmıştır.

Asfalt çubuk eğilme deneyi (BBR)

Eğilme deneyi ile düşük servis sıcaklıklarında oluşabilecek termal çatlakların derecesi hakkında fikir edinmek için bağlayıcının sünme rijitliği hesaplanmaktadır [14].

Deneyde bitümün, sabit yük altında gösterdiği sünme ve şekil değiştirme özellikleri belirlenmeye çalışılır. Deney sıcaklığı bitümün servis durumundaki karşılaştığı en düşük sıcaklığa göre değişmektedir.

Küt uçlu bir mil basit destekli bitüm çubuğa ortasından yük uygular. Mile ağırlık takılarak yük altındaki sertlik tespit edilmeye çalışılır ve çubuğun ortasında oluşan yer değiştirme ölçülerek sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m) hesaplanır.

$$S_{(t)} = \frac{PL^3}{4bh^3\delta_{(t)}} \quad (3.4)$$

Burada;

$S_{(t)}$: 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)

$\delta_{(t)}$: t anındaki yer değiştirme (mm)

60 s için bu sertlik değeri 300 MPa dan büyük olmamalıdır. m değeri zamana karşı $S_{(t)}$ değerinin değişimini temsil eder. Bu değer de bilgisayar programı tarafından otomatik olarak hesaplanır. m değerini belirlemek için sertlik değişik yükleme zamanlarında ölçülür ve sertlik zaman eğrisinde belirli bir andaki teğetin eğimi m değerini verir. Bu değer 60 s için en az 0,300 olmalıdır [12].

3.1.3. Yumuşama noktası deneyi

Bitümün sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılıklarını ve hangi sıcaklıkta akmaya başladığını ölçmek için uygulanan deneydir.

Yumuşama noktası genel olarak, bir su banyosu içine yerleştirilmiş ve üzerinde bir bilye bulunan standart bir kalıp içerisindeki bitümlü malzemenin, belirli bir hızla ısıtılması sonucunda yumuşayan malzemenin tabana değdiği anda termometreden okunan sıcaklıktır [15].

Bitümlü karışımların sıcak havalarda deformasyona uğraması bitümlü bağlayıcının yumuşama noktasına bağlıdır. 25 °C daki penetrasyonları aynı olan iki bağlayıcıdan yumuşama noktası yüksek olan sıcaklık değişimlerine daha dayanıklıdır. Dolayısıyla kaplamada kullanılan bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası düşükse viskoz davranış ve kalıcı deformasyon erken başlar.

Bitümlü kaplamanın kalıcı deformasyonlarında etkili faktörlerden biri yumuşama noktasıdır. Yumuşama noktası yüksek bağlayıcının kullanıldığı karışımlarda tekerlek etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olduğu görülmektedir. Tekerlek izine hassas karışımlar için yumuşama noktası sıcaklığı tekerlek iziyle iyi bir korelasyon

sağladığı ve yumuşama noktasındaki 5-6 °C lik bir azalmanın %20 daha fazla tekerlek izine yol açtığı belirtilmektedir [16].

3.1.4. Düktilite deneyi

Düktilite bitümün, uzama veya çekilebilme özelliğini ifade etmektedir. Tanım olarak, asfalt çimentosundan yapılmış standart bir briketin, belirli sıcaklık ve hızda kopmadan çekilebildiği uzunluğun cm cinsinden ifadesi olarak tanımlanabilir [9]. Bitümün bağlama yeteneği düktilitesine bağlı olup, düktilite değeri yüksek olan bitümlerin bağlayıcılık özellikleride yüksek olmaktadır. Ancak, çok yüksek düktilite değerine sahip bitümlerin ısıya karşı fazla duyarlılık gösterdiği belirtilmektedir [17].

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 [18].

3.1.5. Çözünürlük (bitüm yüzdesi) deneyi

Bu deney içerisinde mineral madde bulunmayan yada çok az bulunan bağlayıcıların organik çözücüler içerisinde çözünürlüğünü belirlemek için yapılır. Bu organik çözücüler, trikloretilen, karbon sülfür, benzen gibi çözücülerdir. Asfalt çimentolarının trikloretilende en az %99 çözünmesi gerekir [19].

3.1.6. İnce film halinde ısıtma deneyleri

İnce film halinde ısıtma deneyi (TFOT), bitüm tesislerinde agrega ile bitüm karıştırıldığı zaman meydana gelen yaşlanmayı temsil etmektedir. İnce film halinde ısıtma deneyinde, standart çaptaki küçük bir tepsinin içine yine standart kalınlıkta

olacak miktarda numune konularak, tepsinin içine yayılması sağlanır. Belirli bir süreyle 163 °C sıcaklığa ısıtılan fırının içerisindeki taşıyıcılara yerleştirilir. Belirli bir süre bu sıcaklıkta tutulur. Sonra çıkarılarak oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Isıtmadan önceki ve sonraki ağırlıkların 0,01 g duyarlılıkla tartılarak ağırlık kaybı saptanır [20].

SUPERPAVE yöntemi ile hazırlanacak sıcak karışımda kullanılması düşünülen bitüme yaşlanmayı temsilen “Döner İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFO)” uygulanmaktadır. Deney sıcaklığı yine 163 °C’dır.

Döner ince film halinde ısıtma deneyleri iki amaca hizmet etmektedir; Birincisi, bitüm içerisinde buharlaşan kütle miktarının tayini ve ikincisi, fiziksel özellikler ile ilgili deneylere belli ölçüde yaşlanmış numune temin etmektir.

Döner İnce Film Halinde Isıtma Deneyinde kullanılan etüv dairesel, dikey ve kendi eksenini etrafında dönen numune şişelerin üzerine takılabileceği bir taşıyıcıya sahiptir. Şişeler taşıyıcı ile birlikte dönerken en alt konuma geldiklerinde hava üfleyici parça sıra ile her bir şişenin içerisine hava püskürtür. Deney sonrasında numuneler soğutulur ve 0,001 g hassasiyetler tartılır [12].

3.1.7. Parlama noktası deneyleri

Parlama noktası, bir maddenin alev temasında geçici olarak parladığı fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık olarak tanımlanır [9]. Parlama noktasının tayini için çeşitli yöntemler vardır. Parlama noktası 15-79 °C arasında olan bitümlü maddelerin parlama noktaları Tagliabue açık kap deneyi ile saptanırken [21], daha yüksek parlama noktasına sahip asfalt çimentoları ve SC sıvı petrol asfaltları gibi bitümlü maddeler için Cleveland açık kap deneyi [22] kullanılır. MC ve RC sıvı petrol asfaltlarında ise Tagliabue kapalı kap (15-74 °C aralığı için) deneyi ile parlama noktası belirlenmektedir [23].

Açık kap deneyleri kabaca, bitümlü malzemenin açık bir kapta ısıtılması sırasında, yüzeyin biraz üzerinde bir kıvılcım tatbik edilmesi şeklindedir. Yüzeyin herhangi bir noktasında alevin görüldüğü andaki sıcaklık, deneye tabi tutulmuş olan bitümlü malzemenin parlama noktası olarak alınır.

4. BİTÜM ÖZELLİKLERİNİN PERFORMANSA ETKİLERİ

Mühendislikte kullanılan malzemeler yüke ve zamana bağlı olarak gerilme-deformasyon yönünden üç gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar;

Elastik malzemeler

Viskoz malzemeler

Visko-elastik malzemeler

Elastik malzemeler gerilmeye tabi tutulduklarında yükün miktarı ile doğru orantılı olarak deformasyon miktarı artar ve tatbik edilen gerilme ortadan kalktığında deformasyon da ortadan kalkar. Viskoz malzemeler de, gerilme tatbik edildiğinde deformasyon başlar ve gerilme tatbik edildiği sürece deformasyon yükün tatbik süresine bağlı olarak artar. Ancak, gerilme kalktığında deformasyon kalkmaz yani kalıcı deformasyon oluşmaktadır. Viskoelastik malzemeler ise ne tam elastik ne de tam viskoz davranış gösterirler. Ayrıca hızlı yüklendiklerinde elastik davranış gösterirken yavaş yüklendiklerinde ise viskoz davranış gösterirler. Yükleme hızının ne hızlı ne de yavaş olduğu durumlarda ise viskoz ve elastik davranışların bileşimi şeklinde davranırlar [7].

Bitüm viskoelastik malzeme olduğundan, sıcaklığa ve yükleme süresi bağlı olarak davranışları tam viskozdan elastik hale kadar değişiklik göstermektedir. Bu tip malzemeler yüksek yükleme hızlarında (hızlı taşıtlar) elastik, düşük yükleme hızlarında (yavaş ya da duran taşıtlar) viskoz, orta yükleme hızlarında ortak elastik ve viskoz davranış gösterirler.

Ayrıca, bitüm sıcaklık değişikliklerinden etkilenmektedir. Çünkü bütümün ısıtılmasıyla elastik katıdan viskoz sıvıya dönüşmesi mümkündür. Dolayısıyla, ısı ve yükleme süresi bitümün reolojik davranışını da belirlemektedir.

Bitüm agregalarla karıştırıldığında reolojik özellikler karışıma da geçmektedir. Bu nedenle, bitüm seçimi hazırlanacak karışım için reolojik özellikler önemli olup, kaplamanın performansını etkileyecektir.

Bitümlü malzemelerin hazırlama ve sıkıştırma işlemleri süresince ve yüksek hizmet sıcaklıklarında özellikleri viskoziteleri ile değerlendirilmektedir. Ancak arazideki hizmet süresinde genellikle bitümler viskoelastik davranış göstermekte olup, özellikleri rijitlik modülü ile ifade edilmektedir.

Viskoelastik malzemeler için $t=0$ yükleme anında uygulanan bir çekme gerilmesi (σ), yükleme süresi ile orantılı olmayan bir şekilde değişmeye (ϵ) sebep olur. t anındaki rijitlik modülü uygulanan gerilme ve t anında meydana gelen şekil değiştirme olarak tanımlanmaktadır. Rijitlik modülü yükleme süresi ve aynı zamanda sıcaklığa bağlı olduğundan herhangi bir rijitlik modülünün ölçümünde hem sıcaklığı hem de yükleme süresini belirtmek gerekir.

4.1. Bitümün Isıya Duyarlılığı

Bitümlerin kıvamlılıklarının ısıya bağlı olarak değişmesi ısıya karşı duyarlı olmasından kaynaklanmakta olup, ısıya duyarlılıklarının az olması istenir. Bu nedenle yüksek hava sıcaklıklarında yeterince katı (veya rijit) olması, çok düşük sıcaklıklarda ise çok fazla gevrek (kırılgan) olmaması istenilmektedir. Bu durum sağlamadığı takdirde bitümlü kaplamalarda yüksek sıcaklıklarda deformasyon, düşük sıcaklıklarda ise çatlama eğilimi gösterirler. Tekerlek izi ve düşük ısı çatlaklarının oluşumunun en önemli nedeni bitümlerin bu özelliğinden kaynaklanmaktadır [7].

Bitümlü bağlayıcının sıcaklığa hassaslığının göstergesi penetrasyon indisi ile belirlenmekte olup, yumuşama noktası ve penetrasyon değerine bağlıdır. Penetrasyon indisi (I_p) aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanır [3].

$$I_p = \frac{20 * I_{RaB} + 500 * \log P - 1952}{I_{RaB} - 50 * \log P + 120} \quad (4.1)$$

Burada;

I_{RaB} : Yumuşama noktası °C

P : 25 °C ‘daki penetrasyon, * 0,1 mm

Penetrasyon indisi, sıcaklık hassasiyeti yüksek olan bitümler için -3 civarında bir değer ile sıcaklık hassasiyeti düşük olan oksitlendirilmiş bitümler için +7 civarında bir aralıkta değişir [2].

4.2. Viskozitenin Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi

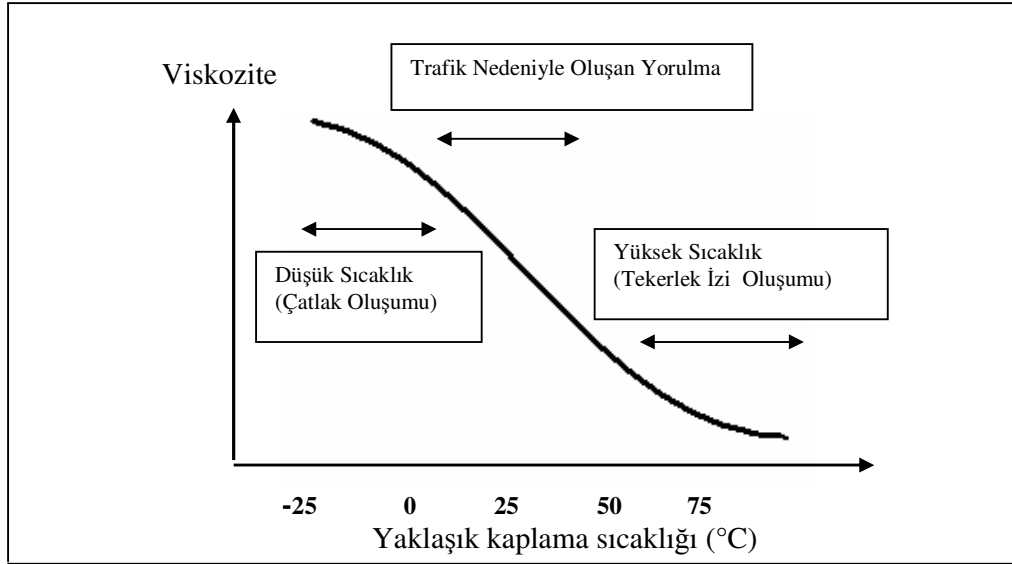
Bitümün, sadece penetrasyon değerleri ile sınıflandırılmaları günümüz teknolojisinin gelişmeleri ışığında yetersiz kalmaktadır. Avrupa ve Amerika’da, bitüm sınıflandırılmalarında kullanılan, temel bir dayanak viskozite değerleridir.

Viskozite, sıvının akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Akış karakteristiklerinin (kıvamlılığın) bir ölçüsüdür. Bu nedenle bitümün katıldıkları sıcak karışımların önemli özelliklerini (reolojik) etkilemektedir.

Farklı hava sıcaklığı aralıklarında bitümün viskozitesi değişmektedir. Bu değişikliğin bitümlü kaplamada sebep olduğu sorunlar ise tekerlek izi, çatlak ve yorulma olarak karşımıza çıkmaktadır.

Hizmet aşamasında kaplama sıcaklığı yaklaşık, -25°C ile 0°C arasında iken, karışımın viskozitesi oldukça yüksektir ve bu sıcaklık aralığında düşük ısılardan dolayı, kaplamada düşük sıcaklık çatlakları oluşumu gözlenmektedir. Kaplama sıcaklığı yaklaşık 10°C ile 40°C arasında olduğunda, karışımın viskozitesi azalarak, karışım yumuşamaktadır. Bu sıcaklık aralıklarındaki karışımda, trafik yükü etkisi ile oluşan yorulma döngülerinin oluşumu artmaktadır. Kaplama sıcaklığı yaklaşık, 40°C

de üstüne çıktığında ise karışımın vizkozitesi daha da azalmakta ve kaplamada taşıtların etkilerinden dolayı tekerlek izi oluşumu hızlanmaktadır [24].



Şekil 4.1. Bitümlü karışımın farklı sıcaklıklardaki hareketler [24]

Ülkemizde yol yapımında kullanılan bitüm sınıflarının seçimi, kaplamanın yapılacağı bölgenin iklim koşulları göz önüne alınarak yapılmaktadır. Sıcak iklim bölgelerinde yapılacak yollarda kullanılacak bitümlü sıcak karışımlarda sert bitüm (yüksek viskoziteli), soğuk iklim bölgelerindeki kullanımlarda ise yumuşak (düşük viskoziteli) bitüm kullanılmaktadır. Bunlara ilave olarak, ağır trafikli, gece gündüz ve mevsimsel sıcaklık farklılıklarının yüksek olduğu ya da çok sıcak bölgelerde yapılacak bitümlü sıcak karışımların yapımında polimer modifiye bitüm kullanılması tercih edilmektedir [4].

4.3. Kohezyonun Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi

Bitümlü karışımın stabilitesi agregalar arasındaki içsel sürtünmeye ve bağlayıcının kohezyonuna bağlıdır. Kohezyon bir malzemenin kopmaya karşı koyan moleküller arası çekimi, içsel sürtünme veya içsel bağ olarak ifade edilmektedir. Bitümlerin kohezyon mukavemeti düşük ısıdaki duktiliteleri (sünme) ile karakterize

edilmektedir. Düktilite standart bir kalıp içinde şekillendirilen bitüm numunesinin düktilite cihazı ile belli bir ısıda belirli bir hızla çekilerek sünmeye tabi tutulduğunda kopmanın olduğu uzunluk miktarıdır.

Kohezyon, yükleme hızı (trafik hızı) arttıkça, bitümlü bağlayıcının viskozitesi arttıkça yada kaplamanın sıcaklığı düştükçe artmaktadır [25].

Bitümün düşük ısılardaki sünekliği kontrol edilerek kohezyon mukavemetindeki değişimi belirlenmeye çalışılarak, düşük ısılarda büzülerek gevrek davranışından dolayı oluşan düşük ısı çatlakları kontrol edilebilmektedir.

4.4. Adezyonun Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi

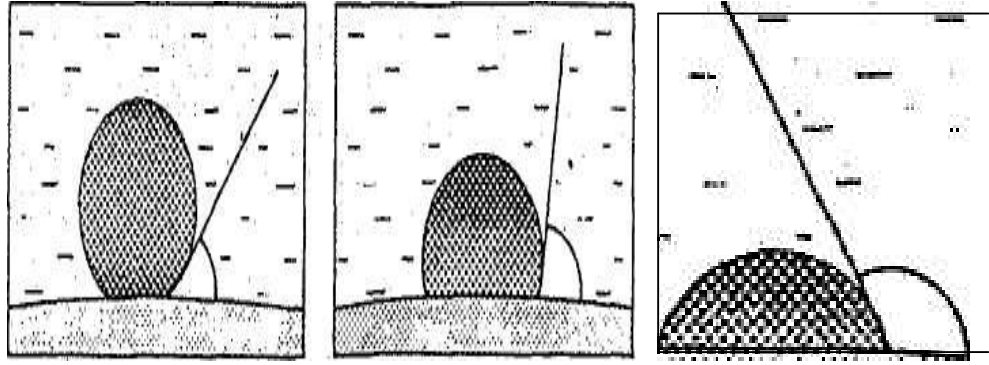
Bitümün adezyon özelliği bitümün kohezyon özelliğinden farklıdır. Fakat bitümlü kaplamaların kohezyon özelliği, bitümün agregaya yapışma yeteneğine yani bitümün adezyonuna bağlıdır. Bitümün adezyonu agregaya yapışabilme yeteneği olarak adlandırılırken, bitümün kohezyonu ise yük altında aynı cins malzeme içerisinde kopmadan uzayabilme yeteneğidir.

Esnek kaplamaların yüzeylerindeki kusurların büyük kısmı genellikle adezyon eksikliği veya bitümün soyulmasından kaynaklanmaktadır. Agregayı saran bitüm filmi bir takım etkenlerle birlikte su tarafından soyulmaya başlanmakta ve trafiğin etkisiyle de soyulma artmaktadır.

Bitümün agregaya ile iyi bir adezyon yapabilmesi için viskozluğunun mümkün olduğunca az olması istenir. Böylece agregaya yüzeyine yapışabilme yeteneğini yani su gibi ıslatma gücünü kazanabilmektedir. Katı bitüm veya viskozitesi fazla olan bitümün yüzeyel çekim kuvveti oldukça düşük olup, agregaya ile yapışması güçtür [7].

Soyulmayı önleyici katkıları agregaya ile bitüm arasındaki adezyonu artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Soyulmayı önleyici katkı maddesinin kullanılması halinde ıslak ortamda agregaya yüzeyine yapışan bitüm küreciğinin temas açısı giderek artmakta

yani bitüm küreciği agrega yüzeyine tamamen yapışarak güçlü bir adezyon oluşturmaktadır [7].



Şekil 4.2. Adezyon artırıcı katkıların etkisi [7]

Bitümlü bağlayıcı ve agrega arasındaki adezyon pek çok parametre arasındaki etkileşmeyi içermekle birlikte bu konuda çeşitli teoriler ortaya sürülmüştür. Bunlarda bazıları;

Kimyasal reaksiyon teorisi

Mekanik teori

Yüzey enerjisi teorisi

Kimyasal reaksiyon teorisinde, bitüm ve agrega arasındaki kimyasal etkileşim göz önüne alınmaktadır. Bu kavramda agregaların silis içeriği ve asit bazlık durumu ile bağlayıcının kimyasal bileşimi önem kazanmaktadır.

Mekanik teoride ise karışımda kullanılan agregaların oluşturduğu kenetlenmenin önemi üzerinde durulmakta, agregaların yüzey pürüzlülüklerinin, porozitelerinin ve şekillerinin bu kenetlenmedeki etkisi incelenmektedir.

Yüzey enerjisi teorisi de termodinamik olarak minumum enerji halinde dengede kalmaya dayalı olup, bu teorilerden en çok kabul görenidir.

4.4.1. Bitümün yüzey ve arayüzey gerilimi

Yüzey ile ilgili prosesler genellikle yüzey enerjilerine sahip su, organik ve anorganik maddeler gibi katı ve sıvılar arasındaki arayüzey gerilimlerine bağlıdır. Bu arayüzey gerilimleri sıcaklık, basınç ve malzeme özelliklerine göre değişmektedir. Yüzey gerilimi ise yüzeyin genişlemeye karşı gösterdiği direnç kuvveti olarak ifade edilebilir ve sıcaklıktan oldukça etkilenmekte, sıcaklık artarken yüzey gerilimi düşmektedir.

Yüzey gerilimi, bitümlü malzemenin agrega yüzeyine yayılma ve ıslatmasını etkileyen temel faktörlerden biridir. Islatma derecesi, bitüm moleküllerinin kendi aralarındaki çekime karşılık (bitümün kohezyon kuvveti), bitüm ve agrega molekülleri arasındaki çekim gücüne (karışımın adezyon kuvvetine) bağlıdır. Bitümün içindeki yüksek moleküler çekim, bitümün yüksek yüzey gerilimine ve bunun sonucu olarak da düşük ıslatabilirliğe yol açmaktadır.

Ara yüzey gerilimi ise katıyı ıslatıp, sıvıyı yüzeyde tutan kuvvetlerin ölçüsü olup, adezyon mekanizmasının katılar ve sıvılar arasındaki arayüzey enerjilerine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Düşük ara yüzey geriliminde malzemeler arasındaki çekici güçler daha büyüktür. Bu nedenle agreganın bitüm ile kaplanması için su-agrega arasındaki ara yüzey geriliminin, bitüm-agrega ara yüzey geriliminden daha fazla olması gerekir.

Bitüm-agrega ara yüzey gerilimi bitümün yüzey gerilimine bağlıdır. Bitüm-agrega ara yüzey gerilimi, bitümün yüzey geriliminin azalması ile azalır. Dolayısıyla agrega bitüm ile kolay kaplanır [26].

4.4.2. Temas açısı ve yüzey enerjisi

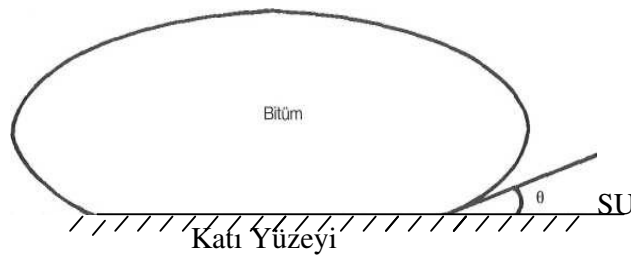
Yüzey özelliklerinin karakterizasyonu ince-film teknolojisi, korozyon, adezyon mekanizmaları vb. ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda büyük önem taşımaktadır.

Hem fiziksel hem de kimyasal değişikliklerin öncelikle maddelerin birbiriyle teması ile başlaması, temas yüzeylerinin ayrıntılı kimyasal ve fiziksel özelliklerinin bilinmesini gerektirmiştir.

Son yıllarda yüzey analizi için çok çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Malzemelerin yüzeylerini anlamak için katı ve sıvıların yüzey enerji değerleri deneysel olarak veya bazı formüller kullanılarak ölçülebilmektedir.

Katı, sıvı ve gaz bileşenlerin bulunduğu bir ortamda, sıvıların katı yüzeylerle teması sırasında, temastaki sıvı yüzeyi katı düzlemi ile temas açısı olarak adlandırılan bir açı oluşturur. Bu açının büyüklüğü, sıvının kendi molekülleri arasındaki çekim kuvvetleri (kohezyon kuvvetleri) ile sıvı katı arası çekim kuvvetlerinin (adezyon kuvvetleri) göreceli büyüklüğüne bağlıdır. Kohezyon kuvvetlerinin büyüklüğü, adezyon kuvvetlerinin büyüklüğünden ne kadar fazla ise, sıvı katı arasındaki temas açısı da o denli büyük olur.

Diğer bir ifade ile büyük bir temas açısı sıvı katı çekim kuvvetlerinin azlığının, küçük bir temas açısı ise bu kuvvetlerin büyük olmasının bir göstergesidir. Ayrıca temas açısının büyüklüğü, katı yüzeyin düzlüğü ve temizliğinden başka sıvının saflık derecesine de bağlıdır.



Şekil 4.3. Su altında bir katının yüzeyine yapışmak isteyen bitüm damlacığının şematik gösterimi [2]

Gaz, sıvı ve katı yüzeylerinin bir arada bulunduğu ıslatma sisteminde yüzey gerilimi γ ile ifade edilir. Temas açısının büyüklüğü, sıvının kendi molekülleri arasındaki çekim kuvvetleri ile sıvı-katı arası çekim kuvvetlerinin büyüklüklerinin farkına

bağlıdır. Bu fark ne kadar büyük olursa sıvı-katı arasındaki temas açısı o denli büyük olur. Sıvı damlası tarafından katı yüzeyde oluşan ıslatma, arayüzey enerjilerini içeren termodinamik eşitlik olan Young eşitliği ile ifade edilir.

$$\gamma_{SG} \cos \theta = \gamma_{KG} - \gamma_{KS} \quad (4.2)$$

Young eşitliği ile katı yüzeyinde duran sıvı damlasının faz sınırındaki γ_{KG} , γ_{KS} ve γ_{SG} gibi yüzey enerji bileşenlerinin termodinamik dengesi tanımlanır. Burada γ_{KG} , γ_{KS} ve γ_{SG} ile sıvı (S), katı (K) ve bunların doymuş buharından (G) oluşan ara yüzeylerin serbest enerji bileşenleri gösterilmektedir. Young eşitliğinde fazların karşılıklı dengede olduğunun kabul edilmesi yanında katı yüzeyindeki sıvı damlasının basıncı ihmal edilmiştir [27].

Denge halinde, adsorplanan sıvıyı, yüzeyden ayırmak için gerekli iş veya başka bir ifadeyle katı ve sıvı arasındaki adezyon enerjisi Dubre eşitliğiyle verilir.

$$-\Delta G_A = W_A = \gamma_{KG} + \gamma_{SG} - \gamma_{KS} \quad (4.3)$$

Eş. 4.2 ve 4.3'ün birleştirilmesiyle Young-Dubre eşitliği olarak da bilinen katı-sıvı adezyon eşitliği elde edilir.

$$W_A = \gamma_{SG} (1 + \cos \theta) \quad (4.4)$$

Katı ve sıvı maddeler arasında ara yüzey toplam serbest enerjisi ise Eş. 4.5 ile hesaplanmaktadır.

$$\gamma_{KS} = \left(\sqrt{\gamma_K^{LW}} - \sqrt{\gamma_S^{LW}} \right)^2 + 2 \left(\sqrt{\gamma_K^+ \gamma_K^-} + \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-} + \sqrt{\gamma_K^+ \gamma_S^-} + \sqrt{\gamma_K^- \gamma_S^+} \right) \quad (4.5)$$

Van Oss katı ve sıvı bileşenlerin yüzey serbest enerjilerinin hesaplanmasında kullanılan iki metot önermiştir [28]. Bu metotlardan bir tanesi katı üzerinde üç farklı polar sıvının değme açısının ölçülmesiyle katının γ^{LW} , γ^+ ve γ^- değerleri hesaplanabildiği metottur. Ancak bu sıvıların önceden γ^{LW} , γ^+ ve γ^- değerlerinin bilinmesi zorunludur.

Çizelge 4.1. Değme açısı belirlemede kullanılan sıvıların 20 °C’da yüzey enerji bileşenlerinin değerleri (mJ/m²) [28]

Sıvı	γ_s	γ_s^{LW}	γ_s^{AB}	γ_s^+	γ_s^-
APOLAR					
Parafin	28,9	28,9	0	0	0
Cis-Dekalin	32,2	32,2	0	0	0
α -Bromonaftalin	44,4	44,4	0	0	0
Diiyodometan	50,8	50,8	0	0	0
POLAR					
Su	72,8	21,8	51,0	25,5	25,5
Gliserin	64,0	34,0	30,0	3,92	57,4
Formamit	58,0	39,0	19,0	2,28	39,6
Etilen glikol	48,0	29,0	19,0	1,92	47,0

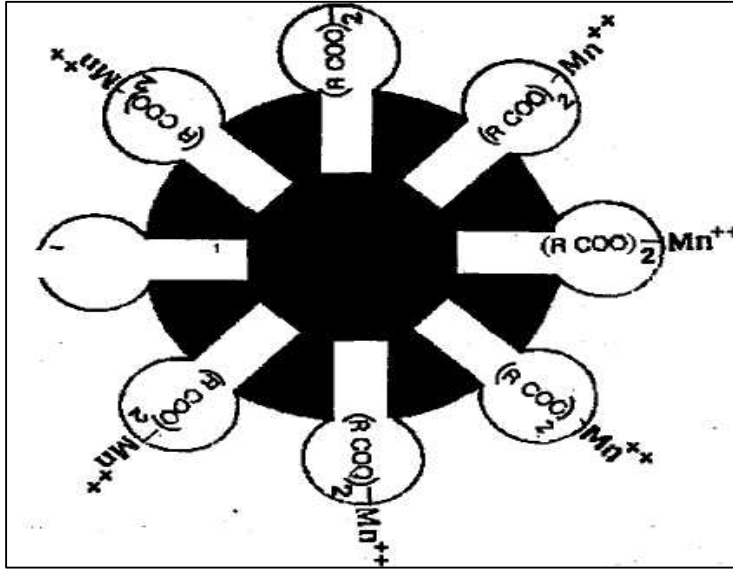
Diğer metotta ise önce bir apolar sıvı ile daha sonra diğer iki polar sıvı ile ölçülen değme açılarının kullanılmasıyla katının diğer yüzey enerji bileşenleri hesaplanır.

4.4.3. Yüzey aktif maddeler ve bitümün yüzey gerilimine etkisi

Yüzey aktif maddeler bir ucu apolar özellikte diğer ucu ise polar özellikte olan uzun karbon zincirli moleküllerdir. Agregalar ise polar, bitüm apolardır. Agregaların polarite dereceleri agregaya göre değişir ve polarite derecesi molekül ucundaki elektron konsantrasyonuna bağlıdır.

Yüzey aktif maddeler, gerek polar kısımları vasıtasıyla ve gerekse içerdikleri oksijen, azot, sülfür atomlarının hidrojen bağı meydana getirmesi suretiyle adezyonu artırır. Bu tür atomlar molekülde karbon zincirinin sonuna girerek polar ucu oluştururlar. Böylece molekülün bir ucu herhangi bir apolar maddeye doğru çekilen apolar, diğer ucu polar madde tarafından çekilen polar gruptur.

Bu tür bileşikler kullanılarak bağlayıcının yüzey gerilimi düşürülüp, agregayı ıslatması sağlanarak bitüm-agrega arasında sudan etkilenmeyen kuvvetli bağlar oluşturulur ve soyulmaya karşı mukavemeti artırılır [29].



Şekil 4.4. Anyonik yüzey aktif maddelerin bağlanma mekanizması [29]

Bitüm damlacığının tabanında θ , 90 °C den küçük olduğunda $(1+\cos\theta)$ değeri, 1'den büyük olacaktır. Dolayısıyla bitümün agregaya yüzeyine yayılması güçleşecek, yüzeyde damlalar halinde toplanma eğilimi gösterecektir.

Kasyonik yüzey aktif özellikte maddeler de bitüm içerisine katıldığında agregaya yüzeyinde güçlü bir şekilde absorbe edilir ve bitümün agregaya yüzeyinde yayılmasının gerçekleşmesini sağlayacak temas açısı artar.

4.5. Bitümün Dayanıklılığı

Bitümlü bağlayıcının dayanıklılığı sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir.

Organik maddelerin bir çoğunda olduğu gibi bitüm oksijenden, ultraviyole ışınlarından ve sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. Bu dış etkilere bitümün sertleşmesine neden olmaktadır.

Bitümlü bağlayıcının çeşitli nedenlerden dolayı sertleşmesi ve kırılgan hale gelmesine de “yaşlanma” veya “zamana bağlı yaşlanma” denilmektedir. Yapılan ayrıntılı çalışmalar yaşlanmanın kısa ve uzun dönem yaşlanma olmak üzere iki aşamada oluştuğunu gösterilmektedir [30].

Kısa dönem yaşlanma, sıcak karışımın depolanma, plente taşınma, plente karıştırılma, şantiyeye taşınma, serilme ve sıkıştırılma işlemleri sırasında; uzun dönem yaşlanma ise, yolun servis ömrü boyunca oluşmaktadır.

Bitümün sertleşmesine ilişkin dört esas mekanizma tanımlanmıştır. Bunlar; oksitlenme, uçucu bileşen kaybı, fiziksel sertleşme ve sızma sertleşmesi [2].

Oksitlenme sonucu sertleşme diğer faktörlerin yanında yaşlanmanın ana sebebi olarak kabul edilebilir. Bitüm havayla teması geçtiğinde yavaşça oksitlenir. Oksijen içeren gruplar daha yüksek moleküler ağırlıklı gruplarla bir araya gelir ve bitümün viskozitesinin artmasına neden olur.

Uçucu bileşenlerin buharlaşmasının ana sebebi sıcaklık artışıdır ve dış etkenlere maruz kalma koşulları da etkilidir. Penetrasyon sınıfı bitümlerin uçucu bileşen içeriği göreceli olarak daha az olduğundan, uçucu bileşen kaybı ile oluşan sertleşme miktarı diğer bitüm sınıflarına nispeten daha az olmaktadır.

Bitüm ortam sıcaklığında belli bir süre kaldığında ve bitüm moleküllerinin yeniden yönelmesi ile yavaş yavaş kristalleşmesi söz konusu olduğunda fiziksel sertleşme meydana gelmektedir. Fiziksel sertleşme geri dönüşümlü olup, fiziksel yaşlanmaya maruz kalmış bağlayıcılar orjinal viskozite değerine kadar ısıtılacak olursa yaşlanma büyük ölçüde giderilmekte ancak oksidasyon sertleşmesi kesinlikle giderilememektedir.

Sızma sertleşmesinde ise bitümün yapısındaki yağlı kısımlar ısı etkisi ve zamanla bitümden ayrılarak sertleşmeye neden olmaktadır.

4.5.1. Yapım sürecinde bitümün yaşlanması

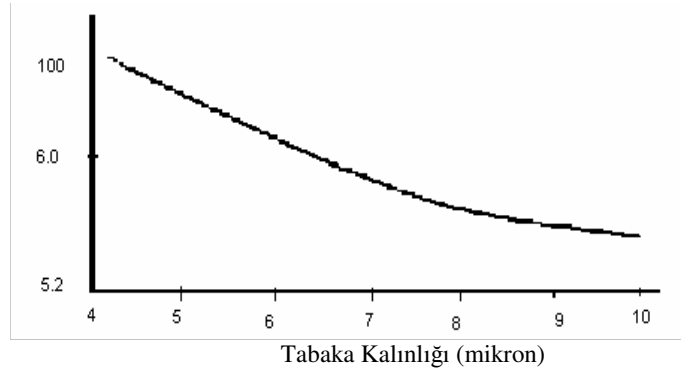
Bitümlü bağlayıcı, hizmete başlayıncaya kadar yapılan işlemlerde önemli derecede oksidasyona uğramakta ve reolojik davranışı, performansı ve dayanıklılığı büyük ölçüde etkilemektedir.

Bitüm, tank içinde yüksek sıcaklıkta ve büyük bir kütle halinde iken çok az bir oksidasyon meydana gelmektedir. Bunun nedeni, oksijene maruz kalan bitüm yüzeyinin tüm kütleyle oranla çok küçük olmasıdır. Ancak, bağlayıcı tank üstündeki taşıyıcı borudan geçip, belli bir mesafeden düştüğünde önemli miktarda oksidasyon meydana gelmektedir. Bunun sebebi, bir borudan tanka düşen bitümün yüzey alanının daha geniş olması sebebi ile oksijenin bitümle kolayca reaksiyona girebilmesidir [2].

Karıştırma işlemi sırasında ise tüm agrega ve dolgu maddeleri (filler) kalınlığı 5 ile 15 μ arasında değişen bitüm filmi ile kaplanmaktadır. Bu durum, karıştırıcı (mikser) içindeki karışımın oksidasyon ve uçucu bileşenden kaynaklanan yaşlanması için oldukça elverişlidir. Karıştırma işlemi boyunca yaklaşık olarak bitüm bir sınıf (100 pen iken 70 pen, 70 pen iken 50 pen gibi) sertleşmektedir [2]. Bu nedenle, uygun bir bağlayıcı seçiminde karıştırma sırasındaki yaşlanmanın göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Karıştırma işlemi sırasındaki yaşlanma ise sıcaklık, karıştırma süresi, bitüm miktarı ve bitüm film kalınlığı gibi birçok faktöre bağlıdır. Sıcak karışımın karıştırılma sıcaklığını yükseltmek ve karıştırma süresini uzatmak karışımdaki bitümü aşırı şekilde yaşlandırır. Burada, sıcaklık kontrolü ve bitüm miktarı çok önem taşımaktadır. Şekil 4.5’de film kalınlığına bağlı olarak yaşlanma indeksi değeri verilmektedir. Yaşlanma indeksi, yaşlanmış bitümün viskozitesinin (η_r), orjinal bitümün viskozitesine (η_o) oranı olarak verilmektedir.

Yaşlanma İndeksi (η_r/η_o)



Şekil 4.5. Bitümün tabaka kalınlığının yaşlanma indeksi üzerine etkisi [2]

Plentte karışımın hazırlanması sırasında oluşan oksidasyonun derecesi, laboratuvar ortamında, Döner İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT, ASTM D 2872, AASHTO T240) ile belirlenmeye çalışılmaktadır.

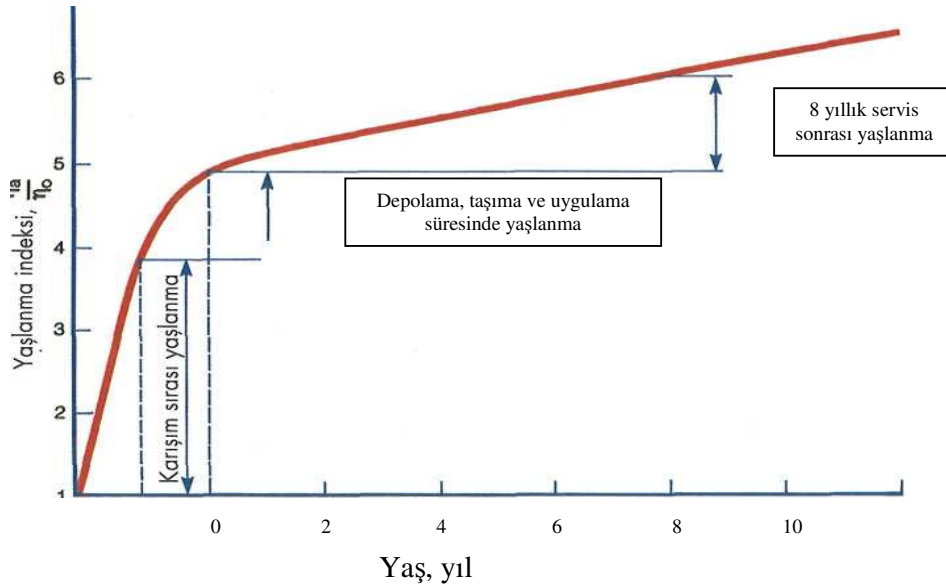
Hazırlanan karışımın depolanması sırasında meydana gelen yaşlanma karışımın sıcaklığına, bitüm film kalınlığına ve karışımın oksijene maruz kalma süresine bağlıdır. Bu nedenle, karışımların depolanması için kullanılan siloların yükleme ve boşaltma kapaklarının hava geçirmez olması önem taşımaktadır.

4.5.2. Hizmet ömrü boyunca bitümlü karışımın yaşlanması

Uzun dönem yaşlanma sürecini kapsayan hizmet aşamasında oksidasyon çok yavaş olmaktadır. Depolama, plente taşınma, karıştırma, serim yerine taşıma, serme,

sıkıştırma esnasında toplam oksidasyonun yaklaşık % 70'inin meydana geldiği ve yol üzerinde oksidasyonun yavaşladığı, uzun dönem yaşlanma sürecinde ise 8 yılda sadece toplam oksidasyonun geri kalan kısmı yani, %30 'unun oluştuğu görülmüştür [2].

Hizmet ömrü boyunca meydana gelen yaşlanma, karışımın sıkıştırılma derecesi (hava boşluk oranı), geçirgenliği ve agrega tanelerini saran bitüm film kalınlığı gibi faktörlere bağlıdır [30].



Şekil 4.6. Karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve servis sırasında bitümün yaşlanması [2]

Bitüm yaşlandıkça sertleşmekte, sertleşen bitümden dolayı da sıcak karışımın önemli özelliklerinden biri olan, esnekliği azalmakta, esnemeyen karışım ise üzerinde taşıdığı araçların etkilerinden ve çevre şartlarından dolayı daha kolay çatlayabilmektedir.

Bitümlü karışımlarda yüksek hava boşluğu oranı, yüksek hava geçirgenliği ve agrega danelerini saran bağlayıcı filminin inceliği, kaplamanın dayanıklılığını azaltan yaşlanmanın en önemli nedenlerindendir.

Hava boşluğu oranının artışı ile yaşlanmanın arttığı yapılan çalışmalarda görülmüştür. Kalın bağlayıcı filmi içeren karışımların ise daha esnek ve dayanıklı olduğu, ancak, ince bağlayıcı filmi içeren karışımların daha gevrek, kırılgan oldukları ve yolun servis ömrünü düşürdükleri sonucu ortaya çıkmıştır [30].

Genel olarak bitüm film kalınlığının artması ile, sıcak karışımın yaşlanmaya olan direncinin arttığı kabul edilmektedir.

Bitümlü sıcak karışımın yol üzerindeki hizmet sürecindeki oksidasyonu laboratuvar ortamında, Basıncılı Yaşlandırma Kabı Deneyi (Pressure Ageing Vessel, PAV, AASHTO PP1) ile belirlenmeye çalışılmaktadır. Deney işleminin sonunda bitümün reolojik davranışını belirlemek için (akma ve deformasyonunun seviyesi), dinamik kesme, direkt çekme, sünme sertliği gibi deneyler yapılmaktadır.

4.6. Yapım Süresince Bitüm Özelliklerinin Performansa Etkisi

4.6.1. Karıştırma ve taşıma

Karıştırma süresince, sıcak bitüm, kurutulmuş ve sıcak agregayı, belirlenmiş karıştırma koşulları altında, kısa sürede kolayca kaplayabilmelidir.

Karıştırma sıcaklığı arttıkça, agregayı ince tabakalar halinde saran bitümün oksitlenmesi de artacaktır. Örneğin 30 saniyelik standart karıştırma süresi için, karışım sıcaklığındaki 5,5 °C artış, bitümün yumuşama noktasında 1 °C'lik yükselmeye yol açabilmektedir.

Sıcak karışımın hazırlanması esnasında (yaklaşık 165°C) kullanılan bitümün vizkozitesi 0,2 Pa.s yani karıştırma sıcaklığında optimum bitüm viskozitesinin 0,2 Pa.s olması gerekmektedir.

Karıştırma sıcaklığının artması, bitümün viskozitesini ve beraberinde oksitlenme miktarını da hızlandıracaktır. Dolayısıyla, karıştırma sıcaklığının artırılması ile elde

edilen viskozitedeki azalmanın önemli bir kısmı, bitümün ilave oksitlenmesi sebebiyle kaybolacaktır.

Malzemenin düşük ortam sıcaklıklarında serildiği ya da uzun mesafeler boyunca taşınması gerektiği hallerde, karıştırma sıcaklığı bu durumlardan etkilenecektir. Bitümlü malzemenin uygun şekilde yalıtıma sahip kapalı araçlar içerisinde taşınması durumunda sıcaklık kaybı saatte yaklaşık 2 °C'dir [2].

4.6.2. Serme ve sıkıştırma

Malzemenin serilmesi sırasında sıcaklığında çok miktarda düşüş meydana gelir. Oluşan sıcaklık kaybı miktarına ise pek çok faktör etkilidir. Bunlardan bazıları, serilecek tabaka kalınlığı, çevre sıcaklığı, rüzgar hızı ve malzemenin üzerine serildiği alt tabakanın sıcaklığıdır. Serilen tabakanın soğumasına bu faktörlerden en çok etkileyeni ise rüzgar hızı ile tabaka kalınlığıdır.

Bir tabaka karışım serildikten sonra uygun ekipmanlar ile gereken düzeyde sıkıştırılabilmesi için uygun derecede işlenebilir olması gerekmektedir. Bu nedenle sıkıştırma sırasında, bitüm viskozitesinin 5 Pa.s ile 30 Pa.s arasında olması istenilmektedir. 5 Pa.s değerinden düşük viskozitelerde, malzeme genellikle sıkıştırılamayacak kadar oynak, 30 Pa.s değerinden yüksek viskozitelerde ise malzeme daha fazla sıkıştırılamayacak kadar sert olmaktadır [2].

4.7. Hizmet Aşamasında Bitüm Özelliklerinin Performansa Etkisi

Bitümlü karışımların serilip ve sıkıştırıldıktan sonra arazideki hizmet süresindeki davranışlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle yanlış tasarım ve uygun malzeme kullanılmayışı kaplamanın hizmet performansını düşürmektedir.

Hizmet sırasında meydana gelen problemler genellikle yüksek sıcaklıklarda oluşan (30 °C ile 60 °C) kalıcı deformasyon ve kasma, düşük sıcaklıklarda meydana gelen sorunlar ise çatlama ve sökülmedir.

Çizelge 4.2.'de karşılaşılan üstyapı problemleri ve bu problemlerin neden kaynaklandığı görülmektedir. Çizelgede belirtilen herhangi bir problemin neden kaynaklandığı ve bunun ile ilgili ne tür bir çalışma yapılması gerektiği belirtilmiştir. Örneğin, termal çatlaklar bağlayıcının özellikleri ve iklimsel şartlardan etkilenmekte olup, bu durum dikkate alınarak iklimsel veya bölgesel duruma göre bağlayıcı tipi ve özelliklerine karar verilmesi gerekmektedir [31].

Çizelge 4.2. Üstyapı problemleri ve muhtemel nedenleri [31]

	Muhtemel Nedenler							
Problem	Bağlayıcı Tipi	Agrega Tipi	Tasarım	Karışım Kontrolü	Yapım Kontrolü	Bölgesel İklimsel	Trafik	Üstyapı Tasarımı
Soyulma	*	*	*	*	*	*		
Isı çatlakları	*					*		
Tekerlek izi	*	*	*		*	*	*	*
Bağlayıcı sertleşmesi	*		*	*	*	*		
Agrega ayrışması				*	*			
Yansıma çatlakları						*		*
Kayganlık direnci		*	*		*	*		

4.7.1. Kalıcı deformasyon

Bitümlü karışımların düşük termal iletkenliğe sahip olması nedeniyle genellikle deformasyonların büyük çoğunluğu aşınma tabakasında oluşan plastik deformasyonlardır. Plastik deformasyonu etkileyen ana faktör ise karışımın kompozisyonu olmakla birlikte belli bir karışımda deformasyonlara karşı davranışı bitümün viskozitesi belirlemektedir.

Plastik deformasyonlar, trafik yükleri altında kaplama tabakalarından birinin taşıma kapasitesinden daha fazla bir yüke uğraması nedeniyle oluşmaktadır. Plastik deformasyonlar en büyük değerlere de yüksek hizmet sıcaklıklarında ulaşır ve 60 °C pratikte maksimum hizmet sıcaklığı olarak kabul edilir. Bu şekilde yüksek sıcaklıklarda, kısa süreli tekrarlı yüklemelerin oluşturduğu kalıcı deformasyonların miktarını (tekerlek izi) bitümün viskozitesi belirler [2].

Tekerlek izi derinliği ile bitümün penetrasyon indisi arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar sonucu yüksek penetrasyon indisi bitümlerin kullanılmasının faydalı olacağı görülmüş ve bitümün penetrasyon indisinin artırılmasının deformasyon direncini de arttırdığı görülmüştür.

Tekerlek izi oluşumuna neden olan başlıca faktörler, aşırı yükler, uzun süreli veya durağan yükler, aşırı yük tekrarı, uygun olmayan malzeme kullanımı, tasarım ve yapım hataları olarak sınıflandırılabilir.

Tekerlek izi oluşumu özellikle yaz aylarında daha da artmaktadır. Çünkü, sıcaklığın artması ile asfaltın sertlik değeri düşmektedir. Viskozitesi yüksek bağlayıcı kullanarak sıcak havalarda kaplamanın deformasyona uğramaya yatkınlığının azaltılması, kalıcı tekerlek izi oluşumuna karşı kaplamanın direncinin artmasını sağlar [16].

Karışımda viskozitesi yüksek bitüm kullanımının, tekerlek izini azalttığı ama düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna neden olduğu bilinmektedir. Sıcak karışımda meydana gelen tekerlek izini düşürmek için, sıcak karışıma doğrudan ve/veya karışımdaki malzemelere karışımdan önce katkı maddeleri katılabilmektedir.

Yumuşama noktası da sıcak havalarda kalıcı deformasyona etkilidir. Yumuşama noktası yüksek bitümlerin kullanımı karışımlarda tekerlek izi oluşumunu azaltmaktadır.

Karışımındaki bağlayıcı oranı optimum bağlayıcı oranından fazla ise karışımın stabilitesi ve rijitliği düşer ve dolayısıyla trafik yükleri etkisiyle kaplamada derin tekerlek izleri oluşur.

Karışımında kullanılan agrega yapısı da, tekerlek izi oluşumunu etkilemektedir. Tekerlek izini önlemek için; üstyapı tabakalarında kübik ve pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar örneğin kırılmış taş agregalar kullanılmaktadır.

SUPERPAVE ile tasarımı yapılan sıcak karışımlarda kullanılan agrega gradasyonlarında, ince agreganın tekerlek izi oluşumdaki etkisini azaltmak amacıyla, karışımında, ince agrega kullanımına sınırlandırma getirilmiştir.

4.7.2. Bitümlü karışımlarda kuma

Kuma, karışımındaki bitümün dingil yükleri, iklim şartları ve uygulama hatalarından dolayı kaplamanın yüzeyine çıkması ve burada bitümden oluşan bir film tabakasının oluşmasıdır.

Yapım sırasında optimum bitüm miktarından fazla bitüm kullanılması, boşluk oranının çok düşük olması veya çok fazla agrega soyulması halinde kuma miktarı daha fazla olur. Kuma en çok yüksek hizmet sıcaklıklarında görülmektedir. Dolayısıyla 60 °C da bitümün yumuşama noktasının veya viskozitesinin sınırlandırılması kusmayı da azaltacaktır.

Bitüm miktarının kaplamadan taşmasıyla kaplama yüzeyinde çok hafif siyahlaşma görüldüğünde düşük önemde, kaplama yüzeyindeki siyahlaşmanın tonu arttığında orta önemde, bitüm parlak bir kaplama yüzeyi ortaya çıkardığında, agrega aşırı bitüm ile görünmediğinde yüksek önemde kuma olduğu kabul edilir.

Yapılan çalışmalarda agrega gradasyonundaki ince malzeme miktarının kuma olayında etkili olduğu, kuma miktarının sıcaklık, trafik yükü ve bitüm miktarı arttıkça arttığı tespit edilmiştir [32].

4.7.3. Bitümlü karışımlarda çatlaklar

Sıcaklık ve trafik değişimleri ile oluşan tekrarlı gerilme ve şekil değiştirmelerin karışımın kırılma ya da yorulma mukavemetini aşması durumunda bitümlü karışım çatlar. Trafik ve sıcaklık değişikliklerinden başka asfalttaki uçucu madde buharlaşması, nem miktarındaki değişiklikler, emici agregaların kullanımı, çimento veya kireç ile stabilize edilmiş tabakalarda hacim değişiklikleri gibi bazı dış etkenlerde çatlamaya yol açabilmektedir.

Birçok ülkede donma noktası altında geçen kış ayları sonrasında sıcaklığın 0 °C'nin hemen üstüne çıkması nedeniyle taban zemininin stabilitesi önemli ölçüde azalır ve dolayısıyla dingil yükleri altındaki bitümlü tabakalarda yüksek çekme gerilmeleri meydana gelerek çatlama tehlikesi ortaya çıkar.

Bitümün çatlama bakımından en önemli özelliği olan gerilme direnci, diğer direnç özellikleri gibi yükleme hızı ve sıcaklığa bağlıdır. Gerilme direnci düşük sıcaklıklarda yüksektir, fakat yavaş yükleme hızları için düşüktür. Çok düşük sıcaklıklarda karışım aşırı kırılgan olabildiği için gerilme direnci azalabilir [31].

Sıcaklığa duyarlılığı düşük olan bitümler (örneğin penetrasyon indeksi yüksek olan bitümler) çatlama sıcaklığını azaltmaktadır. Yumuşak bitümler daha uygun olmakla birlikte, bunların kullanımı yüksek hizmet sıcaklıklarında performans sorunları yaratmaktadır.

Ayrıca çatlaklar, suyun kaplamanın altına ve temele sızmasına neden olurlar. Islanan ve doymun hale gelen temel tabakasının ve yol tabanının gücü azalarak kaplamada daha önemli deformasyonları meydana getirerek kaplamayı onarılmayacak duruma getirmektedir.

Yorulma çatlakları: Yorulma çatlakları, genellikle malzemenin çekme mukavemetine bağlı olarak trafik yüklerinin aşırı tekrarı ve temel zemininin yetersiz taşıma gücüne

sahip olması nedenleriyle, tekrarlı ya da değişken gerilme altında meydana gelen kırılma olayıdır.

Bitümler viskoelastik ve termoplastik bir malzeme olduklarından dolayı, çekme mukavemetleri ısıya ve çekme hızına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Yük altında bitümlü üstyapı sürekli esnemektedir. Esnemenin meydana gelen şekil değiştirmeler malzemenin rijitliği ve üstyapı tabakasının kalınlığına bağlıdır.

Yorulma çatlaklarına timsah sırtı çatlakları da denilmekte olup, oluşan aralıklı boyuna çatlaklar zamanla birleşerek, enine çatlakların oluşmasına neden olmakta ve bunlar da timsah sırtı çatlakları meydana getirmektedirler. Oluşan çatlaklı yapı, trafik tarafından sökülme ve parçalanmalar sonucu kaplama yüzeyinde çukurlar oluşmaktadır.

Yorulma çatlaklarına üstyapının maruz kaldığı yüklerin büyüklüğü ve süreleri, üstyapının yapısal dizaynı, üstyapıya yeterli desteği sağlayamayan tabii zemin tabakasının varlığı, karışımda kullanılan bitümün kıvamı ve miktarı, agregaların karakteristik özellikleri ve bölgenin iklimi etkili olmaktadır.

Karışımın yorulma özelliklerini iyileştirmek için iyi sıkıştırılması yani düşük boşluk yüzdesine sahip karışım hazırlanması, viskozitesi yüksek bağlayıcı kullanılması ve bağlayıcı içeriğinin optimumdan biraz daha yüksek (%1 civarında) tutulması gereklidir. Yoğun granülometreli karışımlar yorulma bakımından daha iyi sonuçlar vermektedir [31].

Blok çatlak (büzülme çatlakları): Taban zemininde, temelde veya asfalt karışımda oluşan hacim değişiklikleri sonucunda meydana gelen ince çatlaklar şeklinde başlayıp daha sonra zamanla gelişerek ağ şekline dönüşen çatlaklardır. Genellikle keskin köşeli, geniş veya dik açılıdır.

Bu tür çatlakların oluşumuna en büyük etken fazla miktarda düşük penetrasyonlu bitüm içeren ve ince daneli agrega ile yapılmış karışımlardaki hacim değişiklikleridir. Trafik miktarının çok az oluşu bu tip kaplamalarda çatlakların oluşumunu hızlandırmaktadır [33].

Kenar çatlağı: Kaplama kenarından yaklaşık 30 cm içerde meydana gelen ve genellikle banketlerin sağladığı yanal destek yetersizliğinden oluşan boyuna çatlaklardır. Bazen bu çatlaklar ile banket arasında enine çatlaklar da meydana gelir.

Çatlayan kısmın altında bulunan malzemede meydana gelen oturma ve çökelmeler de kenar çatlağı oluşumunun diğer bir nedenidir. Malzemede oturma ve çökelmeler ise yetersiz drenaj, kabarmalar ve zemin büzülmesi gibi nedenlerle oluşmaktadır.

Yansıma çatlakları: Asfalt takviye tabakası üzerinde meydana gelen, altta kalmış olan esas kaplamada daha önce mevcut olan çatlakların veya yanal ve düşey hareketin takviye tabakasına yansımasıyla oluşur. Bu çatlaklar boyuna, enine, diyagonal veya bloklar şeklinde oluşabilirler.

Takviye tabakası altında yer alan üstyapıdaki yatay ve düşey hareketler, trafik, sıcaklık değişimleri nedeniyle genleşme ve büzülme, yüksek kil içerikli alt yapılarıdaki nem kaybı veya sıralanan bu etkenlerin birleşimi yansıma çatlaklarına yol açmaktadır [31].

Kayma çatlakları: Yanal hareket veya bir üst yapı tabakasının diğerine göre göreceli yer değiştirmesi kayma olarak adlandırılır. Genelde asfalt yüzey tabakası asfalt binder tabakası üzerinde veya asfalt üst yapı agrega temel tabakası üzerinde kayar.

Kayma çatlakları genelde tekerleklerin yüzey üzerindeki etkisi yönündeki noktada parabolik şekildedirler. Bu çatlaklara yüzey tabakası ve alttaki tabaka arasındaki bağlantı eksikliği neden olmaktadır. Düşük gerilme direncine sahip karışımlarda kayma çatlakları daha kolay oluşmaktadır [31].

4.7.4. Cilalanma

Cilalanma, mastik asfalt ile agreganın zamanla aşınması sonucu yuvarlanma yüzeyinin cilalanması ve yüzeyde cilalanmış agregaların görülmesidir. Bu tür bozunma kaplama tabakasında düzgün pürüzsüz yüzeyli agreganın kullanılması ve kullanılan kırmataşın trafik etkisiyle belli bir süre sonra aşınması ile meydana gelmektedir.

4.7.5. Bitümlü karışımlarda soyulma

Bitümün ana işlevlerinden birisi yapışma özelliği göstermesidir. Soyulma, bitümlü sıcak karışımlarda, su etkisi ile bitümün agreganın yüzeyinden sıyrılması yani agreganın yüzeyi ile bitüm arasındaki adezyon kuvvetinin kaybı olarak tanımlanmaktadır.

Su olmayan koşullarda agregaların kuru olmaları ve çok fazla toz bulundurmamaları halinde bitüm agreganın ile iyi bir yapışma sağlarlar. Yapışkan bir bağ için bitümün agregayı ıslatması gerekir ve bu işlem bitümün viskozitesine bağlıdır.

Viskozite değerinin yüksek oluşu bitümün agregayı ıslatmasını güçleştirecektir. Diğer taraftan bitümün viskozitesini düşürmek için yüksek sıcaklıklara ısıtılması oksidasyonu artıracaktır.

Bitümlü sıcak karışımlarda, sudan kaynaklanan bozulmalar önemli bir sorun olarak kabul edilmektedir. Bu sorunu gidermeye yönelik yapılan çalışmaların önemli bir kısmını ise karışımın yola serilmeden önce laboratuvar ortamında suya hassasiyetinin belirlenmesi ve bu sayede gerekli önlemlerin öngörülmesi amacıyla yapılan deneyler oluşturmaktadır.

Yoğun yani boşluk oranı az olan karışımlarda soyulma ihtimali daha düşük olup, geçirgenliği yüksek kaplamalarda soyulma riski daha fazladır.

Sıcak karışımda yüzeyde herhangi bir soyulma meydana gelmemesine rağmen, karışıma giren suyun bağlayıcının içsel kohezyon kaybına neden olduğu ve karışımın dayanımını düşürebildiği de görülmüştür [34].

Karışımdaki malzemeler arasındaki adezyon kuvveti, malzemelerin ilk temasları esnasında sağlanmaktadır ve bunun kaplamanın servis sürecinde sürekliliği devam etmelidir.

Agrega ile bitüm arasında gözlenen soyulma çeşitleri

Bitümlü karışımlarda adezif ve kohezif olmak üzere iki tür kuvvet söz konusudur. Agregası temiz, kuru ve karışım sızdırmaz özellikte ise çözülme koheziftir. Su varlığında ise bozulma türü bitümün agrega yüzeyinden soyulması sonucu adezyon kaybı şeklindedir [2]. Aşağıda bitüm-agrega arasında en çok gözlenen soyulma çeşitleri başlıklar halinde kısaca verilmiştir.

Ayrılma: Bitüm tabakasında, herhangi bir görsel kırılma ya da süreksizlik olmadan, bitüm filminin suyun varlığında veya tozdan dolayı agregadan ayrılmasıdır ve bu sırada karışımda adezyon kaybı oluşmaktadır. Bu durum suyun ortamdan uzaklaştırılmasıyla tersine olabilir.

Yer değiştirme: Yer değiştirme teorisi, üç fazlı bitüm/agrega/su sisteminin termodinamik dengesi göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Bitüm/agrega ara yüzeyine su girmesi durumunda ortaya çıkan yüzey enerjilerine göre bitüm agrega yüzeyinden geri çekilmektedir [2].

Emülsiyonlaşma: Bilindiği gibi emülsiyon bitümlerinde, su sürekli faz, bitüm zerrecikleri süreksiz fazdır. Emülsiyonlaşma mekanizmasında ise bunun tam tersi durum söz konusudur. Su içinde bitüm damlacıklarından ziyade bitüm içerisinde su damlacıkları meydana gelebilmekte olup, bitüm sürekli faz, su süreksiz fazı oluşturmaktadır.

Boşluk basıncı: Yüksek boşluklu karışımlarda su, bağlantısız boşluklar arasında serbestçe dolaşabilir. Malzeme dingil yükleri altında sıkıştıkça su bu boşluklarda hapsolabilmektedir. Yük etkisiyle de bu boşluklarda basınçlar oluşarak bitüm/agrega ara yüzeyi çevresinde çözülmelere neden olur.

Özellikle, suyun içine girişine izin veren ama serbestçe dolaşmasına izin vermeyecek oranda hava boşluğuna sahip olmayan karışımlarda bu durum meydana gelmektedir.

Hidrolik sökölme: Suyun dolaşması, kaplamanın alt tabakalarından daha ziyade yüzey tabakalarında görülmektedir. Doygun bir kaplama yüzeyinde araç lastikleri suyu kaplamanın içine girmeye zorlar ve geçiş sırasında lastikler bu suyu dışarı emer. Bu sırada yüzeydeki boşluklar basınç ve çekme gerilmelerine sürekli maruz kalır. Bu hareket bitümü agregadan ayırmaya yöneltir.

Bitüm filminin yırtılması: Bitüm filminin en ince olduğu keskin kenar ve köşelerde meydana gelmektedir. Bitüm filminin yırtılması sonucu su agregaya yüzeyine ulaşabilmek için bitüm filminden sızmaktadır. Suyun bitüm filmine sızma ve ayırma hızı bitümün viskozitesine, agregaya yüzeyine, bitüm film kalınlığına ve filler malzemesi gibi bileşenlere bağlıdır.

Çukurlaşma: Sıcaklık arttığında kaplamadaki bitümün viskozitesi azalacaktır. Bu arada yağmur yağdığında bitüm su damlacıkları etrafında süzülerek kabarcaklar, sıcaklık artışıyla bu kabarcıklar genişleyecek ve agregaya yüzeyine suyun ulaşmasına imkan verecek çukurlar oluşacaktır.

Bitüm-agrega adezyonunu etkileyen faktörler

Bitüm-agrega adezyonunu etkileyen çok sayıda faktör bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları agregaya ve bitüm özellikleri olmakla birlikte karışımın hazırlanma ve sıkıştırma süreçleri, trafik, sıcaklık, su, drenaj ve çevre koşulları gibi dış etkenler sayılabilir.

Karışımındaki agrega özelliklerinin etkisi: Bitümlü kaplamaların soyulma mukavemetini etkileyen en önemli faktörlerden birinin, karışımda kullanılan agregaların kimyasal ve mineralojik özellikleri olduğu, diğerinin ise kullanılan bağlayıcı türü olduğu düşünülmektedir.

Agregaların mineralojik ve kimyasal özellikleri, yüzey enerjilerini ve kimyasal reaksiyona girme kapasitelerini etkilemektedir.

Agregalar, hidrofilik (su sever) ve hidrofobik (su sevmez) olarak iki gruba ayrılabilirler. Hidrofilik olarak adlandırılan yüksek silis ihtiva eden agregalar, kimyasal kökenleri göz önüne alındığında çoğu zaman asidik karakter taşımaktadırlar. Hidrofobik agregalar ise az veya hiç silis içermemekte ve kimyasal olarak genellikle bazik karakter taşımaktadırlar. Karbonatlı taşlar, örneğin kireçtaşı (kalker) hidrofobik agregalardandır ve hidrofobik agregaların soyulma eğiliminde olmadıkları düşünülmektedir.

Genellikle asidik karakterdeki agregalar yüzeylerinde negatif yükler, bazik karakterdeki agregalar ise pozitif yükler taşımaktadırlar. Asidik karakterdeki agregaların yapılarında yüksek oranda silis, bazik karakterdeki agregaların yapılarında ise yüksek oranda karbonat bulunmaktadır.

Bitümler ise genel olarak asidik karaktere sahip olduklarından ve kolay temin edilebilen agregalar çoğu zaman asidik karakterde olduklarından bitümle aralarında adhezyon kuvvetinin oluşmasında sorun yaşanmaktadır [35].

Agregaların bitümü emme kapasiteleri, karışımın suya karşı hassasiyetini etkilemekte olup, agregaların bitüm emme kapasitelerini etkileyen faktörler ise agregaların porozitesi, agregadaki boşlukların boyutu (0,5 mikron ve daha büyük olanlar), dağılımı ve sürekliliği olduğu düşünülmektedir.

Genellikle agregalar polar, bitüm ise apolar aktivitededir. Bu nedenle bitüm ile agregalar arasındaki bağ zayıf dispersiyon kuvvetleri ile sağlanır. Diğer taraftan su

molekülleri yüksek oranda polardır ve agrega yüzeyi ile daha kuvvetli bağlar oluşturur.

Bitüm ile agrega arasındaki bağ kuvvetinin derecesi aralarındaki serbest yüzey enerjisi tespit edilerek belirlenebilmektedir.

Agregaların kenetlenme özelliklerini ise poroziteleri, emme kapasiteleri, yüzeylerinin temizliği, köşelilikleri vb. nedenler etkilemektedir. Porozitenin artması agreganın bitüm emme kapasitesini arttıracak ve bitüm/agrega adezyonu artacaktır. Ancak, porozitenin %2-2,5'den fazla olması adezyonu artırmamakla birlikte bağlayıcı ihtiyacını artırmakta ve kuma riskinin artmasına neden olmaktadır [7].

Karışımında kullanılan agregaların şekil özellikleri, kaplamanın soyulma mekanizmasına büyük etki etmektedir. Pürüzlü yüzeyli agregalar ile hem yüksek stabilite hem de yüksek soyulma direnci elde edilebilmektedir. Yuvarlak yüzeye sahip agregalar, köşeli agregalar kadar, bitümü iyi sarmaz ve daha çabuk soyulurlar [36].

Agrega olarak bazalt malzemelerin kalker malzemesine göre daha dayanıklı olduğu bilinmektedir. Ancak, kalker malzemesinin yüzeyide bazalta göre daha gözenekli ve pürüzlü olduğundan karışım içerisindeki agregalar ile bitüm arasındaki adezyon kalkerde daha yüksek olmaktadır [37].

Karışımında kullanılan agrega eğer iyice kurumamış ise soyulacaktır. Bu yüzden karışımdan önce agregaları ısıtarak, içlerinde ve yüzeylerinde olması muhtemel suyun atılması sağlanır. Ancak, agregalar kurutulduktan sonra bile içlerine sızmış olan su buharının çıkması mümkün olamayabilmektedir.

Bitüm özelliklerinin etkisi: Karışımında kullanılacak bitümün agregaları iyi bir şekilde kaplayabilmesi için viskozitesinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu da bitümün ısıtılması, emülsiyon halinde kullanılması veya petrol kökenli çözücülerle inceltilmesi şeklinde yapılabilmektedir.

Bitümlü sıcak karışımlarda bu işlem, bitümün karışıma katılmadan önce ısıtılması ile yapılmaktadır.

Karışım hazırlanırken, agregası ve bitümü aşırı ısıtmak veya karışım süresini uzatmak ise çok büyük sorunlara neden olmaktadır. Agregalar parçalanabilmekte ve bitüm ise aşırı yaşlanabilmektedir. Yaşlanmış bitümün kullanıldığı sıcak karışımlar ise yük ve çevre etkilerinden doğan kuvvetlere esneklik gösterememekte ve kırılma hale gelerek çatlayabilmektedir. Bu çatlayan noktalardan su girişi ise soyulmayı hızlandırmaktadır.

Bitümün agregası ile temas eden ve bağ yapan bileşenleri polar bileşenleridir. Diğer yandan su, bitüme göre daha polar durumdur ve bu yüzden de agregası yüzeyine daha fazla yerleşebilmektedir.

Karışım özellikleri etkisi: Sıcak karışımın hazırlanması ve serim sürecinde bazı sorunlar ile karşılaşmaktadır. Laboratuvar çalışmalarının çoğu zaman arazide bire bir uygulamalar ile örtüşmediği ve plentte karışımın hazırlanması ve arazide yerine serilmesi sırasındaki süreçleri aynen yansıtılmadığı düşünülmektedir.

Karışımında kullanılan bitüm miktarı, mineral agregalar arasındaki boşluk oranı (VMA) ve karışımın hava boşluğu seviyesi karışımın suya hassasiyetini önemli derecede etkilemektedir.

Karışımında kullanılan bitüm miktarı arttıkça bitüm film kalınlığı artmakta bu da kaplamaya suyun girişini zorlaştırmaktadır.

Sıcak karışımın hava boşluğu, karışımın yetersiz şekilde sıkıştırılması durumunda artmakta bu da sıcak karışıma suyun girişini artırmaktadır. Kaplamanın hava boşluğu seviyesi, suyun yaratacağı etkinin derecesini belirlemektedir. Karışımın yeteri kadar sıkıştırılmaması, karışımın neme olan hassasiyetini artırmaktadır.

Genellikle yola serilip sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların, hava boşluğu oranları % 3-5 aralığında değişmektedir. Bu değerlerin altındaki oranlarda karışımın tekerlek izi oluşumuna direnci azalmakta, aşırı sıkıştırılmış ve düşük hava boşluklu karışımda tekerlek izi oluşumu artmaktadır.

Cevre koşullarının etkisi: Malzemenin kullanıldığı bölgenin iklim özellikleri karışımın çeşitli etkilere maruz kalmasına neden olmaktadır.

Yağışlı ve soğuk bölgelerde, kaplama sürekli donma çözülme döngülerine maruz kalarak, kaplamanın içine sızan suyun soğukta donmasına ve sıcak havada buhar halinde yukarı doğru hareket etmesine neden olmaktadır.

Sürekli tekrarlanan donma çözülme döngüleri ve boşluklara dolan suların termal genleşmesi sonucu kabarmalar ve çökmeler oluşmaktadır. Soğuk havalarda kaplamada düşük sıcaklık çatlakları meydana gelebilmekte ve oluşan çatlaklardan su girmektedir.

Sıcak havalarda ise karışımdaki bitümün yapısındaki uçucu bileşenlerin kaybı artmakta, viskozitesi düşmekte ve kaplamada kuma, tekerlek izi oluşması riski yükselmektedir.

Trafiğin etkisi: Kaplamadan servis sürecinde geçmesi beklenen trafik ve kompozisyonu mümkün olduğunca doğru belirlenmeye çalışılmalıdır. Aksi takdirde kaplamadaki deformasyonlar hızlanmaktadır.

Oluşan çatlaklardan giren sular veya tekerlek izinin olduğu noktalarda biriken sular, kaplamaya girerek kaplamanın dayanımını düşürmektedir.

Bitüm-agrega adezyonunun güçlendirilmesi

Bitümlü karışımlarda soyulmayı önleyici katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları yüzey aktif maddelerdir ve genellikle bitüme

kariştırılır. Bitüm ile kariştırıldıklarında karişımın yüzey gerlimini düşürerek adezyonun artmasını sağlarlar.

Yüzey aktif maddelerin genel olarak ana bileşenleri aminler olup, katyonik yapıdadırlar. Mineral agregaların yüzeyine doğru çekilirler ve diğeri ucu ise bitüm ile uyumludur. Bitüm ile agrega arasında iyonik bağı bir köprü oluştururlar.

Bitüm ile agrega arasındaki adezyonu güçlendirmek için katkı maddelerinin yanı sıra iyi sıkıştırma, iyi bir drenaj, iyi gradasyonlu malzeme, sıcak, kuru ve temiz agrega, yeterli mukavemeti sağlayacak bitüm filmi ve mümkün olduğunca yüksek viskoziteli bitüm kullanılmalıdır.

Sönmüş kireç gibi agregalarla kariştırılarak kullanılan soyulma önleyici katkılarda vardır. Kalsiyum iyonları agrega yüzeyinin bazik olmasına sebep olarak ve elektro-kimyasal denge kuvvetleri yardımı ile suyu bitüm/agrega temas yüzeyinden uzaklaştırarak bitüm içerisine yönlendirir [2].

Bitüm-agrega adezyonun Nicholson soyulma deneyi ile belirlenmesi

Nicholson Soyulma Deneyi, yaygın olarak kullanılan bir deneydir. Bu metod, yol üzerine serilmiş bitümlü sıcak karişım tabaka veya tabakalarında su etkisinde meydana gelen ve sıcak karişımın suya karşı hassasiyetinin iyi bir göstergesi olan soyulma mekanizmasını laboratuvar ortamında öngörmek amacıyla kullanılır.

Deneyde sıkıştırılmamış sıcak karişım statik olarak su etkisine maruz bırakılmakta ve meydana gelen soyulmanın derecesi gözlemlenmektedir.

Soyulmanın derecesi, su etkisine maruz bırakılmış sıkıştırılmamış karişımındaki agregaların yüzeylerindeki bitümün soyulmasının görsel olarak değerlendirilmesi ile belirlenmektedir [29].

Nicholson Soyulma deneyi sonucu % 80 olarak ifade ediliyorsa, bu su etkisinden dolayı karışımda % 20 soyulma olduğunu ifade etmektedir.

5. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR

5.1. Bitümlü Bağlayıcılar

Bitümlü bağlayıcılar esas olarak katran ve asfalt olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadırlar. Asfaltlarda doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar (rafineri asfaltları) olarak iki gruba ayrılabilir [9].

5.1.1. Katran

Katran, başlıca odunun veya kömürün kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılması sonucu elde edilir. Bu halde katrana ham katran denir. Katran, yapısındaki bitüm oranının düşük olması, sıcaklığa karşı duyarlılığının yüksek olması ve sağlık açısından tehlike yaratması nedenlerinden dolayı esnek kaplama yolların inşaatında doğrudan kullanılmaz. Katran-bitüm karışımları olarak genelde yüzeysel kaplamalarda kullanılır. Taşıtlardan sızan yağ ve mazot dökülmelerinden oluşan olumsuz etkilere karşı bitümden daha dirençli olduğundan taşıtların park vb. yerlerde kullanılır.

5.1.2. Asfalt

Asfalt, doğal kökenli veya petrolün işlenmesinden elde edilen bitümlerdir. Rengi, koyu kahverengi ile siyah arasında değişen bağlayıcı bir malzemedir. Genellikle, petrolün damıtılmasından elde edilen rafineri asfaltı yol yapımında en yaygın kullanılanıdır. Ayrıca, doğada mineral maddeler ile karışmış durumda doğal olarak da bulunabilmektedir [38].

Doğal asfaltlar

Doğal asfaltlar, genellikle tabiatta mineral maddelerle karışmış halde bulunurlar ve en önemlisi Trinidad göl asfaltıdır. Gölden kazılan malzeme üzerlerinde bir takım

işlemler yapıldıktan sonra yol inşaatında kullanılabilir [38]. Ancak, yol kaplamasında ve endüstride bu tür asfaltlar çok az kullanılmaktadır.

Bu asfaltlar çeşitli şekillerde yol kaplamasında ve endüstride çok az kullanılmaktadır. Bu kullanım genelde, bitümlü sıcak karışımı modifiye etmek için karışıma katkı maddesi olarak katılmaları şeklindedir. Karışımlarda plastik deformasyonlara karşı dayanımı ve bitüm agrega adezyonunu artırmaktadır [9]. Doğal asfaltlar, mastik asfalt, poröz asfalt ve asfalt betonu yapımında kullanılabilmektedir.

Yapay asfaltlar (rafineri asfaltları)

Yapay asfaltlar rafineride petrolün distilasyonu ile elde edilmekte olup, genel olarak üç gruba ayırmak mümkündür. Bunlar:

Asfalt çimentosu, (AC)

Sıvı petrol asfaltları,(SPA)

Asfalt emülsiyonları

Asfalt çimentoları doğal asfaltın işlenmesi veya petrolün rafine edilmesi ile elde edilirler. Katı asfalt veya penetrasyon asfaltları olarak da nitelendirilirler ve penetrasyon veya viskozite değerlerine göre sınıflandırılırlar.

Sıvı petrol asfaltları, ısıtılmış bitümlere benzin, gazyağı veya bakiye yağ karıştırılması ile üretilir. Benzin ilavesi ile çabuk kür olan (RC), gazyağı ilavesi ile orta hızda kür olan (MC), bakiye yağ ilavesi ile yavaş kür olan (SC) sıvı petrol asfaltları elde edilir.

Asfalt emülsiyonları ise bitüm küreciklerinin su içinde dağıtılmasından oluşur. Bitümün su içerisinde dağıtılması ile üretilen emülsiyon uzun ömürlü olmaz, kısa bir süre sonra bitüm kürecikleri birbirine yapışarak sudan ayrılır. Emülgatörler kullanılarak bitüm küreciklerinin birbiri ile birleşmeleri önlenir ve emülgatör cinsine bağlı olarak anyonik ve katyonik asfalt emülsiyonları üretilir.

5.2. Bitümlü Karışımlar

5.2.1. Bitümlü karışım türleri

Agregalar ile bitüm, istenilen düzeyde bir kaplama karışımı elde etmek amacıyla bünyesinde ilgili tüm bileşen malzemelerin oranlandığı, karıştırıldığı ve gerektiğinde ısıtıldığı bir karışım tesisinde (plant) bir araya getirilmektedirler. Bitümlü karışımlar geniş bir yelpazeyi kapsamakta olup, genel anlamda asfaltlar ve makadamlar olarak ikiye ayırmak mümkündür.

Asfaltlar

Asfaltlar, 230°C'ye ulaşan sıcaklıklarda asfalt plantlerinde hazırlanan, mineral agregası, filler ve bitümden oluşan karışımlardır. Sıcak silindirenmiş asfalt (HRA) ve mastik asfalt en çok kullanılan asfalt tiplerine örnek olarak verilebilir.

Mastik asfalt, bitüm ve ince agregası ile belli bir oranda iri agregası harcından oluşmaktadır. Mastik asfalt içerisindeki yüksek ince agregası yüzdesi, düşük sürtünme katsayısı ile birlikte pürüzsüz bir yüzey özelliği sağlar.

Sıcak silindirenmiş asfalt esas olarak, otoyollar, ana alterler ve kent içi caddeleri gibi yoğun trafiğin olduğu yerlerde kullanılan yüksek kaliteli bir malzemedir. Sıcak silindirenmiş asfaltın en önemli özelliği kesintili gradasyona sahip olması, yani çok az miktarda orta boyutlu (2,36 mm ila 10 mm arası) agregası içermesi, bunun yanında da ince agregası, dolgu maddesi (filler) ve iri agregadan oluşmasıdır.

Asfalt betonu

Asfalt betonu karışımları, sürekli gradasyona sahip, daha yüksek oranda ve daha sert bir bitüm ile daha az iri agregası ve daha fazla ince agregası ile filler içermektedir. Asfalt betonu, mukavemet ve stabilitesini öncelikle agregaların kenetlenmesinden, bir miktarını da ince agregası-filler-bitüm harcından sağlamaktadır.

Poröz asfalt

Yüksek boşluk oranı içeren karışımlardır. Özellikle hızların yüksek olduğu ıslak yollarda taşıtlar tarafından su sıçraması poröz asfalt ile azaltılabilmektedir. Ayrıca yağmur suyunu yüzeyde biriktirmek yerine malzeme boyunca süzülmesini mümkün kılarak bir drenaj sistemi gibi davranmaktadır. Ancak, kullanılan bitüm oranının düşük olması durumunda agreganın iyi kaplanması mümkün olmayacak ve ince bitüm tabakası olması oksitlenmeyi artıracaktır.

Makadamlar

Bitümlü makadamların bu yüzyılda kullanımı yaygınlaşmaya başlanmış olup, hem iri agrega hem de daha küçük boyutlu agregalar ve bitüm kullanılarak hazırlanan bir malzemedir. Filler ise bağlayıcı maddenin viskozitesini artırmak suretiyle bitümün akmasını engellemek ve bitüm ile birlikte küçük boşlukların doldurulmasına yardımcı olmak amacıyla kullanılmaktadır.

Kaplanmış makadam türleri karışımda kullanılan bitüm miktarı ve karışımın gradasyonuna göre çeşitlilik arz etmektedir. Bunlardan bazıları açık ve orta gradasyonlu makadamlar, yoğun ve üniform gradasyonlu makadamlar, ince gradasyonlu makadamlardır.

5.2.2. Bitümlü karışımlardan beklenen özellikler

Hazırlanan ve yol üzerine serilen bitümlü karışımın bazı özellikleri sağlaması istenmektedir. Bunlar,

Stabilite

Durabilite (dayanıklılık)

Geçirimsizlik

İşlenebilirlik

Esneklik

Yorulma mukavemeti

Kayma direnci

olarak belirtilebilir [39].

Stabilite

Bitümlü sıcak karışımın stabilitesi, kaplamanın trafik yükleri altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direç olarak adlandırılır. Yani karışımın stabilitesi trafik yüklerini karşılayabilecek kadar yüksek olmalıdır.

Stabilite ne kadar düşük olur ise trafik altında oluşabilecek deformasyonlar da o kadar fazla olacaktır. Stabil bir kaplama, tekrarlı trafik yükleri altında orjinal şeklini ve düzgünlüğünü sürdürebilmektedir. Stabil olmayan bir kaplamada ise tekerlek izleri, ve sökûlmeler oluşmaktadır [38]. Ancak, çok düşük stabilite ne kadar istenmez ise çok yüksek stabilite de istenilmemektedir. Çünkü, çok yüksek stabilitede esneklik kaybolacağından gerilmeler sonucu çatlaklar oluşmaktadır.

Karışımın stabilitesi, agregalar arasındaki içsel sürtünmeye ve bağlayıcının kohezyonuna bağlıdır. Agregalar arasındaki içsel sürtünme agregaların şekilleri ve yüzey yapısı ile ilgili olup, bağlayıcının kohezyonu ise, yükleme hızı arttıkça, bitümlü bağlayıcının viskozitesi arttıkça ya da kaplamanın sıcaklığı düştükçe artar.

Stabilite, karışımındaki bitüm miktarı belli bir seviyeye kadar arttırıldıkça artar ve bu seviyenin üstüne çıkıldığında bitüm agregalar üzerinde çok kalın bir film oluşturur ve malzemeler arasındaki içsel etkileşimin düşmesine neden olur [25].

Durabilite (dayanıklılık)

Bir karışımın durabilitesi, karışımın orjinal özelliklerini koruyabilme özelliğidir. Yani, yük ve çevre şartlarına karşı direnç gösterme kabiliyetidir. Asfalt, sert ve kırılgan hale geldiği zaman üzerine gelen gerilmelere çatlamadan karşı

koyamadığında ve agrega yüzeyinden bitümün ayrılması sonucunda karışımın dayanımının düşmesiyle yük taşıma özellikleri azalır [40].

Durabilite genel olarak 3 yöntemle sağlanabilir. Bunlar; karışımda sağlam agrega kullanmak, maksimum bağlayıcı miktarı ve karışımı maksimum geçirimsizlik sağlayacak ekilde sıkıştırılmasıdır [39].

Karışımındaki bağlayıcı miktarı arttıkça durabilite artmaktadır çünkü agregaları saran bitüm film kalınlığı ne kadar yüksek olursa, geçirimsizlik o kadar artacaktır ve dolayısıyla yaşlanma direnci artacaktır. Ancak, yapılan bir çalışmada, bitüm film kalınlığının belli bir değerin altında yaşlanmanın etkisinin arttığı, bu değerin üzerindeki değerlerde ise yaşlanmanın etkisinin değişmediği belirtilmiştir [30].

Karışımın yüzeyde tekerlerin sıkıştırdığı suyun etkisinde oluşan aşınma ise, karışımındaki boşluklar su ve hava girişine izin verecek kadar büyükse ve giren havadan dolayı karışım sertleşiyorsa, karışımda kullanılan bitüm ve agrega kimyasal olarak uyumlu değil ise ve bitüm film kalınlığı, karışımı tekerleklerin ve suyun aşındırıcı etkisinden koruyacak miktarda değil ise yüzeydeki aşınma olayı artmaktadır [40].

Karışımda ince agrega miktarı fazla olduğunda bitüm, bu ince agregaları emmektedir. Kaba agregalar ise yeterince bitüm ile sarılamamaktadır ve bu da durabilite sorununu yaratmaktadır. Bitüm film kalınlığı arttıkça durabilite artmaktadır. Ancak, bitümlü karışımın kusmasına neden olmadan, yeterli bir bitüm film kalınlığına ulaşmak için uygun seviyede mineral agregalar arasında boşluk değeri (VMA) temin edilmesi gerekmektedir.

Geçirimsizlik

Geçirimsizlik, karışımın içine hava ve su girişine karşı koyma direncidir ve karışımın içindeki hava boşluklarının oranı ile ilişkili olup, boşluk oranı ve bu boşlukların birbiri ile irtibatı geçirimsizlik için önemlidir. Burada boşlukların boyutu, boşlukların

birbiri ile bağlantı seviyeleri ve bunların kaplama yüzeyine ulaşip ulaşmadıkları su ve hava girişini etkiler. Geçirimsizlik arttıkça hava ve suyun etkisi ile bitümün yaşlanması hızlanır ve soyulma mukavemeti azalır [7].

İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın karıştırılması ve sıkıştırılması sırasında karşılaşılan kolaylığın ölçüsü olarak ifade edilebilir ve karışımında kullanılan agrega granülometresi, agrega cinsi, bağlayıcı oranı, bağlayıcı sertliği, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı, karıştırma ve sıkıştırma sırasındaki bağlayıcı viskozitesi gibi birçok etkene bağlıdır [41].

İşlenebilirlik, karışım dizayn parametrelerinde, agregaların özellikleri ve bitümün viskozitesinde yapılacak değişikliklerle yükseltilebilir. Genelde her bitümlü sıcak karışımında, bitüm oranı arttıkça karışımın işlenebilirlik özelliğinin de arttığı ve bitüm viskozitesinin karışımın işlenebilirliğine oldukça etkisi olduğu bilinmektedir [41].

Yapılan bazı araştırmalarda, bitümlü karışımlar ne kadar çok işlenebilir ise o kadar kolay sıkıştırılabilmekte, kolay sıkışan karışımların da trafik altında o kadar çabuk oluklanmakta olduğu tespit edilmiştir [42].

Esneklik

Esneklik, karışımının çatlamadan, eğilebilme ve temel ile alt temel tabakalarının uzun dönemli oturmalarına uyum sağlayabilme yeteneğini ifade etmektedir. Farklı oturmalar veya aşırı oturmalar kaplamaya yansyacağından çatlamalar meydana gelecektir.

Genel olarak, bir kaplama karışımının esnekliği, yüksek bitüm içeriği ve nispeten açık boşluklu (gradasyonlu) agregalar ile geliştirilebilmektedir. Ancak, kaplamanın esnekliği artarsa stabilitesinin azalacağı, düşük esnekliğinde aşırı çatlamalar ile parçalanmalara neden olacağı göz önünde bulundurulmalıdır [7].

Yorulma mukavemeti

Bir karışımın yorulma mukavemeti, trafik yüklerinden kaynaklanan tekrarlı eğilmelere çatlama dan karşı koyabilme direnci olarak ifade edilebilir.

Farklı yüklerden dolayı oluşacak farklı gerilmelerin yaratacağı farklı deformasyonlar karşısındaki yorulmanın tespiti stabil gerilme veya sabit deformasyon altında yapılmalıdır.

Kaplamanın yeterli sıkışması yorulma mukavemetini artıran önemli bir unsurdur. Çünkü bitümlü kaplamanın rijitliği arttıkça yorulma mukavemetide artmaktadır. Yetersiz sıkıştırma veya dizayn hatalarından dolayı yüksek hava boşluğuna sahip kaplamaların yorulma ömürleri düşüktür. Kaplamanın, yaşlanması sonucu sertleşmesi de, yorulmaya mukavemetini azaltmaktadır [43].

Kaplamada meydana gelen yorulma çatlağı yavaş yavaş ve çok sayıda tekrür eden trafik yükleri altında oluşmaktadır. Kaplama kalınlığının yetersiz olması ve zayıf alt tabakalar olması halinde ağır yük altında aşırı deformasyon kaplama altındaki yanal çekme gerilmelerine neden olacağından yorulma çatlakları oluşacaktır.

Bu nedenle, kalın ve iyi destek alan kaplamalar ve çekme mukavemeti yüksek malzeme kullanmak yorulma çatlaklarını önleyecektir. Dolayısıyla yumuşak bitüm sert bitüme nazaran daha iyi yorulma özelliğine sahiptir.

Karışımın rijitliği, yoğunluğu, kohezyonu, filler ve bitüm miktarı arttıkça yorulma mukavemeti önemli ölçüde artmakta ve yorulma çatlakları azalabilmektedir [7].

Kayma direnci

Kayma direnci, kaplama ile teker arasında gerekli sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. Agregalar arası içsel sürtünme ve bitümün kohezyonu ve viskozluğu

kayma mukavemetini belirler. Uygun bitüm içerikleri ve pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar, yüksek kayma direncine katkıda bulunan faktörlerdir.

Sıkıştırılmış kaplama içindeki boşlukları dolduracak derecede bitümce zengin olan karışımlar, kismaya yatkındırlar. Kusma olayı ise bitümlü malzemenin trafik etkisi, iklim şartları ve uygulama hatalarından dolayı kaplamanın yüzeyine çıkması ve burada tamamen bitümden oluşan bir film tabakasının oluşmasıdır [32]. Kusma olayı kaplama yüzeyini ıslatmasından dolayı kayma direncinin aşırı düşmesine neden olurlar.

6. TERMAL YÖNTEMLER İLE MADDELERİN KARAKTERİZASYONU

Bir maddenin veya bu maddenin türevlerinin belli bir sıcaklık programı altında herhangi bir fiziksel özelliğinin (ağırlık, enerji, boyut, iletkenlik, manyetik özellik vs.) meydana gelen değişikliklerin adsoplanan veya açığa çıkan ısıнын ölçülmesi ile belirlenen yöntemler topluluğuna termal analiz yöntemleri denilmektedir.

Termal analiz metotlarından en çok kullanılanlar,

Termogravimetri (TG) (ağırlık değişimi)

Diferansiyel termal analiz (DTA) (enerji değişimi)

Diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) (enerji değişimi)

Termomekanik analiz (TMA) (sıcaklık değişimi)

Enerji değişimi Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ve Diferansiyel Tarama (Scanning) Kalorimetresi (DSC)'nin temelini oluşturmaktadır. DSC'de örnek ve referans sıcaklıkları devamlı sabit tutulur. Sıcaklığı sabit tutmak içinde enerji alış veriş sistemi tarafından sağlanır. Enerji alış verişleri ise ekzotermik ve endotermik olarak gözlenir. DTA ve DSC reaksiyonun endotermik mi yoksa egzotermik mi olduğunu ve aktarılan ısı miktarının ölçülmesine imkan verir.

Bir madde fiziksel veya kimyasal bir değişime uğradığında ya ısı absorplar ya da ısı açığa çıkarır. Numunedeki termal enerji değişimleri sonucu endotermik ve ekzotermik etkiler ortaya çıkar. Numunenin dışarıdan ısı alarak değişikliğe uğraması endotermik bir olaydır ve bu nedenle bir enerjiye ihtiyaç vardır. Egzotermik olayda ise erimiş halden kristal hale dönüşüm vardır ve termal enerji salınır. DSC erimede endotermi ve bozunmada ise egzotermi (veya endotermi) gösterir [44].

6.1. Maddelerin Camsı Geçiş Sıcaklığı

Maddeler genelde katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç duruma ayrılarak sınıflandırılır. Çoğu zaman bu sınıflandırmada, plazma adı verilen dördüncü bir durum vardır.

Madde sıvı ya da gaz halinden katı hale dönüşürken maddeyi oluşturan atomlar düzenli bir üç boyutlu yapıya geçer ve bunun sonucunda atomların enerjisi azalır. Katıdaki atomlar, özellikle elektriksel karakterli kuvvetlerle, belirli konumlarda bir arada tutulurlar. Katı atomları bu denge konumları etrafında ısısal etkiler nedeniyle titreşim hareketi yaparlar. Fakat düşük sıcaklıklarda bu titreşim hareketi azdır ve atomlar hemen hemen sabit gibi düşünülebilir. Maddeye ısı enerjisi verilirse bu titreşim genliği artar.

Katı maddenin özellikleri, katıyı oluşturan atomların özelliklerine, atomların katı içindeki diziliş biçimlerine ve ortam koşullarına (sıcaklık, basınç vb.) bağlıdır. Çeşitli katılar arasında gözlenen büyük davranış farklılıkları, atomları bir arada tutan bağın türü ile atomların yapısal diziliş biçiminin sonucudur. Katılar çeşitli yapılarda bulunur. Kristal yapıli katılar, kristal yapıda olmayan biçimsiz (amorf) katılar diye iki gruba ayırabiliriz.

Camsı hal olarak da tanımlanan biçimsiz haldeki katılarda atomlar ve moleküller belirli bir desen oluşturacak biçimde dizilmemiştir. Sıvı haldeki bir madde soğutulduğunda atomların ısıli titreşimleri azalır; donma noktasında kristal hale geçen sıvı ısıli salar (erime ısıli) ve atomların kristal yapı oluşturmak üzere belirli dizilişe geçer. Aşırı soğumuş sıvı hali olarak adlandırılan donma noktasından daha düşük sıcaklıklara soğutulduğunda, bir dönüşüm sıcaklığı bölgesinde, madde daha da düşük sıcaklıklarda değişmeden kalacak bir yapıya sahip, termodinamik açıdan kararsız bir hal alan cam haline geçer. Camsı yapıdaki bağlar çözülmesiyle yumuşayan cam sıcaklık yükseldikçe tüm bağlar çözülmesiyle sıvılaşarak akmaya başlar. Kristal yapıda tüm bağların aynı anda koptuğu belli bir erime sıcaklığı olduğu halde camsı yapı için bu durum söz konusu değildir. Camsı yapının yumuşamaya başladığı sıcaklığa camsı geçiş sıcaklığı denir. Camsı geçiş sıcaklığı erime sıcaklığından daha düşüktür.

Polimerler uzun zincirli moleküllere sahip olduklarından hem kristal hem de amorf yapıyı birlikte bulundurmaktadırlar. Bundan dolayı küçük moleküllü maddelerden farklı olarak ısıtıldıklarında önce belli bir sıcaklık aralığında yumuşarlar sonra ya

viskoz akış haline ya da eriyik haline geçerler. Yani hem yumuşama yani camsı geçiş sıcaklığına hem de kristal polimerler erime sıcaklığına (T_m) sahiptirler [45].

Doğrusal bir polimer, yeterince yüksek sıcaklıklarda amorf, kauçuksu bir eriyiktir. Yeterince düşük sıcaklıklarda ise aynı polimer sert bir katıdır. Polimer katı belli bir sıcaklığın üstünde ısıtılırsa ana zincir hareket etmeye başlar. Bu sıcaklığın altında, polimer katı bir cam gibi serttir. Bu sıcaklığın üstünde ise polimer lastiksi yapıdadır. Polimer katı daha da ısıtılır ise akar ama ne kadar ısıtılırsa ısıtılsın buharlaşamaz. Polimerlerin bu camsı sıcaklığı onların molekül ağırlığına da bağlıdır ve bu yüzden kesin bir geçiş sıcaklığından bahsetmek mümkün değildir.

Camsı geçiş sıcaklığının bağlı olduğu bazı unsurlar aşağıda sıralanmıştır:

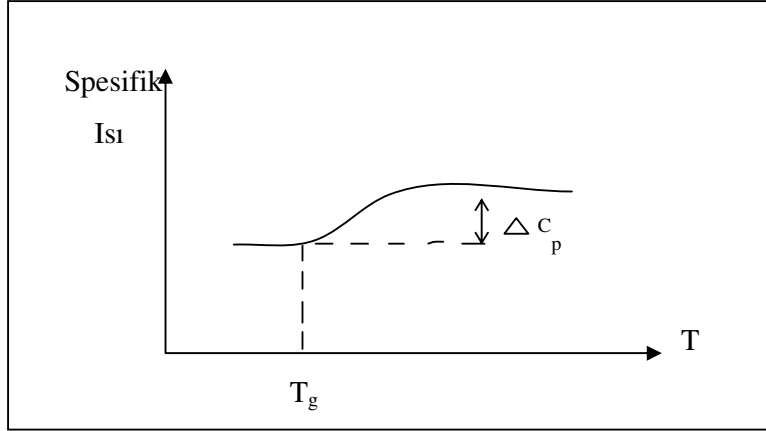
1. Zincir türüne, yan gruplara
2. Çözünürlük
3. Molekül ağırlığına (zincir uzunluğuna)
4. Çapraz bağ miktarına
5. Dolgu maddesi ve safsızlıklara
6. Deney hızına ve örneğin hazırlanması ile izlenen termal yollara

Mol kütlelerinin artması ile camsı geçiş sıcaklığı ilk önce hızla artar, sonra yavaşlar ve son olarak sabit bir değere ulaşır. Sabit bir mol kütlelerinde camsılaşma sıcaklığı ize zincir esnekliğine bağlıdır. Esnek zincirli yüksek mol kütleli yüksek camsı geçiş sıcaklığına, yüksek erime sıcaklıklarına sahiptirler. Daha sert zincirli yüksek mol kütleli ise yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahiptirler [45]. Çözünürlük parametresi ne kadar büyükse T_g değeri de büyüktür.

6.2. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) İle Camsı Geçiş Sıcaklığının Tespiti

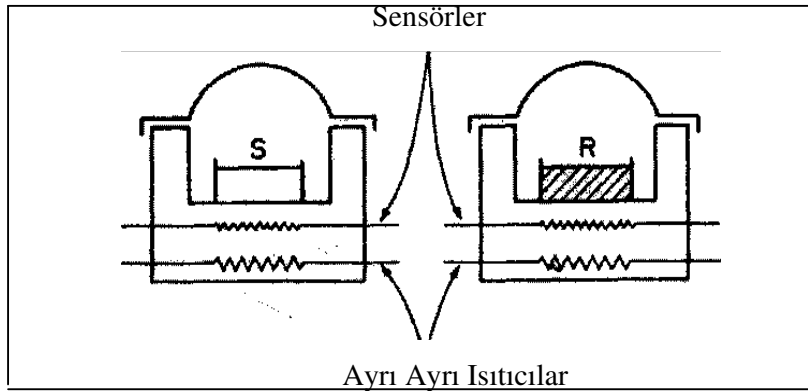
Cam, seramik ve polimerlerde camsı geçiş sıcaklığı (T_g) önemli bir kriterdir. Madde sıvı halden soğutulduğunda camsı geçiş sıcaklığında (sıvı halden amorf veya camsı

hale geçiş) maddenin ısı kapasitesi (C_p) ve spesifik hacminde belirgin bir değişme olur. Isı kapasitesi DSC ile incelenebilir.



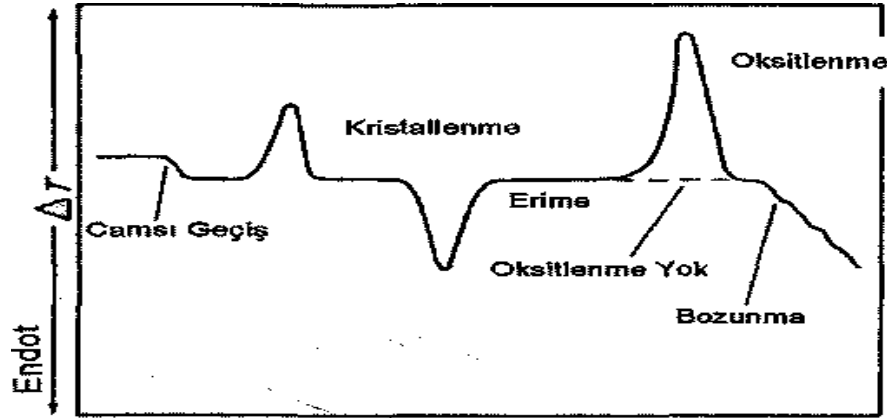
Şekil 6.1. DSC ile camsı geçiş noktasının tayininin şematik gösterimi [44]

DSC’de numune ve referans sıcaklıklar eşit tutulur. Numune ve referans sıcaklıklarını eşit tutabilmek için numune ve referansa sağlanacak ısı miktarı sürekli ölçülür. Kaydedilen ısı akışı belirli bir termal olayda alınan veya salınan enerji miktarının ölçüsünü verir. Genel bir DSC eğrisinde meydana gelen endotermik ve ekzotermik oluşumlar polimerin pek çok özelliği hakkında bilgi vermektedir. Bunlar camsı geçiş sıcaklığı, kristallenme, çapraz bağ oluşumu, erime sıcaklığı, çalışma ortamına göre bozunma ya da oksitlenme vb. bilgilerdir. Bunlarda kristallenme ve çapraz bağ oluşumu ekzotermik bir olaydır. Diğerleri ise endotermik bir olaydır.



Şekil 6.2. DSC sisteminin şematik gösterimi [44]

DSC eğrilerinde deneysel şartlardaki değişmelerin etkileri çeşitli olup, karmaşık ve girişimlidir. Bunlardan bazıları numunenin özelliği, numune etrafındaki atmosfer ve ısıtma hızıdır. Kayıtların şeklini değiştiren başka faktörlerde vardır. Bunların çoğu aletin tasarımından, numune kabının yapısından kaynaklanır.



Şekil 6.3. Polimerik maddelerde karşılaşılan değişme tiplerini gösteren şematik DSC kaydı [44]

Polimerik maddeleri incelemede termal yöntemler oldukça kullanılır. Bu nedenle polimer özelliklerine katkı maddelerinin etkisi de termal yollarla araştırılabilir. Bir polimerik reçinenin kürlenme derecesi termal tekniklerle incelenebilir. Kürlenme reaksiyonu egzotermik olduğundan ve bu reaksiyona karşılık elde edilen pik alanı kürlenme derecesinin bir ölçüsü olarak alınabilir.

Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) değeri polimerin sert yapıdan eğrilebilir yapıya geçişi gösterir. Bu geçişte ısı kapasitesinde bir değişim olur ve temel çizgide bir kayma gözlenir. Bu önemli bir özellik olup, T_g değerinin altında polimer bükülme özelliğini kaybeder. Camsı geçiş etkisi erime noktası etkisine göre oldukça küçük şiddettedir.

7. BİTÜMÜN MODİFİKASYONU

Bitümlü malzemeler reolojik özellikleri ve termal dirençleri ile geniş uygulama alanı bulmaktadırlar. 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 dayanımların artırılmasının gerekliliği bu sorunlardan dolayı bitümlü bağlayıcıların performanslarının iyileştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar ile bitüm modifiye edilerek performansları artırılmaya çalışılmaktadır.

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 [6]:

1. Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde etmek ve böylece kalıcı deformasyonları azaltmak,
2. Yüksek servis sıcaklıklarında daha sert karışımlar elde etmek ve böylece tekerlek izlerini azaltmak,

3. Kayma direnci yüksek yüzeyler elde etmek,
4. Karışımların stabilitesini ve mukavemetini arttırmak,
5. Karışımların yorulma direncini arttırmak,
6. Yaşlanmış bitümlü bağlayıcıları gençleştirmek,
7. Düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirmek,
8. Agregaların üzerinde daha kalın bağlayıcı filmleri oluşturarak, bağlayıcı ve agregaların birbirine yapışma özelliğini artırarak, soyulmayı azaltmak,
9. Akmayı ya da kusmayı azaltmak,
10. Yakıt dökülmelerine karşı direnci sağlamak,
11. Kaplama tabakalarının kalınlıklarını azaltmak ve daha ince aşınma tabakalarının kullanımını sağlamak,
12. Çatlakları geciktirmek,
13. Uygulama alanlarını artırmak,
14. Absorpsiyonu minimize etmek,
15. Kaplamaların performansını yükseltmek,
16. Kaplamaların uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak

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

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 Aranacak Özellikler

Bitümlü bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılacak olan katkı maddelerinin uygulamada etkili, pratik ve ekonomik olması bakımından bazı koşulları sağlaması istenilmektedir [1];

1. Kolay elde edilebilmelidir,
2. Bitümle uyuşmalıdır,
3. Bitüm karışım sıcaklığında özelliğini kaybetmemelidir,
4. Bitüm ile homojen olarak karışabilmelidir,
5. Bitümün yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale gelmeden akışkanlığa karşı direncinin artmasını sağlamalıdır,
6. Düşük sıcaklıklarda ise kaplamanın çok kırılgan veya sert olmasını önlemelidir,
7. Uygun maliyette olmalıdır.

7.4. Modifiye Bitümlerde Aranacak Özellikler

Modifikasyonda kullanılacak katkı maddelerinin bitüm ile karıştırılmasından sonra, elde edilen modifiye bitümden beklenen özellikler ise şunlardır [1];

1. Depolama, uygulama ve hizmet sırasında sahip olduğu özelliklerini kaybetmemelidir,
2. İşlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdır,
3. Depolama, uygulama ve hizmet sırasında fiziksel ve kimyasal olarak stabil olmalıdır,
4. Uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilmelidir.

7.5. Bitümün Modifikasyonu için Kullanılan Katkılar

Bitümlü bağlayıcıların modifikasyonunda pek çok katkı kullanılabilmektedir. Bitüm katkısı olarak kullanılabilen bu katkıların genel sınıflandırması Çizelge 7.1’de görülmektedir.

Çizelge 7.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırması [1]

Tip	Özellikler	Modifiyerlerin Asfalt Çimentosunun Kıvamına Genel Bilişi
1. Mineral Dolgu Maddeleri	- Mineral Filler: <i>Taş tozu</i> <i>Kireç</i> <i>Portland çimentosu</i> <i>Uçucu kül</i> - Karbon siyahı - Kükürt	Sertleştirme
2. Extender	- Kükürt - Lignin (Odun özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal lateks (<i>Kauçuk ağacı özsuğu</i>) b. Yapay lateks c. Blok copolymer d. İşlenmiş kauçuk	- Doğal kauçuk - Stiren butadien veya SBR - Stiren-butadien Stiren veya SBS - Dönüştürülmüş kauçuk	–
4. Plastik	- Poliyeten - Polipropilen - Bi-vinil-asetat, EVA - Polivinil klorür, PVC	Sertleştirme
5. Bileşim	3 ve 4'deki polimerlerin karışımı	
6. Fiber	- Doğal: Asbets , Taş yünü - Yapay: Polipropilen - Poliester - Fiberglas	Sertleştirme
7. Oksidan	Manganez tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan	- Kurşun karışımları - Karbon - Kalsiyum tuzu	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	- Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları - Sertleştirme ve doğal asfaltlar	Yumuşatma veya Sertleştirme
10. Soyulma Önleyici	- Aminler - Kireç	Yumuşatma

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.

Çizelge 7.2’de bazı yaygın kullanılan modifiyeler ve değişiklik sağladığı özellikler verilmektedir [1].

Çizelge 7.2. Modifiyeler ve değişiklik sağladığı özellikler [1]

BAZI YAYGIN KULLANILAN MODİFİYELERİN ROLÜ	
	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 kırılabilirliği
Solvent	Viskozite
Emülsifikasyon	Viskozite, Islatma kabiliyeti, Uygulama sıcaklığı
Islatma ajanları	Islatma kabiliyeti, Adezyon

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 katkıları, vb., sertleşme direnci için SBR, oksidan, antioksidan, mineral elyaflar, vb., soyulmaya karşı organik esaslı metal katkı maddeleri kullanılabilmektedir [7].

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, kırılgenlik, vb.) yapılarak sonuçlar modifiye edilmemiş bitümle karşılaştırılmalıdır.

7.6. Bitümün Modifikasyon Türleri

Kullanılan katkıları yani modifiyerler gerek cins gerekse miktar olarak farklı bitümlerde farklı sonuçlar yaratmaktadır. Bunun nedeni asfaltten ve malten olarak belirttiğimiz iki ana grubun her bitümde farklı oranlarda olmasıdır. Aynı şekilde katkı cinsinin ve miktarının belirlenmesi de önemli bir husustur.

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 [2].

Bitüm ile reaksiyona girecek kükürt miktarı sıcaklığa ve bitüm kompozisyonuna göre değişmektedir [2]. Kükürt moleküle ilave olarak veya hidrojen sülfat olarak hidrojen çıkartılması yoluyla oksitlendirilerek, en yoğun şekilde bitümün naften-aromatik kısmı ile reaksiyona girdiği gösterilmiştir [46,47].

Yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkacak hidrojen sülfür gazları sağlığa zararlı olduğundan, sıcaklığın dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi ve uygun ekipmanın kullanımı gerekmektedir.

Bitüm yaklaşık 160 °C sıcaklıklarda düşük viskoziteli bir madde olmasından ötürü karışımı kolayca işlenebilir hale getirmektedir. Karışım soğuduğunda fazla kükürt malzeme içerisindeki boşluklara kısmen dolar ve agregaların birbirleriyle sürtünmesini arttırarak karışıma yüksek mukavemet kazandırır [2].

Kükürt ile modifiye edilmiş karışım özellikleri ve davranışlarındaki değişimler zamana bağlıdır. İlk etapda, kükürt ile modifiye edilmiş bitümlü karışımların Marshall stabilitesi sadece bitüm kullanılarak hazırlanan karışımların değerinden az miktarda düşük olmakla birlikte, 7 ile 21 gün sonrasında, Marshall stabilitesi, modifiye edilmemiş malzemenin stabilite değerinin yaklaşık iki katına yükseldiği, bu durumun en geçerli açıklamasının ise bitümle etkileşime girmesi sonucunda kükürt kristalizasyonunun yavaşlaması olduğu belirtilmektedir [2].

7.6.2. Kauçuk ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu

Polibütadien, poliizopren, doğal kauçuk, bütül kauçuk, klorofin, düzensiz stiren-butadien-kauçuk, vb. gibi bileşenlerin çoğu bitüm ile birlikte kullanılmakta olup, başlıca etkileri viskoziteyi arttırmaktır.

Bazı durumlarda, kauçuklar vulkanize halde (çapraz-bağlı) kullanılır. Genellikle kullanılmış taşıt lastiklerinden elde edilen bu malzeme bitümlü karışımlara yüksek sıcaklıklarda karıştırılarak kullanılır.

Yol yapımı için kullanılan karışımlar haricinde kauçuğun bitüm ve agregaya karıştırılarak futbol ve çocuk oyun sahasında kullanılabilecek elastik yüzeye sahip malzeme yapımında da kullanılabileceği görülmektedir [48].

7.6.3. Organo-mangan bileşiklerinin ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu

Bitümde organo-mangan bileşiklerinin kullanımı, ya tek başına veya organo-kobalt veya organo-bakır bileşikleriyle kombinasyon halinde yapılmaktadır [2].

Organo-mangan bileşiğinin bitüm içerisinde hızlı bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla malzeme bir katalizör ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Manganın, kararlı, kimyasal direnci yüksek metalli komplekslerin oluşumunu hızlandırdığına inanılmaktadır. Bu kompleksler bitüm moleküllerini birbirine bağlayarak, bitümlü karışımın mukavemetini güçlendirmektedir.

Organo metalik mangan katkı maddesi ile kalker ve bazalt agregalarının soyulmaya karşı mukavemet değerinde genel olarak % 90 oranına ulaşan artışlar ve organo metalik mangan bileşiğinin kalkerlerde bazaltlardan daha etkin olduğu tespit edilmiştir [29].

7.6.4. Termoplastik polimerlerin ilave edilmesi yoluyla bitümlerin modifikasyonu

Fiziksel olarak düz ve dallanmış zincir yapısına sahip olan bu polimerler, ısıtıldıklarında önce yumuşarlar sonra kıvamlı akışkan haline gelirler [45]. 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 artırır [46].

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 [2].

Bitümlü karışımlara EVA ilavesi sadece performansın iyileştirilmesi için kullanılmamakta, ayrıca soğuk havada yapılan uygulamalarda da önemli miktarlarda EVA kullanılmaktadır. EVA, kesme kuvvetine hassaslığından ve daha yumuşak bitümle kullanıldığından ötürü karışımın işlenebilirliğini artırmaktadır [46].

7.6.5. Termoplastik kauçukların ilavesi ile bitüm modifikasyonu

Stirenik blok kopolimerler, dört ana termoplastik elastomer gurubu (poliüretan, polieter-poliester kopolimerler, olefinik kopolimerler ve stirenik kopolimerler) arasında bitüm ile karıştırılmak için en büyük potansiyeli taşıdığı kanıtlanmış olup, bu polimerlerle birçok çalışma yapılmıştır [49-51].

Termoplastik kauçuklar mukavemet ve elastikliğini moleküllerin üç boyutlu bir ağa fiziksel olarak çapraz şekilde bağlanmalarından elde etmektedir. Polistirenin camlaşma noktasının üzerindeki sıcaklıklarda (100 °C üzeri) ortamın zayıflamasından ötürü polistiren yumuşamakta ve gerilme altında ayrışmakta dolayısıyla da kolayca işlenmeye olanak sağlamaktadır. Soğutma ile ortamlar tekrar birleşmekte, mukavemet ve elastisite geri kazanılmaktadır [2].

7.6.6. 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 [45].

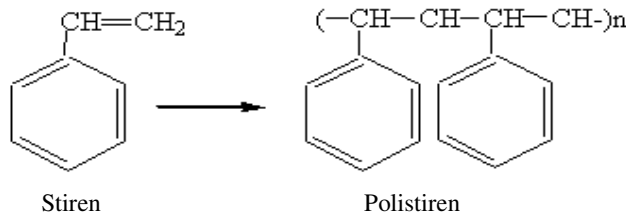
Biri sertleştirici diğeri bir reçineden oluşan iki sıvı bileşenin kimyasal reaksiyona girmesinden termoset polimerler elde edilmektedir. Bitüm ile karıştırılan iki bileşenli epoksi reçinesi karışımları bitümünkinden çok termoset reçinelerin özelliklerini yansıtmaktadır [2].

Termoset polimerler ile modifiye edilen bitümler ısıya daha az duyarlı, daha elastik ve aşınma direnci daha yüksektir. Dolayısıyla deformasyona karşı daha dirençlidirler. Ayrıca, bitüm-agrega adezyonu daha fazladır [7].

8. POLİMERLER VE GENEL ÖZELLİKLERİ

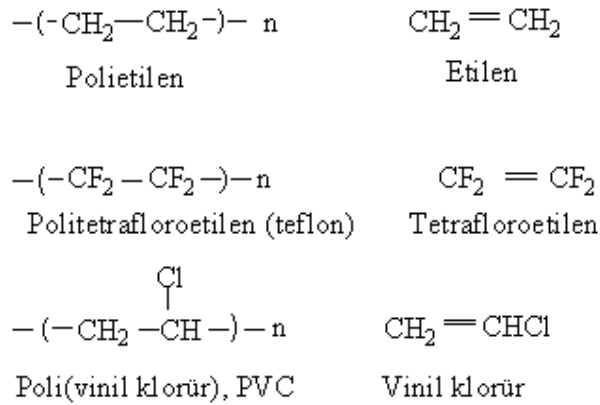
Polimerler, uygun fonksiyonel grup içeren ve monomer olarak adlandırılan küçük ve basit moleküllerin birbirleri ile kimyasal olarak bağlanması ile oluşan büyük molekülü maddelerdir [45].

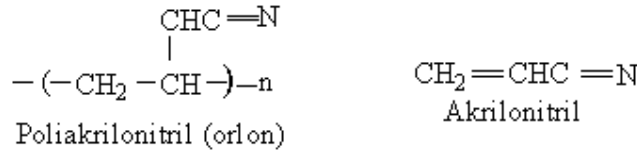
“Poli” latince bir sözcük olup, çok sayıda anlamına gelmektedir. Basit bir örnek olarak polistirenin birçok stiren monomerinin bir araya gelmesi ile oluşması verilebilir.



Şekil 8.1. Stiren monomerinden polistirenin oluşumunun şematik gösterimi

Yukarıda görüldüğü gibi stiren monomerinin polimerizasyonu ile bu monomeri çok sayıda içeren polistiren elde edilmektedir. Aşağıda yaygın olarak kullanılan bazı polimerlerin formülleri ve sentezlendikleri monomerler gösterilmiştir.





8.1. Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerler çok çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. En genel olarak polimerleri doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayırabilmek mümkündür. Endüstride kullanılan polimerler yapay polimerlerdir. Yapay polimerler çoğunlukla çok sayıda tekrarlanan monomer veya kısaca mer denilen basit ünitelerden oluşur [52]. Örneğin; poliester, poliamid, polivinil klorür ve polietilen gibi polimerler, monomerlerin çok sayıda tekrarıyla oluşan yapay polimerlerdendir.

Doğal polimerler ise canlı ve cansız bünyelerde doğal olarak kendiliğinden oluşan polimerlerdir. Bir kısmı yapay polimerler gibi tekrarlanan birimlerden oluşmaktadır. Selüloz, nişasta ve doğal kauçuk, yapay polimerlerle aynı yapıda olan doğal polimerlere, proteinler, nükleik asitler ise farklı yapıdaki doğal polimerlere örnektir.

Polimerler çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Genel olarak bunlar [52];

1. Kimyasal bileşimine göre: Organik, inorganik
2. Yapılarına göre: Homopolimerler, kopolimerler, terpolimer
3. İşleme esasına göre: Termoplastik, termoset
4. Kullanım alanına göre: Plastikler, fiberler, kaplamalar
5. Fiziksel yapılarına göre: Amorf, kristalin, yarı kristalin

Polimerler, kimyasal kompozisyonlarına göre organik ve inorganik olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Bir çok organik polimerlerde ana zincirde karbon olmak üzere, hidrojen, oksijen, azot ve halojen atomları bulunmaktadır. İnorganik polimerlerde ise ana zincirdeki karbonun yerine silisyum, germanyum, bor ve fosfor gibi elementler bulunmaktadır[52].

Yapılarına göre polimerler homopolimerler, kopolimerler ve terpolimer olmak üzere üç grupta incelenebilirler. Homopolimerler; molekül içinde tek bir monomerin tekrarı ile oluşan polimerlerdir. Kopolimerler ise iki yada daha fazla monomerin polimerizasyonundan oluşan polimerlerdir. Üç farklı cins monomerden oluşan polimerlere ise terpolimer denir. Bitüm modifikasyonunda sıkça kullanılan EVA ve SBS kopolimerlere, polietilen homopolimere, akrilonitril-butadien-stren (ABS) ise terpolimere örnek olarak verilebilir.

Plastiklerin en yararlı ve en önemli sınıflandırma şekli termoplastik ve termoset adları altında işleme esasına göre yapılan sınıflandırmadır. Termoplastik veya plastomerik polimerler ısıtıldıklarında kalıcı değişime girmeyen plastiklerdir. Isıtılınca akıcı hale gelirler ve soğutulduklarında ise sertleşirler. Bu gruptan en önemli plastikler naylon, akrilikler, polistren, polietilen, selülozikler ve vinillerdir.

Yüksek oranda çapraz bağ içeren polimerler ısıtıldıkları zaman termoplastikler gibi yumuşamazlar ve erimezler, hatta tersine sertleşirler. Bu nedenle, ısıtılınca sertleşen polimerlere ısı ile sertleşen anlamına gelen termoset polimerler denir [45]. Termoset polimerlere epoksiler, silikonlar, bakalitler ve poliesterler örnek olarak verilebilir.

Polimerlerin, kimyasal yapılarında yer alan moleküllerin oluşturduğu zincirin, düzenlenme biçimine göre de polimerler üç gruba ayrılabilir. Bunlar; amorf yapıdaki, kristalin yapıdaki ve yarı kristalin yapıdaki polimerlerdir.

Amorf yapı, molekül zincirlerinin gelişi güzel konumda olduğu yani karmaşık olduğu bir yapıdır. Yapı içinde polimer molekülleri sürekli hareket halindedir ve zincirler bir biçimden ötekine gelişi güzel dönme ve bükülme hareketi yaparlar. Zikzak hareketleri çok önemlidir ve camsı geçiş sıcaklığında başlar ve sıcaklık arttıkça artış gösterir. Polimerlerin çoğu tamamiyle amorfudur. Elastomerler, amorf yapıdaki polimerlerin önemli bir alt grubudur. Kristalin yapıda ise molekül zincirleri belirli ve hareketsiz bir düzen içerisinde. Polimerler katı halde iken genellikle tamamiyle kristalin yapı yerine amorf ve kristalin karışımı bir yapı göstermektedirler.

8.2. Polimerlerin Genel Özellikleri

Polimerlerin genel özelliklerinden bazıları aşağıda sıralanmıştır,

1. Kolay biçimlendirilebilirler ve hafiftirler: Yapıda oksijen ve halojen bulunması halinde özgül ağırlıkları artar. Bir çok plastik türünün kesin erime noktaları yoktur ve ergime büyük bir yavaşlıkla katı halden yüksek akışkanlı sıvı haline geçiş şeklindedir. Plastiklerin bu özelliğinden yararlanılarak kalıplanması, çekilmesi, şişirilmesi ve sıkıştırılması mümkün olmuştur.
2. Polimer malzemeler ısı ve elektriğe karşı iyi yalıtkandır.
3. Makaslamaya duyarlı, kayma dirençleri düşük olup, çekme ve basınç dayanımları yüksektir.
4. Kimyasal etkilere dayanıklılıkları yüksektir.
5. Asitlere ve bazlara karşı dirençlidirler. Bu direnç türlerine göre az çok değişir. PE, PP, PTPE, epoksi, silikon, poliester kuvvetli asitlere ve bazlara dirençli tipik örneklerdir. Akrilik, fenolik, poliasetal ve termoplast poliester ise kuvvetli asit ve bazlara karşı direnç göstermeyen ürünlerdir.
6. Suya karşı dayanıklılıkları iyidir. Bazıları su buharına karşı duyarlı olup, bozulabilirler.
7. Yüksek sıcaklığa karşı termoset polimerler daha dayanıklıdır.
8. Yoğunlukları düşüktür. Enerji yutma özellikleri vardır.
9. Plastiklerin bir çoğu açık hava şartlarından etkilenirler. Akrilik, sülfon, silikon, vinil, florokarbon plastikleri ile PP, PC, poliasetol ve epoksi plastikleri açık hava şartlarına oldukça dirençlidir.
10. Çözünürlük bakımından fenolik, melamin, poliester, epoksi, PA, PE, PP gibi polimerler dirençlidirler. Selüloz, akrilik, vinil plastikleri ile polistiren dirençsiz polimerlerdir.
11. Polimerlerin deformasyonu da metallerinki gibi zamanla bağlantılıdır.

8.3. Polimer Modifiye Bitümlerde Kullanılan Polimerlerin Sınıflandırılması

Son yıllarda geliştirilen teknikler ile plastiklerin işlenmesi ve şekillendirilmesi kolaylaşmış ve bu gelişme ile mühendislik malzemesi olarak kullanılmasına yol açmıştır. Kullanım açısından polimerleri termoplastikler, termosetler ve elastomerler olarak üç gruba ayırmak mümkündür.

Çizelge 8.1. Endüstride en çok kullanılan polimerler [52]

TERMOPLASTİKLER	TERMOSETLER	ELASTOMERLER
Asetaller Akrilikler Floroplastikler Poliamidler Poletilen Polipropilen Polistiren Polikarbonat Polifenilen eter Poli sülfid Poliimidler Polisülfon Polivinil klorür Poliüretan Selülozikler	Alkitler Alil Kazein Aminoplastlar Fenolikler Epoksiler Dialilftalat Poliester Melamin Poliüretan	Bütül Neopren Buna S Stiren butadien Silikon

Termoplastikler

Mühendislikte en çok kullanılanları, polietilen, polipropilen ve polivinil klorürdür. Bu termoplastikler genellikle elektriksel ve kimyasal özellikleri iyi, sürtünme katsayıları düşük, su absorpsiyonları çok az olan ve kolay işlenebilen reçinelerdir [52].

Termoplastiklerin bitüme ilavesi ile bitüm sert hale getirilir ve bitümlü karışımlar fazla esnemenen büyük yüklere dayanabilmesi sağlanabilmektedir. Bitüm modifikasyonunda kullanılan bazı termoplastikler polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilklorid (PVC), polistiren (PS) ve etilen vinil asetat (EVA) olarak verilebilir.

Bunlar bitümle karıştırıldıklarında, normal servis sıcaklıklarında bitümün viskozitesini ve sertliğini artırmaktadır [53].

Termosetler

Termosetler erimeyen ve akmayan polimer katkı maddeleridir. Termosetlerde ısıtma işlemi, kimyasal bir reaksiyonun sonucunda ağlaşmaya ve geri dönülmez bir değişimin oluşmasına neden olmaktadır. En önemli termosetler, alkidler, fenolikler, termoset poliestерler, epoksiler ve poliüretanlardır.

Elastomerler

Elastomerler, şekil ve boyutları az bir kuvvet uygulaması ile önemli ölçüde değişen ve kuvvetin kaldırılması ile kısa sürede ilk şekil ve boyutlarını kazanabilen büyük molekülü maddelerdir [52]. Bitüm modifikasyonunda kullanılan başlıca elastomerler, doğal kauçuk (NR), polibütadien (BR), isobütadien-isopren kauçuk (IIR), stiren-bütadien kauçuk (SBR) ve stiren bütadien-stiren blok kopolimer (SBS) olarak verilebilir

9. KAYNAK ARAŞTIRMASI

9.1. Polimerlerin Bitüm Katkı Maddesi Olarak Etkileri

Ülkemizde yük ve yolcu taşımacılığının büyük bir kısmı karayolu taşımacılığı ile yapılmaktadır. Bu nedenle deformasyonu minimum seviyede tutmak için ağır trafikli yollarda modifiye bitümler kullanılmaktadır.

Kaplamalarda bağlayıcı olarak kullanılan bitümün ağır tekerlek yükleri ve değişen iklim koşulları altında istenilen performans özelliklerine sahip olabilmesi için bitümün polimerlerle modifiye edilmesi çalışmalarına 1970'li yıllarda başlanmış ve günümüze kadar yapılan araştırmalar bitümle uyumlu bazı polimerlerin bitümün reolojik davranışını etkilediği ve özelliklerini iyileştirdiği sonucunu ortaya koymuştur.

Polimer ile modifiye edilmiş bitümlü karışımların düşük sıcaklıklar altındaki performanslarının incelendiği bir çalışmada 4 farklı polimer SBS, SEBS, EVA veya EBA kütlece % 6 oranında bitüm içerisinde kullanılmıştır. Düşük sıcaklık altındaki karakteristik özellikleri incelenmiş ve bunun içinde dinamik kesme reometresi ve düşük sıcaklık kırılma testleri uygulanmıştır. Kütlece % 6 polimer ilavesi 180 °C da 125 rpm karıştırma hızında 2 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. -25 °C ile -15 °C sıcaklıklar arasında yapılan deneyler dinamik mekanik analiz testi (DMA), dinamik kesme reometresi (DSR), sünme testi (creep test, BBR) ve çekme gerilmesi testidir (TCRST). Sonuç olarak bitümün ana yapısının esas özelliklerini tayin ettiği, polimerlerle modifiye edilmiş olan durumlarda ise düşük sıcaklık çatlamlarında ancak birkaç derecelik azalışlar elde edildiği belirtilmiştir [50].

Maleik anhidrid ve stiren-bütadien-stiren kauçuğu ile modifiye edilmiş asfaltların termomekanik özelliklerini viskozite tayini ve yumuşama noktası ölçümleri ile incelenen bir çalışmada, kütlece % 5 SBS kauçuğu, % 10 maleik anhidrid katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki maleik anhidrid ile yapılan kimyasal modifikasyon düşük sıcaklık kırılma direncini ve yüksek sıcaklıkta yapışma

kuvvetini geliřtirmiřtir. Kimyasal modifiye edicilerin asfaltların dūřuk ve yūysek sıcaklıktaki performanslarını artırıcı ōzelliklere sahip olduđu gōzlenmiř ve ortaya konulmuřtur [51].

AC 10 ve AC 30 asfaltları kullanılarak, yūysek yođunluklu polietilen (HDPE), klorlanmıř polietilen (CPE) ve maleatlı polietilen (MGPE) katkılı sekiz asfalt ōrneđi ile yapılan bir çalıřmada ise mekanik analizler ve fark taramalı kalorimetre testleri uygulanmıřtır. Asfalt ūrūnūn gevřeme deđerleri camsı geçiř sıcaklıđı ve aktivasyon enerjisi ile iliřkilendirilmiř, modifiye edilmiř asfalt ile orjinal asfaltın sūnme dirençleri ve dūřuk sıcaklık çatlama dirençleri karřılařtırılmıřtır. Klorlanmıř polietilenin daha iyi sonuçlar verdiđi gōrūlmūřtur [54].

Wen, Zhang ve arkadařları SBS karıřımlarının kūkūrt varlıđında vulkanizasyon karakteristiklerini arařtırmıřlardır. Karıřımın kūkūrtle vulkanizasyonunun 140 °C den daha yūysek sıcaklıklarda meydana geldiđini belirtmiřler, 150-180 °C arasında karıřımın iyileřme oranının sıcaklıđın artıřı ile beraber ōnemli ōlūde arttıđını tespit etmiřlerdir. Gerek SBS miktarı gerekse kūkūrt miktarı karıřımın vulkanizasyonuna etkili olmuřtur. Asfalt 160 °C a kadar ısıtılmıř ve karıřım homojen oluncaya kadar 1 saat karıřtırmaya devam edilmiřtir. Sonra sıcaklık 120 °C a kadar dūřūrūlmūř ve karıřımın içerisine kūkūrt ilave edilmiřtir. Dūřuk hızda 15 dakika karıřım homojen oluncaya kadar karıřtırmaya devam edilmiřtir. Sonuçta kūtlece % 5 kūkūrt, kūtlece % 6 SBS, 180 °C da 4000 rpm karıřtırma hızında 60 dakikalık karıřtırmanın uygun olduđunu tespit etmiřlerdir [55]. Aynı arařtırmacılar bir bařka çalıřmalarında ise asfalt/SBS/kūkūrt karıřımının vulkanizasyon karakteristiklerinin deformasyon kontrollū reometre kullanarak incelemeye çalıřmıřlar ve SBS'nin vulkanizasyonu sonucu karıřımın gūcūnde artıř kaydetmiřlerdir. Būtan kauçuk (BR)/kūkūrt ilavesi ile karıřımının sertliđi tūm kūr boyunca ōnemli ōlūde etkilenmiř, SBS modifiye asfalta kūkūrt eklenmesi modifiye edilmiř bađlayıcıdaki kimyasal sertleřmenin ađ yapı dūzeninin sonucu olduđunu belirtmiřlerdir. SBS-modifiyeli asfalt-kūkūrt içeriđinin fiziksel ōzellikleri modifiye edilmiř kūkūrtsūz bađlayıcı ile karřılařtırılmıř; SBS-modifiyeli asfaltın depolanma kararlılıđı, kūkūrtūn ilave edilmesiyle etkili bir biçimde geliřtiđi tespit edilmiřtir [56].

Termoplastik blok kopolimerlerin asfaltın reolojisi üzerine etkilerini inceleyen Gahvari, AC-20 asfaltında lineer ve radyal yapılarına bağlı 5 farklı SBS blok kopolimerleri üzerinde çalışmış; 15 farklı karışımın reolojik özellikleri üzerinde kısa dönemli yaşlanmanın etkisini döner ince film halindeki ısıtma kaybı (RTFOT) deneyi ile simüle etmiştir. Viskoelastik yanıtlar üzerinde yaşlanma koşulları ve polimer tipi ve içeriğinin etkileri incelenmiş, polimer miktarı arttıkça kompleks modülün arttığı ve yumuşama tayflarının genişlediği belirtilmiştir [57].

Polimer modifiye asfaltların viskozite fonksiyonlarının incelendiği bir çalışmada asfalt üzerine uygulanan dinamik deneylerin yararlarından bahsedilmiş, yapılan çalışmaların ne kadar yararlı olsa da polimer modifiyeli asfaltların tüm karakteristik özelliklerini sergilemediğini belirtilmiştir. Çalışmada farklı konsantrasyonlarda SBS ve EVA ile modifiye edilmiş asfaltların viskozite testleri yapılmış, polimerler ile modifiye edilen asfaltın geçiş bölgesinde viskoelastik akışkandan Newtonian akışkana geçtiği gösterilmiş ve bu bölgede viskozitenin, katkının karakteristik özelliğini taşıyabildiği belirtilmiştir. [49].

Kararlı polistiren ile lineer SBS triblok kopolimerinin hazırlanıp asfaltı modifiye etmede kullanıldığı bir başka çalışmada ise asfalt/ PS/SBS/kükürt karışımlarının vulkanizasyon karakteristikleri gerilme kontrollü reometrede ölçülmüştür. Modifiye asfaltın morfolojik ve reolojik özellikleri, katkısız orjinal numunenin morfolojik özelliklerine göre geliştiği ve yüksek sıcaklıktaki stabilitesinin belirgin bir şekilde SBS vulkanizasyonu ile arttığı optik mikroskop ve dinamik kesme reometresi yardımıyla tespit edilmiştir [47].

Saf EVA, EVA kopolimeri veya benzer vinil asetat kullanılarak 60/70 penetrasyonlu bitümün yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi ve düşük sıcaklıklarda çatlama riskinin azaltıldığı çalışmada DSC-7 termal analiz cihazıyla N₂ altında 20 °C/min ısıtma hızıyla polimerlerin erime sıcaklıklarını belirlemişlerdir. En iyi viskoelastik özellikler EVA kopolimeri ile yapılan modifiye asfaltda elde edilmiştir. Büyük ihtimalle karbon siyahının varlığı nedeniyle bu materyaldeki katkıların bir dolgu maddesi olarak davrandığı belirtilmiştir. Denge testleri % 3 lük polimer oranındaki

karişımların kararlılığı için 165 °C de 24 saatlik süre, % 1 lik karişımın kararlılığı için ise 4 günlük süre gerektiği gösterilmiştir. Genel değerlendirmelerinde ise yol kaldırımlarında % 1 lik dönüşümlü EVA veya saf EVA katkılı asfaltların kullanılmasınn uygun olduğunu belirtmişlerdir [46].

Polyolefin katkıların bitümlü bağlayıcıların kıvamı ve yumuşama noktasına etkilerini üzerine yapılan bir araştırmada ktlice % 8; % 10; % 12 ve % 14 oranlarında katkı kullanarak 75/100 ile 120/150 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcıları farklı kariştırma sürelerinde (3 ve 15 dakika), farklı kariştırma sıcaklıklarında (163 °C ve 185 °C) ve 1200 devir/dakika kariştırma hızında modifiye edilmiştir. Sırasıyla penetrasyon, ince film halinde ısıtma deneyi sonrası penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneyleri uygulanmış ve optimum kariştırma süresi, katkı oranı ve kariştırma sıcaklığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuçta polyolefinlerin katıldıkları bitümlü bağlayıcının penetrasyon değerini düşürdüğü ve yumuşama noktası değerini arttırdığını tespit edilmiştir. Yine granr polyolefin tanelerinin 1200 devir/dakika kariştırma hızında ve 185 °C ye kadarki sıcaklıklarda bitüm içerisinde iyi bir dağılım sergilemediği gözlenmiştir [58].

Bitümlü bağlayıcıların sertleşmesine bağlı olarak ortaya çıkan mekanizmasını ve kullanılan katkıların yaşlanmaya etkilerini inceleyen Aksoy, bitümün sertleşmesinin bitümlü karişımların durabilite karakteristiklerini olumsuz etkilediğini, atmosferik oksidasyonun sertleşmenin ana nedeni olduğu ve bunun sonucu olarak da viskozitede artış ve penetrasyonda azalma görüldüğünü, SBS türü katkıların bağlayıcının yaşlanması (sertleşmesi) konusunda olumlu etki gösterdiği belirtilmiştir [59].

Polimer oranının artışı ile bitümün fiziksel özelliklerinin ve kimyasal yapısının nasıl değiştiğini inceleyen araştırmacılar, 60/70 penetrasyonlu bitüme, 150-180 °C sıcaklıkta %2,5; %3,0; %3,5; %4,0; %4,5; %5,0; %5,5 ve %6,0 oranlarında SBS Kraton D 1192 polimeri kariştırarak elde ettiği polimer modifiyeli bitümün penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, elastik geri dönme, viskozite, depolama stabilitesi deneyleri ile laboratuvarıda yaşlanmayı karakterize edebilmek amacıyla ince film halinde ısıtma kaybı (Thin Film Oven Test-TFOT) ve döner ince film

halinde ısıtma kaybı (Rolling Thin Film Oven Test-RTFOT) deneylerini yapmışlardır. Döner tip viskozite cihazı kullanarak viskozite değerlerinin polimer miktarının artması ile arttığı ve SBS ilavesinin bitümün düşük sıcaklıktaki özelliklerini belli bir seviyeye kadar iyileştirdiği, yaşlanmayı belli bir orana kadar azalttığı tespit edilmiştir [60]. Aynı katkı ile yapılan başka bir araştırmada SBS'nin mukavemet ve sertlik kazandırmakta olduğu, aynı zamanda reolojik parametreleri geliştirerek kuma ve şişmenin önüne geçildiği belirtilmiştir [61].

Tekerlek izi problemlerinin çözümüne yönelik olarak Bouldin ve arkadaşları, polimerik katkılar ile yüksek sıcaklık ve ağır trafik yüklerinde çalışmıştır. Bu kaplama sistemlerinin daha ayrıntılı viskoelastik davranışlarını karakterize edebilmek için çalışmalarında 3 asfalt karışımı ve saf AR 100 kullanmışlardır. Karışımlarda sürekli deformasyon direncini polimerik katkıların artırdığını tespit ederek, bunun bağlayıcının temel reolojik özellikleri ile de ilişkili olduğunu belirtmişlerdir [62].

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve HDPE ile etilen propilen dien monomeri (EPDM) nin karışımı ilave edilerek asfaltın modifiye edildiği çalışmada, asfalt bağlayıcıya polimer 90/10 HDPE/EPDM karışım oranında ilave edilmiş ve bütün deneylerde sabit tutulmuştur. Modifiye edilmemiş asfalt ve kütlece % 1-5 arasındaki oranlarda polimer modifiyeli asfaltların viskoelastik özellikleri çalışılmıştır. Örnekler Thin Film Over Test (TFOT) ile yaşlandırılmış ve -15 °C ve 60 °C arası sıcaklıklar dikkate alınmıştır. Frass kırılma noktası ve yumuşama noktası deneyleri yapılmış, en iyi sonuçlar % 1 HDPE/EPDM de elde edilmiştir [63].

Asfaltlarda ihtiyaç duyulan yüksek performansın sağlanması için asfaltın farklı modifikasyonlarını araştıran Sekar ve arkadaşları, yüksek sıcaklıkta sünme ile stabilite ve düşük sıcaklıkta ayrılma/yorulma direncini geliştirmeye çalışmışlardır. Yüksek sıcaklıkta olduğu gibi düşük sıcaklıkta da polimer ve lastiğin asfalt ile karışımının iyi olduğu tespit edilmiştir. Polimerin kimyasal yapısı, molekül ağırlığı ve partikül boyutu gibi çeşitli faktörlerin modifiye asfaltın özelliklerini tayin etmede çok önemli rol oynadığı, ancak bu faktörlerin etkilerinin tam olarak ortaya konulamadığı belirtilmiştir. Polimer katkısıyla asfalt modifikasyonundaki gelişmeyi

3 ana karakteristik (yapışma, adezyon ve durabilite) göz önüne alınarak değerlendirilmiştir [64].

UV floresans yansıması mikroskopik tekniği kullanarak iki karışmaz polimerin (bir polyolefin ve bir SBS triblok kopolimeri 5:1) çeşitli asfaltlara modifiyesi ile polimer/asfalt karışımlarının performans ve mikro yapıları arasındaki ilişkilerin araştırıldığı çalışmada; Safhaların çoklu dağılımı ve ince SBS dağılımı, karışım konsantrasyonunun çok hassas olduğunu göstermiş ve devamlı yük altında çalışan matriks formunda SBS'nin dağılma özelliği elastomerik davranışı ölçmede etkin olduğu belirtilmiştir [65].

Poliyeten (PE), klorlanmış poliyeten (CPE) ve kullanılmış lastikten elde edilen öğütülmüş çapraz bağlı lastikle (kırıntı ve 200 meslik toz partiküllerden oluşmuş) modifiye edilmiş çeşitli asfalt çimentolarının Dinamik Mekanik Analiz (DMA) kullanarak incelendiği çalışmada, poliyeten ve toz lastik parçalarından oluşan karışımların yüksek sıcaklıkta Newtonion davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer taraftan benzer davranış kırıntı lastik karışımında ölçülememiştir. Bununla beraber asfalt-lastik karışımının mekanik özelliklerinin kompozisyondaki polimer konsantrasyonuna, partikül boyutuna ve asfaltın kimyasal kompozisyonuna bağlı olduğu belirtilmiştir [66].

Düşük yoğunluklu poliyeten (LDPE) ve stiren-bütadien-stiren triblok kopolimerinin (SBS) asfalta modifiyesini araştıran Gao ve arkadaşları, LDPE/SBS karışimli modifiye asfaltın vulkanizasyon karakteristiklerini çekme kontrollü reometre kullanarak çalışmışlardır. Modifiye asfalt karışımında SBS vulkanizasyonun torkunda yükselmeye işaret sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Yine çok küçük miktarlarda kükürt ilavesiyle LDPE/SBS modifiye asfalt karışımının fiziksel özellikleri geliştirilmeye çalışılmış ve kükürt ilavesi öncesi ve sonrası için dinamik kesme reometresi ve bir döner tip viskozimetre ile karakterize edilmeye çalışılmıştır. Kükürt ilavesinin LDPE/SBS modifiye asfalt karışımının depolama stabilitesini artırdığı tespit edilmiştir [67].

Polimer modifiye asfaltların ısıya duyarlılıklarının yaşlanmaya etkisini inceleyen bir çalışmada araştırmacılar, ince toz halinde tekerlek lastiğini, stiren-bütadien kauçuğunu (SBR), etil vinil asetat (EVA) blok kopolimerini ve stiren-etil-butil-stiren (SEBS) kopolimerini kullanarak asfaltı modifiye etmişler ve polimer modifiyeli asfaltların ısıya duyarlılıklarının modifiye edilmemiş asfaltlardan daha düşük olduğunu, yaşlandırılmış modifiye asfaltların ısıya duyarlılıklarının ise yaşlandırılmamış modifiye asfaltlardan biraz daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir [68].

Asfalt çimentolarına çeşitli katkı maddeleri katılarak, asfaltik bağlayıcıların modifikasyonlarından önceki ve sonraki fiziksel özelliklerinin incelendiği çalışmada, malzemedeki değişikliklerin saptanmasına çalışılmıştır. Kırıkkale Rafinerisi ürünü 60/70 penetrasyonlu asfalt çimentosuna trinidad göl asfaltı, kaya asfaltı ve EVA (polybilt 103) katkıları çeşitli oranlarda katılarak modifiye asfaltlar elde edilmiştir. Modifiye sonrası penetrasyon ve düktilite değerinin düştüğü, yumuşama noktası değerinin arttığı görülmüştür. Bir alternatif olarak Aliğa Rafinerisi 40/50 penetrasyonlu asfalt çimentosuna da deneyler yapılmış yumuşama noktası ve kırılma noktası deneyleri açısından benzer sonuçlar elde edilmiştir [69].

Lastik parçacıklarının asfaltın özelliklerine etkisini incelemek için 50 ve 100 penetrasyon dereceli Croda Hydrocarbons (İngiltere) tarafından sağlanan geleneksel asfalta ağırlıkça % 2; 5; 10 ve 20 oranlarında çok ince parçalanmış vulkanize otomobil lastiği katılmıştır. Karıştırma için 1500 gram asfalt önceden 160 °C fırında 2 saat süre ile ısıtmış ve sonra hemen karıştırıcıya alınmıştır. Karıştırma işlemine hemen başlanılmış ve 5 dakika içerisinde lastik parçaları ilave edilmiştir. Lastik parçalarının asfaltla temasından sonra şiştikleri ve karışım içinde hacmi artan, dağılmış lastik parçacıklarının asfaltın viskozitesini arttırdığı görülmüştür. Sonuçta lastik modifikasyonunun boyut ve orana bağlı olarak ürünün elastiklik özelliğini artırdığı tespit edilmiştir [70].

Tayfur ve arkadaşlarının modifiye asfalt karışımları ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için yaptıkları çalışmada, beş modifiye asfalt karışımı ile çalışarak,

sıcak asfalt karışımlarının deformasyon dirençlerini incelemişlerdir. Modifiyer olarak polialfaolefin (AP, bitüm kütlesinin %6'sı), selüloz fiber (SE, mineral agrega kütlesinin %0,4'ü kadar direk karıştırma plentine), poliolefin (PE, bitüm kütlesinin %0,4-1 arasında, karışıma toplam agrega kütlesinin %0,6'sı kadar), bitümlü selüloz fiber karışımı (BE, toplam karışım kütlesinin %0,6 'sı kadar direkt karıştırma plentine) ve stiren bütadien stiren kopolimeri (SBS, bitüm kütlesinin %5'i kadar) kullanmışlardır. Karışım için Çorlu yöresinden temin ettikleri kaba agrega (bazalt), Gebze yöresinden temin ettikleri filler agrega (kalkerli) kullanılmıştır. Farklı yükleme ve sıcaklıklar için indirekt gerilme, sünme ve LCPC kırılma testi modifiye bitümlere uygulanmış, kırılma ve sünme test sonuçlarında SBS karışımları için en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Karışımların Marshall stabilitelerini AP hariç genellikle yüksek bulmuşlardır [71].

Yine polimer katkıların bitümün reolojisi üzerine etkilerini inceleyen başka araştırmacılar, çalışmalarında EVA, EVA/LDPE karışımı, lastik kırıntısı ve ABS olmak üzere dört farklı polimer kullanmıştır. Modifiye bitümlerin karakteristiklerini geliştirmek amacıyla optik misroskop, modile kalorimetri ve farklı reolojik testler yapmışlardır. Geniş sıcaklık aralığında en iyi sonuçlar lastik kırıntılı modifiye bitümlerde elde ettilmiştir. Ancak elastomer katkılı bitümlerin, yüksek esneklik ve trafik yüklerine dafa fazla direnç gösterdikleri ve EVA ve LDPE nin yüksek servis sıcaklıklarındaki sonuçların umut verici olduğu yayınlanmıştır [72].

Yaşlanma prosesinin etkilerini anlayabilmek için tipik çevresel şartlar altında bitümlü bağlayıcıların ve kaldırımların muhtemel yaşlanmalarını optimize edildiği çalışmada performans özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada bitümün reolojik özelliklerini belirlemede bükülme reometresi (HFTR) kullanılmıştır. Otoyol köprülerinde çevresel etkilerle birbirini takip eden yıllarda ortaya çıkan uzun dönemli asfaltik yaşlanma araştırılmıştır. Stiren bütadien stiren içeren polimer modifiye bitümlerin kesme modülü ölçülmüş ve bağlayıcının sıcaklığına olan duyarlılığını yükselttiğini ve daha sert bir materyal geliştiği belirtilmiştir [73].

Airey çalışmasında, etilen vinil asetat (EVA) kopolimer modifiye bitümlerin morfolojik, termal ve reolojik özelliklerini incelemiş, polimer konsantrasyonuna, polimer-bitüm uyumuna ve bitüm kalınlığına bağlı olarak düşük yüklemelerde ve yüksek servis sıcaklıklarında bitümün elastikiyetini ve sertlik özelliğini EVA'nın artırdığını belirtmiştir [74]. Başka bir çalışmada ise EVA kopolimer katkılı modifiye bitümlerin morfolojik, termal ve önemli reolojik karakteristiklerini incelemiş, üç tür bitüm (orta batı, Venezuela ve Rusya) üzerinde çalışmış ve sırasıyla floresan mikroskop, fark taramalı kalorimetri (DSC) ve dinamik kesme reometresi kullanmıştır. %3, 5 ve 7 polimer konsantrasyonunda 170-185 °C'da polimer modifiye karışımlar hazırlamıştır. Metler DSC 30 cihazı ile 0-120 °C arasında 5 °C/min ısıtma hızında termal özellikler belirlenmeye çalışmış, ısıtma modunda endotermik erime pikleri ile soğutma modunda ekzotermik reaksiyonlar kristalizasyon pikleri ile ilişkilendirmiştir. Araştırma sonuçlarında modifiye bitümlerin termal özellikleri katkısız bitümden daha iyi sonuçlar vermiş, düşük yükleme frekanslarında ve yüksek servis sıcaklıklarında EVA modifiye bitümleri elastikiyeti ve rijitliğini artırdığı tespit edilmiştir [75]. Yine aynı araştırmacı, modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş bitümlü bağlayıcıların çeşitli reolojik özellikleri ve lineerlik limitlerinin inceleme, dinamik kesme reometresi (DSR) ve döner tip ince film ısıtma (RTFO) yaşlanması kullanmış ve sürekli ve boşluklu gradasyona sahip asfalt karışımlarının lineer özelliklerini belirlemeye çalışmıştır. Çalışmada 50 pen bitüm, orta polimer içerikli radyal SBS, yüksek polimer içerikli lineer SBS, orta polimer içerikli EVA kullanmıştır. RTFOT ile yaşlandırılmış modifiye edilmiş ve edilmemiş bağlayıcıların yaşlanma sonrası benzer reolojik karakter gösterdiğini belirtmiştir [76].

Polimer modifiye bitüm proseslerinde yapı ve kimyasal değişikliklere dikkat çekilmesi gerektiği düşüncesiyle A. Perez-Lepe ve arkadaşları, polimer modifiye bitümlerin reolojik özelliklerine proses etkilerini incelemişlerdir. 60/70 pen ve 150/200 pen sınıfı bitüme Kraton D-1101, HDPE 6006-L, LDPE 302R ve EPDM EGP 8454 katkıları kullanarak %5 polimer içerikli modifiye bitümler hazırlamışlardır. Laboratuvar karışımlarını 180 °C'da 1200 rpm karıştırma hızında RW20 cihazı ile ve açık/kapalı kaplı dönmeli SD41 Super-Dispax mikser ile 8200

rpm hızında, 180 °C 'da hazırlamışlardır. Akış ölçümlerini ise germe kontrollü ARES reometre ve kuvvet kontrollü RS150 reometre ile ölçmüşlerdir. Her iki reometre deneysel sonuçları uygunluk göstermiştir. Karıştırma plenti boyunca oluşan yaşlanmayı ise Döner İnce Film Isıtma Testi ile belirlemeye çalışmışlardır. Yüksek enerjili karıştırma proseslerinin stabilizite ve dispers polimer dağılımı için gerekli olduğunu belirtmişlerdir [77].

İki tür SBS (Kraton D-1101 ve Kraton D-1184) katkılı modifiye bitümlerin yaşlanma özelliklerinin Dinamik Mekanik Analiz (DMA), Jel Sızma Kromatografisi (GPC) ve Fourier Transform InfraRed Spektroskopisi (FTIR) ile incelendiği çalışmada, bağlayıcılar İnce Film Isıtma Testi ve Döner İnce Film Isıtma Testi ile yaşlandırılmıştır. Yaşlandırılmış bağlayıcının reolojik özelliklerindeki değişikliklerin bitüm kaynağına, polimer türüne ve konsantrasyonuna, bitüm oksidasyonuna ve polimer bozunmasına bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Yaşlanma sonucu karbonil gurubu ve sülfoksitlerde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Yaşlandırılmış modifiye bitümler (%3 polimer konsantrasyonundaki) yaşlandırılmış katkısız bitüme göre daha iyi reolojik özellikler gösterdiği, ancak yüksek polimer konsantrasyonundaki modifiye bitümlerde araştırmaların sürdürülmesi gerektiği ifade edilmektedir [78].

100 pen bitüme 180 °C'da beş farklı poliyefini dört farklı oranlarda (10, 20, 30 ve 40 pph) karıştırarak elde edilen karışımları floresan mikroskop, DSC ve DMTA da geniş sıcaklık aralığında inceleyen A. H. Fawcett ve T. McNally, ataktik polipropilen karışımları hariç polimerlerin bitümün düşük ve yüksek sıcaklıklarda rijitliğini oldukça geliştirmişlerdir. Polimerlerin genlik katsayısının genellikle düştüğü erime noktası civarında bir kristalizasyonun olduğu ve karışımda kristalizasyonun başladığı sıcaklık ile Arrhenius aktivasyon enerjisinin 1300 den 160 kJ mol⁻¹'e düştüğünü belirtmişlerdir. Her bir polimerin camsı geçiş, erime sıcaklıkları hesaplanmış ve modifiye bitümlerin ki ile karşılaştırılmış ve camsı geçiş sıcaklıklarının polimer miktarı arttıkça arttığı tespit edilmiştir [79].

Geri kazanılmış polimer modifiye bitümlerin geniş sıcaklık aralığında viskoz özelliklerini incelendiği çalışmada iki farklı penetrasyon derecesinde (60/70 ve 150/200) bitüm ile çalışılmıştır. Geri kazanılmış EVA kopolimerini kütlece %0-9 oranlarında açık sistemde ve 4 pervaneli karıştırıcı yardımıyla bitümü modifiye etmişlerdir. Deneysel sonuçlar, yüksek sıcaklıklarda geri kazanılmış EVA kopolimeri miktarının artışı ile bitümün penetrasyon derecesinin arttığı ve polimerce zengin fazların gelişimi ile ilişkili olarak mikro yapının önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Çevresel ve ekonomik olarak geri kazanılmış EVA'nın polimer modifiye bitümlerde kullanılabileceğinin uygun olduğu belirtilmiştir [80].

Masson ve arkadaşları, modüle fark taramalı kalorimetre (MDSC) ile bitümün termal analizini çalışmışlar, bitümün geri dönüşümlü termal eğrileri ile iki camsı geçiş sıcaklığının ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Birincisinin maltenlerin tayin ettiği, -20 °C ve diğerinin asfaltların tayin ettiği 70 °C olduğu tespit edilmiş ve bu geçişlerdeki ısı kapasitesinin bitümün termal geçmişine bağlı olduğu belirtilmiştir. Bitümün mikro yapısındaki gelişmenin ve entalpi ve entropi hesaplamalarında kristalin yapının, geniş mezofaz (orta faz) ve amorf faz yapısı gibi bitümün çoklu faz sisteminin ortaya çıkardığı ileri sürülmüştür [81]. Yine aynı araştırmacı ve arkadaşları tarafından, stiren-bütadien-stiren blok kopolimer modifiye bitüm karışımları modüle fark taramalı kalorimetre ile incelenmiş, bitümün 4 T_g (malten fazı, malten-asfalt arayüzey bölgesi, resin kompozisyonu ve arafazı), SBS'nin ise 2 T_g (polibütadien kesimleri, poli-stiren kesimleri) gösterdiği belirtilmiştir. Karışım kompozisyonunda ise yeni bir T_g ortaya çıktığını tespit etmişlerdir. Ölçümlerde eğrilere ilişkin türev ile T_g hesaplaması yapılmış ve bitümdeki farklı amorf fazlardan farklı T_g değerleri ortaya çıkmıştır. Amorf fazlar içindeki moleküler yapı, aromatiklik, polarite, sertlik ile T_g değerinin genellikle yükseldiği belirtilmiştir [82].

Stiren-bütadien-stiren modifiye asfalt çimentolarına fark taramalı kalorimetre, termogravimetrik analiz ve yumuşama noktası, penetrasyon ve elastik geri dönme gibi deneysel testlerin uygulandığı çalışmada, ısıtma eğrileri ile camsı geçiş ve parafinlerin bozunma ölçümleri belirlenmiş, penetrasyonun polimer konsantrasyonu

ile arttığı, modifiye asfaltın yumuşama noktasının daha yüksek olduğu ve polimerin bitümün elastik özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir [83].

Yine stiren-bütadien-stiren (SBS) modifiye bitümlerin düşük sıcaklık kırılma dirençlerini inceleyen başka bir çalışmada, modüle fark taramalı kalorimetre (MDSC) ile alkanların ve alkil aromatiklerinin kristalizasyon düzenleri araştırılmıştır. Kütlece % 3, 6 ve 10 oranlarında SBS bitüme karıştırılmış ve SBS'nin bitümün T_g değerini düşürdüğü ve düşük sıcaklık özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir [84].

Parçalanmış ve toz haline getirilmiş araç lastiği modifiye bitüm ve stiren-bütadien-stiren triblok kopolimeri [Kraton D-1101Cs] ile modifiye edilmiş bitümün viskoelastik özelliklerini inceleyen Navarro ve arkadaşları, lastik modifiye bitümün katkısız bitümün viskoelastik özelliklerini geliştirdiğini ve modifiye bitümün viskozitesinin modifiye edilmemiş bitümden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. -10 °C gibi düşük sıcaklıklarda lineer viskoelastik özelliğinin belirgin derecede azaldığını, yüksek sıcaklıklarda ise belirgin derecede arttığını belirtmişlerdir. Toz araç lastiği modifiye bitümün deformasyon direncinin ve düşük sıcaklık çatlamalarının kabul edilebilir olduğunu ifade etmişlerdir. Kütlece % 9 lastik modifiye bitüm ile kütlece %3 SBS modifiye bitümün -10 °C'da ve kütlece %7 SBS modifiye bitümün 75 °C'da benzer lineer viskoelastik özellik gösterdiğini bulmuşlardır [85].

Lastik ile modifiye edilmiş bitümlü asfalt betonunun yorulma davranışının laboratuvar özelliklerini inceleyen başka bir çalışmada da parçalanmış otomobil lastiği ile modifiye edilmiş bitümün ve farklı bağlayıcı oranlarının etkisini araştırılmıştır. Sonuçta otomobil lastiği ile modifikasyonun asfalt betonunun yorulma süresini önemli ölçüde artırdığını, %5 oranında küçük bir katkının 50 penetrasyon bitümünün yorulma süresini 2 kat arttırdığı, 100 penetrasyon bitümünün yorulma süresini ise 25 kat artırdığı gözlenmiştir. Diğer taraftan her iki bitümde de deney sıcaklığında (5 °C) yaklaşık aynı sağlamlık modülünün (200 MPa) olduğu belirtilmiştir [86].

Katkısız ve SBS (Kraton D1192) katkılı modifiye bitümler ile hazırlanmış asfalt beton numunelerin rijitliğinin araştırıldığı çalışmada, %5,44 bitüm ve bitümde %5 SBS katkılı bitümden %4,95 oranlarında bağlayıcı içeren karışım Marshall Yöntemi ile ve %4,75 bitüm ve bitümde SBS bulunan bağlayıcıdan %4,45 oranında içeren karışım Superpave Yöntemi ile hazırlanmış ve rijitlikleri ölçülmüştür. Sonuçta rijitlik modülü deneylerinde hem katkısız hem de katkılıda Superpave numunelerinin Marshall numunelerine göre daha düşük değerler verdiği, Marshall numunelerinde katkılı olanların yaklaşık 2 kat daha fazla rijit olduğu, dolayısıyla sıcak iklimli yerlerde yapılan kaplamalar için tekerlek izi oluşması ve ondülasyona karşı katkılı Marshall kullanılmasının uygun olabileceği belirtilmiştir [87].

9.2. Çalışmanın Amacı

Dünya da birbirinden farklı pek çok ham petrol elde edilmektedir. Bunlardan elde edilen ürünün kalite ve verimi göz önüne alındığında bunların çok azı bitüm üretimi için uygun bulunmuştur. Bu nedenle de tarımdan endüstriye pek çok kullanım alanı bulunan bitümün modifiye edilmesine karşı duyulan ilgi her geçen gün artmaktadır.

Bu çalışmada, termoset polimerlerden epoksi reçinesi ve fenolformaldehit ile termoplastik polimerlerden ticari adıyla teflon olarak bilinen politetrafloretillen (PTFE) bütümü modifiye için kullanılan polimer grubu katkılar olup, bu katkıların bitümün reolojisindeki etkileri incelenecektir. Ayrıca, sentezlenen magnezyum abietat bileşiği katkı maddesi olarak kullanılmak suretiyle modifiye bitümün reolojik özellikleri ve performans etkileri araştırılacaktır.

Simetrik ve homojen moleküler yapıya sahip teflon büyük ölçüde kristalleştirilir. Kimyasal ve ısı dirençleri mükemmel olan PTFE'in erime noktası 288 °C civarındadır [88,89]. Yapı alanında köprü mesnetlerinde ve katı madde taşıyan boruların iç kısımlarının kaplanması kullanılmaktadır. Teflon, yüksek bir dielektrik mukavemete, düşük yayılma faktörüne ve çok yüksek yüzey direncine sahiptir. Teflon, normalde kimyasallardan etkilenmemektedir. Teflon, fiziksel özelliklerinde değişim meydana gelmeksizin geniş sıcaklık aralığında

kullanılabilmektedir [90]. Teflon, kimyasal etkilere karşı ve yüksek sıcaklığa çok dayanıklıdır. Florakarbon reçinelerinin düşük ve yüksek sıcaklıklardaki dirençleri, esasen yok denecek nem absorpsiyonu, mükemmel dielektrik özellikleri, yanmazlığı ve oksidasyon direnci gibi özelliklerinin olması nedeniyle katkı maddesi olarak PTFE çalışılması düşünülmüştür.

Epoksiler, mukavemeti ve sertliği yüksek, dış kimyasal etkilere dayanıklı ve boyutları karardır. Koruyucu ve dekoratif işlerinde kullanılır. Diğer malzemelere kolaylıkla yapışır, bu nedenle geniş ölçüde kullanılırlar. Epoksi reçineleri yapılar da yapıştırma işlerinde, çatlakların kapatılmasında, yüzeylerin dış etkilere karşı korunmasında kullanılır. Epoksilerin üstün karışma özellikleri ise pek çok uygulama alanı yaratmaktadır. Kimyasallardan etkilenmemeleri, ısı dirençleri, iyi adezyon özellikleri, elektriksel dirençleri [88,89] gibi özelliklerinden dolayı modifiye bitüm eldesinde katkı maddesi olarak kullanılması amaçlanmıştır. Ayrıca, epoksi reçineye uçucu kül ve hurda araç lastiği kırpıntısı ilavelerinin camsı geçiş sıcaklığına etkisinin araştırılarak, camsı geçiş sıcaklığını değiştirmesi halinde belirlenen epoksi karışım ile modifiye bitüm hazırlanması düşünülmüştür.

Fenolik reçinelerden ise en önemli endüstriyel plastiklerden sayılan bakalit, ilk geliştirilen fenolik polimerlerdir. Mukavemeti ve sertliği yüksek, sıcaklığa ve kimyasal etkilere dayanıklı kolay uygulanan ve oldukça ucuz bir plastik türüdür. Elektrik ve oto endüstrisinde çeşitli parçaların üretiminde, kaplama ve yapıştırma işlerinde kullanılmaktadır. Fenolik gurubu polimerlerden fenolformaldahit de yine bitümü modifiye için kullanılması ve bitümün reolojisindeki etkileri incelenmesi amaçlanmıştır.

Yine Mg gibi metalik içerikli bileşiklerin reçine asitleri ile reaksiyona sokulmasından sentezlenebilecek abietat bileşiğinin bitüme ilavesiyle kaplamalarda yaşanan soyulma problemlerine çözüm getirilmeye çalışılacaktır. Mg abietat bileşiğinin yüzey gerilimini azaltarak adezyonu artırıcı etki göstermesi beklenmektedir.

Viskozite, bitümün belli bir sıcaklıkta (veya sıcaklık aralığında) davranış biçimini belirlemesinden ötürü bu malzemenin temel özelliğini oluşturmaktadır. Viskozite testleri davranış değişikliklerini görebilmek ve bitümün kullanım sıcaklık aralığının ne şekilde etkilendiğinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Ayrıca, katkıların bitümün penetrasyon ve yumuşama noktasını ne şekilde etkilediği araştırılmıştır. Katkı maddeleri ile bitümün camsı geçiş sıcaklığındaki değişiklikler ise reolojik özelliklere ışık tutacaktır.

Agreganın bitüm ile kaplanması agrega-bitüm arasındaki yüzey gerilimine de bağlı olduğundan, yüzey gerilimi düşürülüp bitümün agregayı ıslatması sağlanabilmektedir. Bu nedenle de katkıların bitümün yüzey enerjisine etkileri araştırılmış ve soyulma deneyi yapılmıştır.

Diğer taraftan RTFOT ve PAV deneyleri, bitümün rafineriden çıkışından kaplama malzemesi olarak kullanımına kadar geçen sürede oksidasyonu ve hizmet şartlarındaki performans özelliklerini yansıtabilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Asfalt çubuk eğilme deneyi, düşük servis sıcaklıklarında oluşabilecek termal çatlakların derecesi hakkında fikir edinmek amacıyla yapılmıştır. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi ise orjinal ve modifiye bitümlerin hem viskoz hem de elastik davranışını belirlemek üzere kullanılmıştır.

Son olarak ise katkıların bitümün stabilitesini ne şekilde etkilediğini belirleyebilmek için Marshall stabilite deneyi yapılmıştır.

10. MATERYAL VE METOT

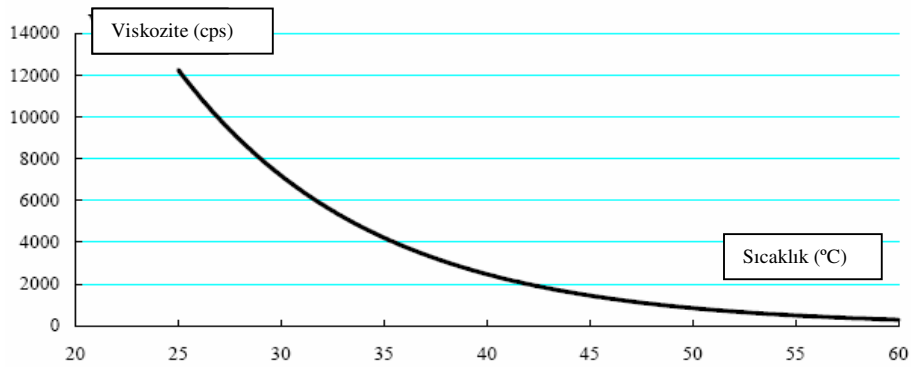
10.1. Malzeme ve Cihazlar

Çalışmada TS 1081 EN 12591 standardına göre Karayolları Genel Müdürlüğü'nün yol ağındaki bitümlü sıcak kaplamalarda en çok kullanılan 50/70 sınıfı Aliğa Rafinerisi bitümü kullanılmıştır.

Ticari olarak üretilen NAN YA EPOKSI RESIN grubu NPEL-128 kodlu ürün bitümü modifiye için kullanılmıştır. NPEL-128 sıvı resin olup, bisfenol-A ve epiklorhidrinden üretilmiştir. Çizelge 10.1'de NPEL-128 in özellikleri ve Şekil 10.1'de ise sıcaklıkla viskozite değişimi verilmiştir.

Çizelge 10.1. Epoksi reçinenin özellikleri

Fiziksel Durum	Sıvı
Epoksi Eşdeğer Ağırlığı (g/eşdeğergram)	184-190
Viskozite (cps/25 °C)	12 000-15 000
Renk (Gardner), en çok	1
Parlama Noktası (°C), en az	150
Hidrolizlenebilir klor (ppm), en az	1 000
Yoğunluk (25 °C)	1,16



Şekil 10.1. Epoksi reçinenin sıcaklık ile viskozite değişimi

Ticari olarak üretilen ve Presi SA'dan satın alınan fenolik reçine grubu fenolformaldehit bitümü modifiye için kullanılmıştır. Kahverengi fenolik reçine

hekzametilen tetramin ve fenol'den üretilmiştir. Çizelge 10.2'de fenolik reçinenin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 10.2. Fenolik reçinenin özellikleri

Fiziksel Durum	Katı, granur
Parçalanma Sıcaklığı (°C)	> 130 °C
Tehlikeli Parçalanma Ürünleri	Formaldehit, Amonyak, Fenol
Sabit Görünen Yoğunluk (20 °C)	450-800 kg/m ³
Patlama Tehlikesi	Hava ile karışımında toz hali patlayabilir
Renk	Kahverengi
Koku	Hemen hemen kokusuz

Ticari olarak üretilen ve Across Organics'den satın alınan politetrafloretillen (PTFE) bitümü modifiye için kullanılmıştır. Çizelge 10.3'de PTFE'nin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 10.3. PTFE'nin özellikleri

Fiziksel Durum	Katı, toz
Erime Noktası	327 °C
Kaynama Noktası	400 °C
Yoğunluk	2
nD20	1,35
Renk	Beyaz
Güvenlik	Ten ve göz temasından sakınılmalı

Diğer bir katkı maddesi olarak da bitümü modifiyede kullanılacak Mg abietat bileşiği sentezlenmiştir (Bkz. EK-1). Mg abietat bileşiği için MgO reaktifi kullanılmıştır. Bileşik için %99,5 saflıkta MgO, tabii reçine (kolofon), yağ (spindle oil) ve etanol kullanılmıştır.

Deneylerde agrega malzemesi olarak Alacaatlı ocağından temin edilen agrega kullanılmıştır. Alacaatlı ocağından temin edilen agregaya ait kimyasal bilgiler Çizelge 10.4'de verilmektedir.

Çizelge 10.4. Alacaatlı agregasının kimyasal özellikleri

pH	8,80
Silisyum dioksit, SiO ₂ , %	2,60
R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	0,15
Demir oksit, Fe ₂ O ₃	0,00
Kükürt trioksit, SO ₃	0,04
Alüminyum oksit, Al ₂ O ₃	0,15
Kalsiyum oksit, CaO	50,95
Magnezyum oksit, MgO	5,00

Modifiye bitümlerin eldesinde, sıcaklığı ayarlanabilen yağ banyosundan ve dört pervaneli ve karıştırma hızı ayarlanabilen mikserden oluşan açık reaktör kullanılmıştır.

Viskozite testlerinde Brookfield DV-III Rheometer, penetrasyon deneyinde Krebs Elec & MFG.CO, yumuşama noktası deneyinde Sur Berlin RKA2, camı geniş sıcaklıklarının tespitinde Perkin Elmer DSC, yüzey enerjilerinin hesaplanmasında Krüss DSA 100, basınçlı oksidasyon kabı deneyinde ATS Applied Test Systems-Inc. Butler PAV, döner ince film ısıtma deneyinde James Cox.& Sons Inc. CS 325-A, asfalt çubuk eğilme deneyinde Cannon Instrument Company Thermoelectric BBR, dinamik kesme deneyinde Bohlin Instrument CVO 100 ADS DSR Rheometer marka cihazlar ve ELE Marshall satabilite test cihazı kullanılmıştır.

Mg abietat bileşiği elde etmek için ise sıcaklığı ve karıştırma hızı ayarlanabilen magnetik karıştırıcı, termostatl ve elektrik ile ısıtılan mantolu ısıtıcıdan yararlanılmıştır.

10.2. Metot

Bitümün reolojik özellikleri üzerine polimer katkı maddelerinin ve Mg abietat bileşiğinin etkisini incelenmek amacıyla yapılacak deneyleri 7 ana gruba ayırabiliriz.

1. Epoksi reçine, fenolformaldehit reçine, PTFE ve Mg abietat bileşiği modifiye bitümlerin hazırlanması
2. Orjinal ve epoksi reçine, fenolformaldehit reçine, PTFE ve Mg abietat bileşiği modifiye bitümlerin viskozite, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri
3. Orjinal ve modifiye bitümlerin camsı geçiş sıcaklıklarının tespiti, epoksi reçineye uçucu kül ve hurda araç lastiği kırpıntısı ilavesiyle elde edilecek polimerin camsı geçiş sıcaklığının tespiti
4. Orjinal ve modifiye bitümlerin yüzey enerjilerinin tespiti
5. Orjinal ve modifiye bitüm üzerine uygulanan Nicholson soyulma deneyi
6. Orjinal ve modifiye bitüm üzerine uygulanan yüksek performanslı asfalt kaplama (SUPERPAVE) bağlayıcı deneyleri
7. Orjinal ve modifiye bitüm üzerine uygulanan Marshall stabilite deneyi

Bu katkı maddelerinin bitümün reolojisi üzerine etkileri ise viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, DSR, DSC, RTFOT, PAV, BBR ve yüzey enerjisi deneyi ile belirlenmiştir. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümün agrega ile karıştırılarak oluşturulan sıkıştırılmamış karışımlara Nicholson soyulma deneyi uygulanarak adezyon performansları incelenmiştir. Ayrıca, orjinal ve modifiye edilmiş bitümler ile Marshall yöntemiyle hazırlanan karışımların stabiliteleri belirlenmiştir.

10.2.1. Modifiye bitümlerin hazırlanması

Epoksi reçine ile modifiye bitümler hazırlamak için bitüm karıştırma sıcaklığına belli bir süre etüvde ısıtıldıktan sonra yağ banyosuna alınmış ve epoksi reçine ilave edilerek hemen karıştırmaya başlanılmıştır. Kütlece %1, 2, 3, 4, 5 ve 6 oranlarında epoksi reçine belirli sürelerle bitüme ilave edilerek modifiye bitümler elde edilmiştir (Bkz. EK-2).

Fenolformaldehit reçine ile modifiye bitümler hazırlamak için bitüm karıştırma sıcaklığına belli bir süre etüvde ısıtıldıktan sonra yağ banyosuna alınmış ve fenolformaldehit reçine ilave edilerek hemen karıştırmaya başlanılmıştır. Kütlece

%1, 2, 3 ve 4 oranlarında fenolformaldehit reçine belirli sürelerle bitüme ilave edilerek modifiye bitümler elde edilmiştir (Bkz. EK-3).

PTFE ile modifiye bitümler hazırlamak için bitüm karıştırma sıcaklığına belli bir süre etüvde ısıtıldıktan sonra yağ banyosuna alınmış ve PTFE ilave edilerek hemen karıştırmaya başlanılmıştır. Kütlece %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında PTFE belirli sürelerle bitüme ilave edilerek modifiye bitümler elde edilmiştir (Bkz. EK-4).

Sentezlenen Mg abietat bileşiği ile modifiye bitüm hazırlamak için bitüm karıştırma sıcaklığına belli bir süre etüvde ısıtıldıktan sonra yağ banyosuna alınmış ve kütlece %0,1 oranında Mg abietat bileşiği bitüme ilave edilerek hemen karıştırmaya başlanılmıştır (Bkz. EK-1).

10.2.2. Orjinal ve modifiye bitümlerin viskozite, penetrasyon ve yumuşama noktası testleri

Viskozite testleri ASTM D 4402-87 standardına (Standard Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus)’a göre gerçekleştirilmiştir. Orjinal ve modifiye bitüm numuneleri etüvde 150 °C’a kadar ısıtıldıktan sonra sırayla cihazın Thermosel kabına yerleştirildi. Ölçüm yapılacak her bir sıcaklıkta sabitlenme yapıldıktan sonra ölçümler gerçekleştirilmiştir (Bkz. EK-5).

Viskozite ölçümlerinden elde edilen optimum viskozite değerlerine sahip modifiye bitümlere ve orjinal bitüme penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır (Bkz. EK-6, EK-7) ve katkıların bitümün penetrasyonuna ve yumuşama noktasına etkileri incelenmiştir.

10.2.3. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin camsı geçiş sıcaklıklarının tespiti

Katkıların bitümün camsı geçiş sıcaklığını ve epoksi reçineye ilave edilecek dolgu maddelerinin epoksi reçinenin camsı geçiş sıcaklığını ne şekilde etkilediğini görmek

amacıyla DSC (Fark Taramalı Kalorimetre) cihazında orjinal ve optimum viskozite değerlerinin elde edildiği örneklerin camsı geçiş sıcaklıkları ölçülmüştür.

Ölçümler 50 °C/min ısıtma hızında ve cihazın içinden azot gazı geçirilerek gerçekleştirilmiştir (Bkz. EK-8).

10.2.4. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjilerinin tespiti

Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjileri DSA 100 cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler sessile drops tekniği ile temas açıları hesaplanarak asit baz teorisine göre her bir ölçüm kayıt altına alınarak, cihazın mevcut programı ile yüzey serbest enerjileri belirlenmiştir (Bkz. EK-9).

Ölçümlerde üç adet polar sıvı ve bir apolar sıvı referans olarak kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla su, formamit, etilen glikol ve diiyodometandır.

10.2.5. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson soyulma deneyi

Viskozite test sonuçlarından elde edilen optimum viskozite değerlerini veren modifiye bitümlerin ve orjinal bitümün soyulmaya karşı mukavemetlerini tespit etmek amacıyla Nicholson soyulma deneyleri yapılmıştır (Bkz. EK-10).

Deney sonunda soyulmamış agreganın toplam agrega yüzeyine oranı olan soyulmaya karşı mukavemet değerleri tespit edilmiştir. Modifiye bitümlerden elde edilen sonuçlar orjinal bitümün sonuçları ile karşılaştırılmış ve grafiğe geçirilmiştir.

10.2.6. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin SUPERPAVE deneyleri

Superpave deneyleri bitümlü bağlayıcının arazi şartlarındaki performansı ile ilgili fiziksel özelliklerini ölçtüğünden, karışımın hazırlanması ve serilmesi sırasındaki bitümü temsil eden döner ince film ısıtma deneyi ve bağlayıcının uzun bir süre

sonunda yaşlanmasını yansıtan basınçlı oksidasyon kabı deneyi yapılmıştır. Çizelge 10.5’de uygulanan deneyler ve kullanılan bitüm verilmiştir.

Çizelge 10.5. Orjinal ve modifiye bitümlere uygulanan SUPERPAVE deneyleri

Deney Adı	Kullanılan Bitüm
Dinamik Kesme Deneyi (DSR)	Orjinal ve modifiye bitüm
	RTFO testi uygulanmış orjinal ve modifiye bitüm
	PAV testi uygulanmış orjinal ve modifiye bitüm
Dönel Viskozimetre (RV)	Orjinal ve modifiye bitüm
Asfalt Çubuk Eğilme Deneyi (BBR)	PAV testi uygulanmış orjinal ve modifiye bitüm

Orjinal ve modifiye bitümlere uygulanan SUPERPAVE deneylerinin yapılışı EK-11’de verilmiştir.

10.2.7. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilitesi deneyleri

Bu metot bitümlü karışımların laboratuvar karışım tasarımında kullanılmakta olup, Marshall aleti kullanılarak, bitümlü karışımlardan hazırlanan silindirik biriketlenin yanal yüzeylerine yükleme yaparak plastik akmaya karşı direncin ölçümünü kapsamaktadır.

Orjinal ve optimum modifiye bitüm örneklerinin her biri için ağırlıkça %3; 3,5; 4; 4,5 ve 5 bitüm içeren Marshall numuneleri hazırlanmış ve teste tabi tutulmuştur (Bkz. EK-12).

Maksimum yük değeri stabilite değeri olarak alınmış ve gerekirse düzeltme faktörü uygulanmıştır. Maksimum yük altındaki deformasyon değeri ise plastik akma olarak kaydedilmiştir.

11. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

11.1. Katkı Maddelerinin Bitümün Viskozitesine Etkisi

Katkı maddesinin cinsi ve dozlama miktarının bitümün viskozitesine etkisini sıcaklığa bağlı olarak incelemek üzere katkısız ve katkılı bitümün viskoziteleri ölçülmüş, elde edilen sonuçlar değerlendirilerek modifiye bitümün kullanılabileceği yerler, optimum dozlama miktarları ve optimum şartlar tespit edilmeye çalışılmıştır. Kaydedilen sonuçlar alt başlıklar halinde aşağıda verilmektedir.

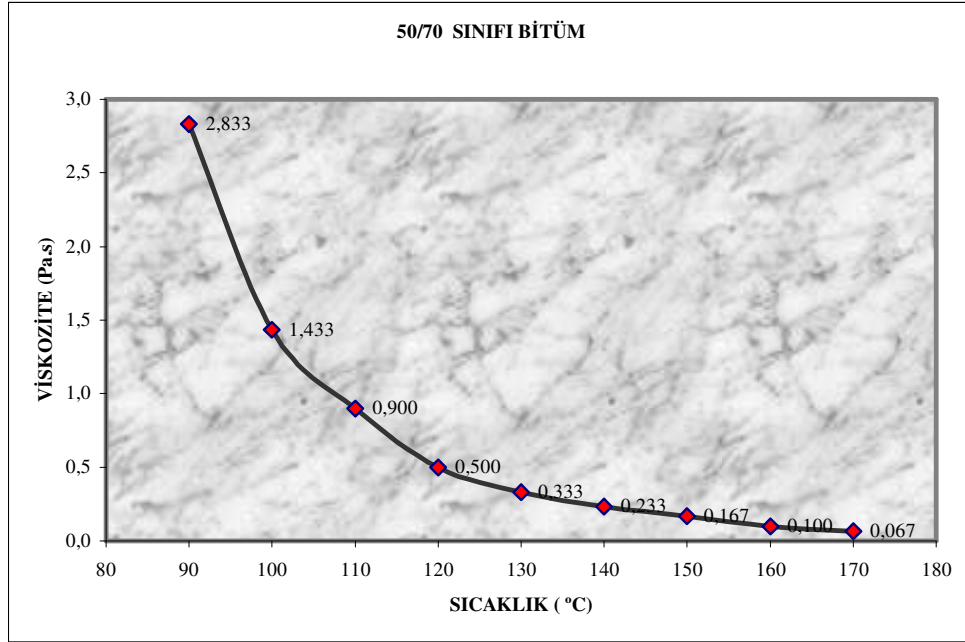
11.1.1. Orjinal bitümün viskozite test sonuçları

Viskozite testleri, davranış değişikliklerini görebilmek için 90 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C, 150 °C, 160 °C ve 170 °C sıcaklıklarda yapıldı. Her bir sıcaklıkta üç okuma yapılarak ortalaması alınmıştır. 50/70 sınıfı bitümün sıcaklıkla viskozite değişimi değerleri Çizelge 11.1’de, grafiği ise Şekil 11.1’de verilmiştir.

Çizelge 11. 1. 50/70 sınıfı bitümün viskozite değerleri

Viskozite, Pa.s (Brookfield) (ASTM D4402-87) (20 rpm)	Sıcaklık (°C)	Bitüm
	90	2,833
	100	1,433
	110	0,900
	120	0,500
	130	0,333
	140	0,233
	150	0,167
	160	0,100
	170	0,067

Verilerden görüleceği üzere 50/70 sınıfı bitümün sıcaklık artışıyla viskozitesi azalmış ve 170 °C dan sonra viskozitesi cihazın ölçemeyeceği kadar küçülmüştür. Yine bitüm soğudukça sertleştiğinden 90 °C ’a kadar viskozitesini ölçmek mümkün olmuştur.



Şekil 11.1. Orjinal bitümün viskozite eğrisi

Grafikten görüldüğü gibi bitümün viskozitesi sıcaklıkla üstel olarak değişmektedir. Yaklaşık olarak 120 °C'a kadar sıcaklık arttıkça viskozite hızla düşerken daha yüksek sıcaklıklarda sıcaklıkla viskozite düşüşü önemini kaybetmektedir.

11.1.2. Epoksi reçine modifiyeli bitümün viskozite test sonuçları

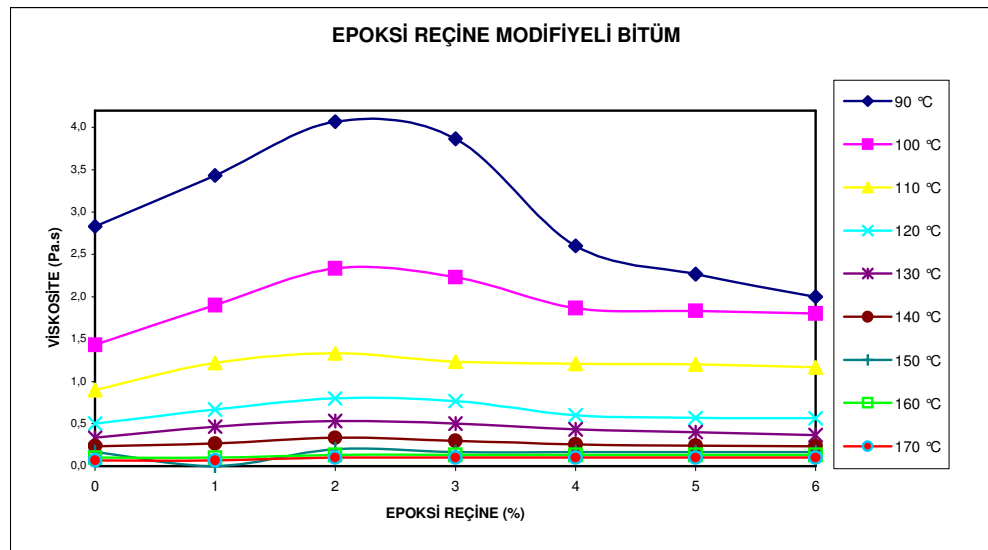
Epoksi reçine ile modifiye edilen bitüm numuneleri etüvde 150 °C'a kadar ısıtıldıktan sonra sırayla Brookfield Thermosel aparatına yerleştirildi. Ölçüm yapılacak her bir sıcaklıkta sabitlenme yapıldıktan sonra ölçümler gerçekleştirildi. Viskozite testleri, davranış değişikliklerini görebilmek için 90 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C, 150 °C, 160 °C ve 170 °C sıcaklıklarda yapıldı. Her bir sıcaklıkta üç okuma yapılarak ortalaması kaydedilmiştir.

50/70 sınıfı bitümün ağırlıkça %1, %2, %3, %4 , %5 ve %6 epoksi reçine ile modifiye edilmesinden elde edilen viskozite verileri Çizelge 11.2'de, bitümün katkı miktarına bağlı viskozite değişimi ise Şekil 11.2'de verilmiştir.

Çizelge 11.2. Epoksi reçine ile modifiye edilmiş bitümün viskozite değerleri

	Sıcaklık (°C)	Epoksi reçine						
		0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%
Viskozite, Pa.s (Brookfield) (ASTM D4402-87) (20 rpm)	90	2,833	3,433	4,067	3,867	2,600	2,267	2,000
	100	1,433	1,900	2,333	2,233	1,867	1,833	1,800
	110	0,900	1,220	1,333	1,233	1,207	1,200	1,167
	120	0,500	0,667	0,800	0,767	0,600	0,567	0,565
	130	0,333	0,467	0,533	0,500	0,433	0,400	0,367
	140	0,233	0,267	0,333	0,300	0,257	0,243	0,233
	150	0,167	0,167	0,200	0,167	0,167	0,167	0,167
	160	0,100	0,100	0,133	0,133	0,133	0,133	0,133
	170	0,067	0,067	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100

Verilerden görüleceği üzere yüksek sıcaklıklarda epoksi reçine katkı maddesi bitümün viskozitesinde çok küçük bir artış sağlamış ve katkı maddesinin miktarının artırılmasına nazaran değişiklik göstermemiştir. 140 °C ve altındaki sıcaklıklarda ise katkı maddesinin ilavesiyle bitümün viskozitesinde değişim % 2- % 3 gibi düşük miktardaki ilavelerle artışa, % 4- % 5- % 6 gibi ilaveler de azalışa geçmiştir.



Şekil 11.2. Epoksi reçine ile modifiye edilmiş bitümün katkı miktarına bağlı viskozite değişimi

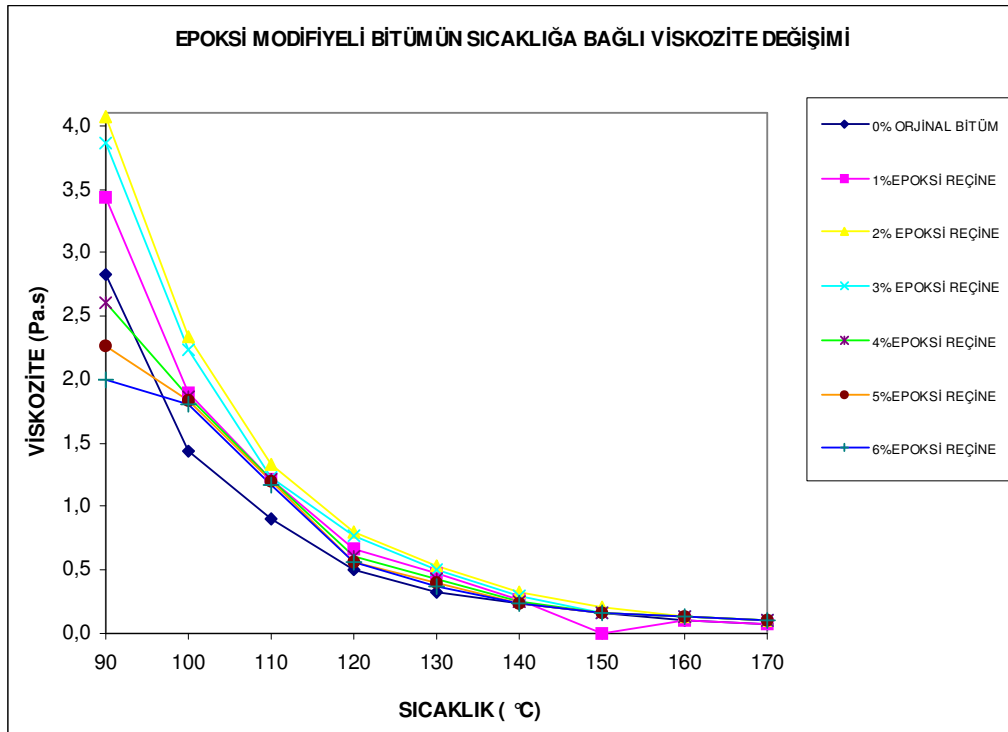
Katkı miktarına bağılı viskozite değişimini veren Şekil 11.2 incelendiğinde de yüksek sıcaklıklarda katkı miktarının artırılmasına nazaran orjinal bitümün viskozitesini pek etkilemediği, düşük sıcaklıklarda ise düşük katkı miktarlarının bitümün viskozitesinde belirgin bir artış sağladığı, yüksek katkı miktarlarının ise viskoziteyi giderek azaltma yönünde etki ettiği görülmektedir.

Bu durum, yüksek sıcaklıklarda bitümün işlenebilirliği açısından katkı maddesinin viskozitesini artırmayışı, düşük sıcaklıklarda ise katkı maddesinin artırılması ile viskozitesini azaltması olumlu bir etki olarak değerlendirilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda epoksi reçine ilavesi viskozite artışı yaratsaydı, modifiye bitümün işlenebilme güçlüğünü doğuracaktı.

Şöyle ki; karıştırma süresince sıcak bitüm kurutulmuş ve sıcak agregayı kolayca kaplayabilmelidir. Karıştırma sıcaklığının bitümün agregaya üzerinde hızla yayılmasını sağlayacak derecede yüksek olmasının yanında, bu işlemin mümkün olan en düşük sıcaklıkta ve minimum zamanda gerçekleştirilmesine önem gösterilmelidir. Karıştırma sıcaklığı arttıkça agregayı ince tabakalar halinde saran bitümün oksitlenmesi de artacaktır. Dolayısıyla yaşlanmada artacaktır. Zaten en fazla yaşlanmanın yüksek sıcaklıktaki işlemler sırasında meydana geldiği bilinen bir gerçektir. Genellikle karıştırma sıcaklığında optimum bitüm viskozitesinin 0,2 Pa.s olması istenir [2].

Yine bir tabaka karışım serildikten sonra, uygun ekipmanlar ile gereken düzeyde sıkıştırılabilmesi için yeterli derecede işlenebilir olmalıdır. Sıkıştırma sırasında bitüm viskozitesi 5 ile 30 Pa.s arasında olması istenir. 5 Pa.s değerinden düşük viskozitelerde malzeme genellikle sıkıştırılamayacak kadar oynak, 30 Pa.s değerinden yüksek viskozitelerde ise malzeme daha fazla sıkıştırılamayacak kadar sert olur. Karışımın boşaltılması ve serilmesi sırasındaki oluşacak sıcaklık kayıpları göz önüne alındığında bitüm viskozitesinin sıkıştırma için uygun düzeyde kaldığı sıcaklığın belirlenmesi önemlidir.

Bu açıdan bakıldığında epoksi reçinenin bitüme ilavesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını yükseltmediği ve dolayısıyla bitümün oksitlenmesini azaltabileceği değerlendirilmektedir. Hem katkı miktarı açısından ekonomik hem de en yüksek viskozite artışının tespit edildiği %2'lik epoksi reçine katkısı optimum katkı miktarı olarak uygun görülmüştür. Bununla birlikte %3'lük epoksi reçine ilavesinde yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. %2'lik ilavede ve 90 °C'da yaklaşık %44 viskozite artışı elde edilmiştir. Epoksi reçine ile modifiye edilmiş bitümün sıcaklık artışı ile viskozite değişimini gösteren grafik ise Şekil 11.3'de verilmektedir.



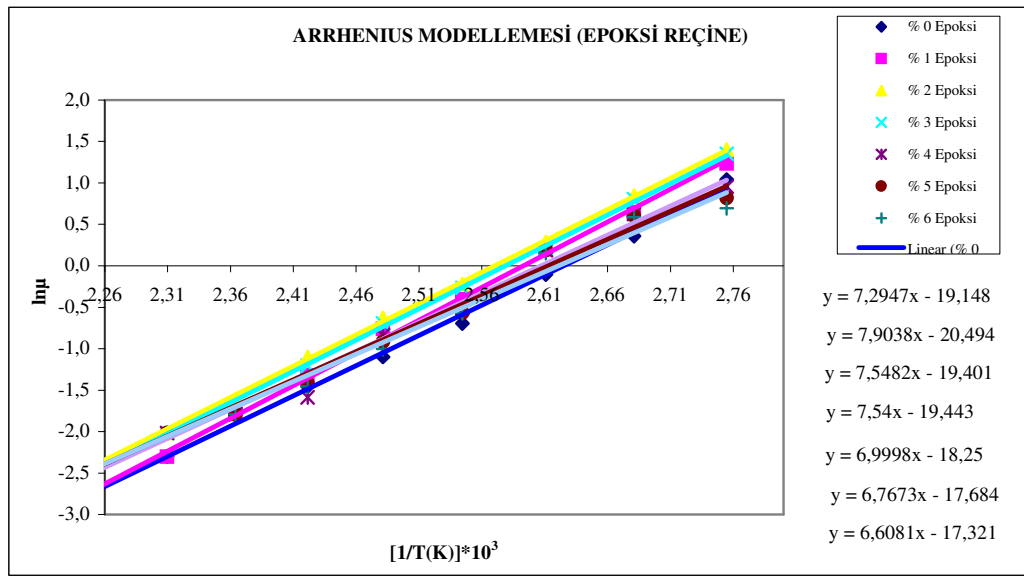
Şekil 11.3. Epoksi reçine ile modifiye edilmiş bitümün sıcaklık ile viskozite değişimi

Grafikte reçine miktarı arttıkça düşük sıcaklık bölgesinde, sıcaklık ile viskozite etkileşiminin daha fazla olduğu görülmektedir. Burada da Şekil 11.2'de olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda epoksi reçinenin bitümün viskozitesini pek etkilemediği, ancak düşük sıcaklıklarda epoksi reçine miktarının artışıyla bitümün viskozitesini düşürdüğü tespit edilmektedir. Dolayısıyla düşük sıcaklıklarda da bitümün işleme

güçlüğü olan alanlarda %5-6 gibi miktarlarda epoksi reçine katkısının kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

SBS katkısı ile literatürde yapılmış bir çalışmada ise viskozite değerinin polimer miktarı arttıkça arttığı ve bu artışın bütün sıcaklıklarda da (çalışma sıcaklık aralığı 130-170 °C) kaydedildiği belirtilmektedir [60].

Elde edilen verilerin Arrhenius denkleminde uygun olarak modellenmesi (Şekil 11.4) yapıldığında hesaplanan kayma değerleri ve aktivasyon enerjileri Çizelge 11.3’de verilmektedir.



Şekil 11.4. Epoksi reçine modifiye bitümün Arrhenius denklemini modellemesi

$$\mu = A \cdot e^{(-B/RT)} \quad (12.1)$$

$$\ln \mu = \ln A - \frac{B}{R} \frac{1}{T} \ln e \quad (12.2)$$

$$\ln \mu = \ln A - \frac{B}{R} \frac{1}{T} \quad (12.3)$$

Burada;

μ : Viskozite (Pa.s)

$\ln A$: Kayma (Pa.s)

B : Aktivasyon Enerjisi ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)

R : 8,314 kJ/mol K

$-(B/R)$: Eğim

Çizelge 11.3. Epoksi reçine modifiye bitümün Arrhenius denklemi kayma değerleri ve aktivasyon enerjileri

% Epoksi Reçine	A (Pa.s)	B ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)
0	$4,832.10^{-9}$	-60,648
1	$1,257.10^{-9}$	-65,712
2	$3,752.10^{-9}$	-62,756
3	$3,597.10^{-9}$	-62,688
4	$1,186.10^{-8}$	-58,196
5	$2,089.10^{-8}$	-56,263
6	$3,003.10^{-8}$	-54,940

Aktivasyon enerjisinde ise katkı ilavesi ile önce bir azalış sonra ise artış tespit edilmiştir. Aktivasyon enerjisinin düşüşü ile kristalizasyonun ve çapraz bağlanmanın arttığı ve daha sert bir yapı elde edildiği bilinmektedir [79]. Dolayısı ile orjinal bitüme göre düşük katkı maddesi ilavelerinde aktivasyon enerjisinin düştüğü yani daha fazla kristalizasyonun olduğu, yüksek katkı maddesi ilavelerinde ise aktivasyon enerjisinin arttığı yani kristalizasyonun azaldığından bahsetmek mümkündür.

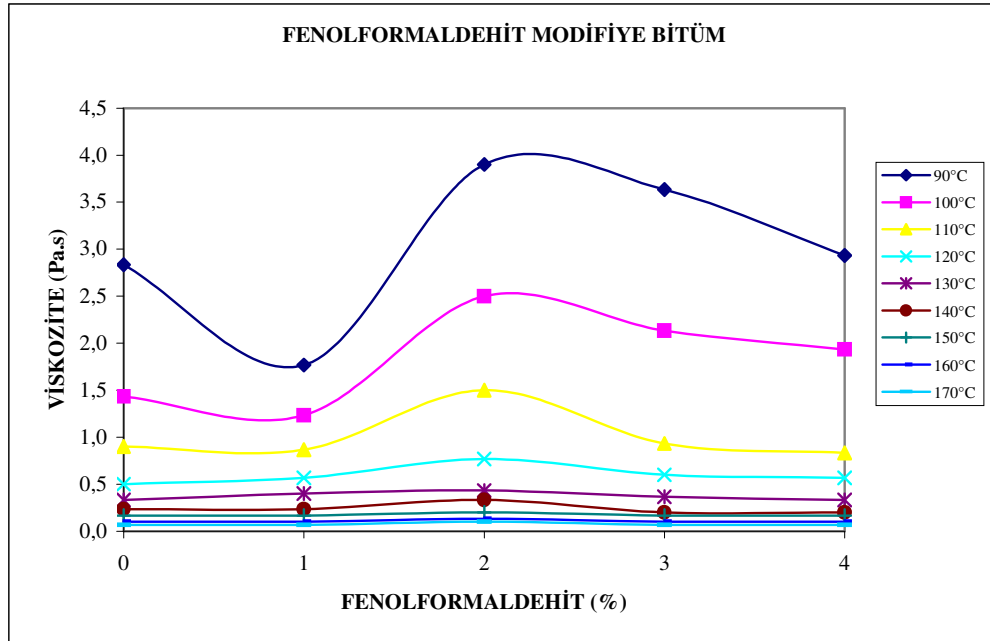
11.1.3. Fenolformaldehit modifiyeli bitümün viskozite test sonuçları

Fenolformaldehit ile modifiye edilen bitüm numuneleri etüvde 120 °C'a kadar ısıtıldıktan sonra sırayla Brookfield Thermosel aparatına yerleştirildi. Ölçüm yapılacak her bir sıcaklıkta sabitlenme yapıldıktan sonra ölçümler gerçekleştirildi. Viskozite testleri, davranış değişikliklerini görebilmek için 90 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C, 150 °C, 160 °C ve 170 °C sıcaklıklarda yapıldı. Her bir sıcaklıkta üç okuma yapılarak ortalamaları kaydedildi.

50/70 sınıfı bitümün kütlece %1, %2, %3 ve %4 fenolformaldehit ile modifiye edilmesinden elde edilen viskozite verileri Çizelge 11.4’de, bitümün katkı maddesi miktarına bağlı viskozite değişimini gösteren grafik Şekil 11.5’de verilmiştir.

Çizelge 11.4. Fenolformaldehit modifiye bitümün viskozite değerleri

Viskozite, Pa.s (Brookfield) (ASTM D4402-87) (20 rpm)	Sıcaklık (°C)	Fenolformaldehit				
		0%	1%	2%	3%	4%
	90	2,833	1,767	3,900	3,633	2,933
	100	1,433	1,233	2,500	2,133	1,933
	110	0,900	0,867	1,500	0,933	0,833
	120	0,500	0,567	0,767	0,600	0,567
	130	0,333	0,400	0,433	0,367	0,333
	140	0,233	0,233	0,333	0,200	0,200
	150	0,167	0,167	0,200	0,167	0,167
	160	0,100	0,100	0,133	0,100	0,100
	170	0,067	0,067	0,100	0,067	0,067

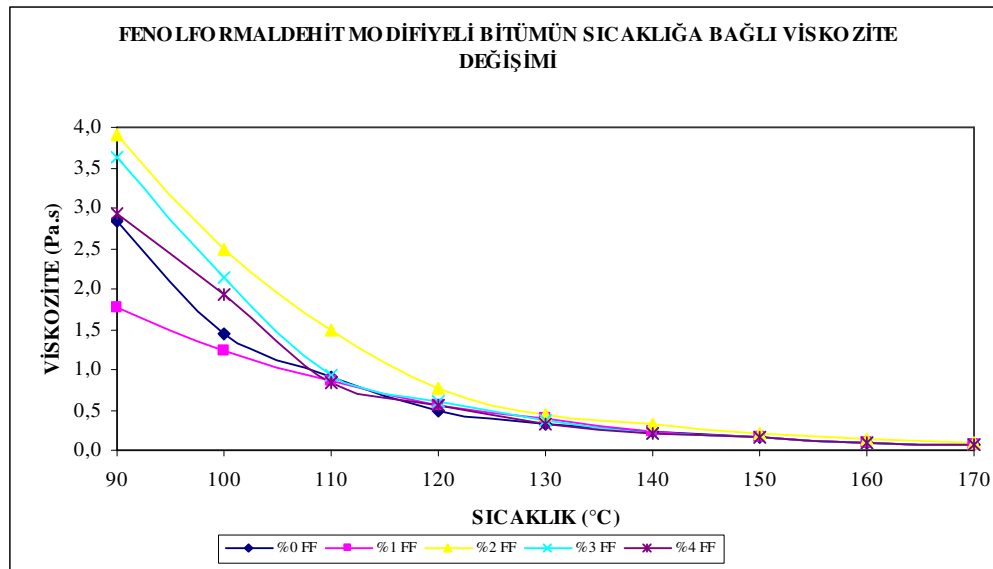


Şekil 11.5. Fenolformaldehit modifiye bitümün katkı miktarına bağlı viskozite değişimi

Grafikten görüleceği üzere %1'lik katkı ilavesi bitümün viskozitesini yüksek sıcaklıklarda etkilememiş, düşük sıcaklıklarda ise azaltmıştır. Ancak, katkı miktarının artması ile viskozite değerleri düşük sıcaklıklarda artmış ve %2'lik kısımda bir optimumdan geçmiş olup, %3 ve %4'lük ilavelerde tekrar düşüşe geçmiştir. Veriler incelendiğinde daha fazla katkı ilavesine gerek duyulmamıştır. En çok viskozite artışının tespit edildiği %2'lik katkı miktarı optimum katkı miktarı olarak kaydedilmiştir. %2'lik ilavede ve 90 °C'da yaklaşık %38 viskozite artışı elde edilmiştir.

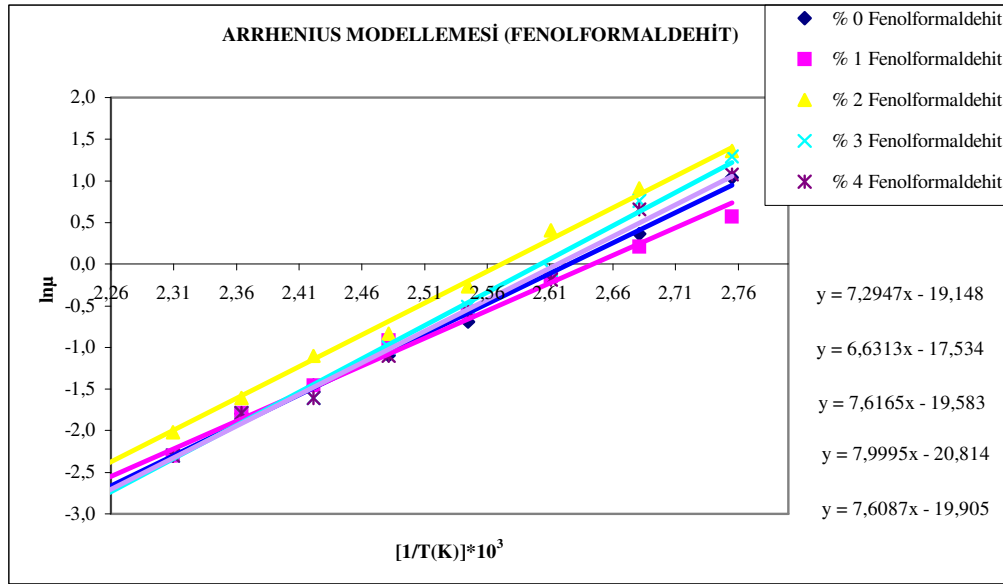
Kullanılan katkının bozunma sıcaklığı >130 °C olması nedeniyle daha yüksek sıcaklıklarda fenolformaldehit bileşenlerine (CO, NO_x, amonyak, formaldehit, fenol) ayrılmış olabileceği ve bu bileşenlerin bir kısmının yapıda tutulabileceği düşünülmektedir.

Fenolformaldehit reçine modifiyeli bitümün sıcaklığa bağlı viskozite değişimi ise Şekil 11.6'da verilmiştir. Burada da yüksek sıcaklıklarda reçine miktarında ki artışın viskozite üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, ancak düşük sıcaklıklarda reçine



Şekil 11.6. Fenolformaldehit modifiye bitümün sıcaklığa bağlı viskozite değişimi

miktardaki artışın viskozitede belirgin etki yarattığı görülmektedir. Dolayısıyla hizmet aşaması için (düşük sıcaklıklarda) daha stabil bir karışım elde edilebileceği düşünülmektedir. Yine yüksek sıcaklıklarda katkı maddesi bitümün işlenebilirliği açısından olumlu etkiler göstermiş ve düşük sıcaklıklarda da katkı miktarının artırılması halinde bitümün işlenebilirliğini artırabileceği görülmüştür.



Şekil 11.7. Fenolformaldehit modifiye bitümün Arrhenius denklemine modellenmesi

Elde edilen verilerin Arrhenius denklemine uygun olarak modellenmesi (Şekil 11.7) yapıldığında hesaplanan kayma değerleri ve aktivasyon enerjileri Çizelge 11.5’de verilmektedir.

Çizelge 11.5. Fenolformaldehit modifiye bitümün Arrhenius denklemi kayma değerleri ve aktivasyon enerjileri

% Fenolformaldehit	A (Pa.s)	B (kJ*mol ⁻¹)
0	$4,832 \cdot 10^{-9}$	-60,648
1	$2,427 \cdot 10^{-8}$	-55,133
2	$3,127 \cdot 10^{-9}$	-63,324
3	$9,133 \cdot 10^{-10}$	-66,507
4	$2,267 \cdot 10^{-9}$	-63,259

Burada orjinal bitüme göre katkı maddesi ilavesi ile aktivasyon enerjisinin önce artış gösterdiği ancak katkı miktarının artışı ile azaldığı, sonrasında ise %4'lük katkı ilavesinde tekrar artışa geçtiği görülmektedir. Aktivasyon enerjisinin azaldığı katkı miktarlarında kristalizasyonun daha fazla olduğu düşünülmektedir.

11.1.4. PTFE modifiyeli bitümün viskozite test sonuçları

PTFE ile modifiye edilen bitüm numuneleri etüvde 150 °C'a kadar ısıtıldıktan sonra Brookfield Thermosel aparatına yerleştirildi. Ölçüm yapılacak her bir sıcaklıkta sabitleme yapıldıktan sonra ölçümler gerçekleştirildi. Viskozite testleri, davranış değişikliklerini görebilmek için 90 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C, 150 °C, 160 °C ve 170 °C sıcaklıklarda yapıldı. Her bir sıcaklıkta üç okuma yapılarak ortalaması viskozite değerleri olarak alınmıştır.

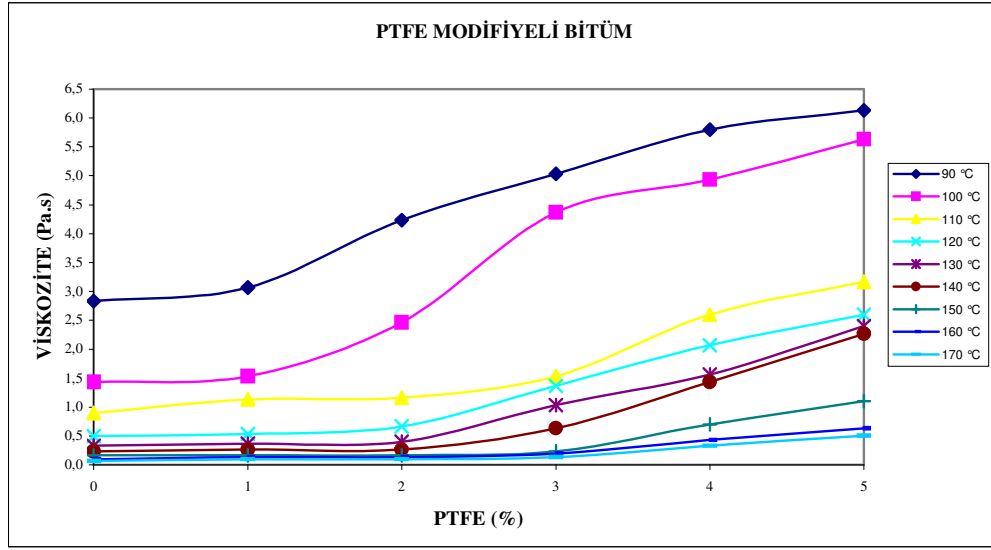
50/70 sınıfı bitümün ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 PTFE ile modifiye edilmesinden elde edilen viskozite verileri Çizelge 11.6'de, bitümün katkı miktarına bağlı viskozite değişimi ise Şekil 11.8'de verilmiştir.

Çizelge 11.6. PTFE modifiye bitümün viskozite değerleri

	Sıcaklık (°C)	PTFE					
		0%	1%	2%	3%	4%	5%
Viskozite, Pa.s (Brookfield) (ASTM D4402-87) (20 rpm)	90	2,833	3,067	4,233	5,033	5,800	6,133
	100	1,433	1,533	2,467	4,367	4,933	5,633
	110	0,900	1,133	1,167	1,533	2,600	3,167
	120	0,500	0,533	0,667	1,367	2,067	2,600
	130	0,333	0,367	0,400	1,033	1,567	2,400
	140	0,233	0,267	0,267	0,633	1,433	2,267
	150	0,167	0,167	0,167	0,233	0,700	1,100
	160	0,100	0,133	0,133	0,200	0,433	0,633
	170	0,067	0,100	0,100	0,133	0,333	0,503

PTFE'nin erime ısısının çok yüksek oluşu ve katı halde (toz) bitüme ilavesi nedeniyle bitümü modifiyesinde tamamen homojen bir karışım elde edilememiştir.

Ancak viskozite ölçümlerinde katkı miktarının artması ile bitümün viskozitesinin hızla arttığı tespit edilmiştir. Şekil 11.9'dan da bu artışların hem yüksek hem de düşük sıcaklıklarda tespit edildiği görülmektedir. Genel çerçevede %3'lük PTFE katkısı optimum katkı miktarı olarak alınmıştır. %3'lük ilavede ve 90°C'da yaklaşık %78 viskozite artışı sağlanmıştır.



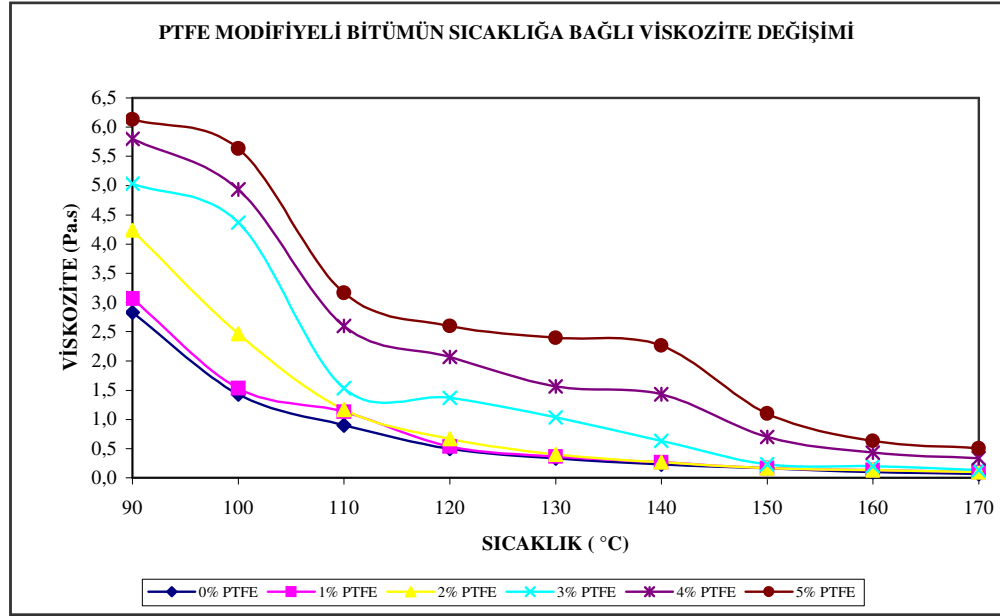
Şekil 11.8. PTFE modifiye bitümün katkı miktarına bağlı viskozite değişimi

PTFE katkısının bitümün agrega ile karıştırma ve malzemenin serme sıcaklığını bitümün viskozitesini çok artırmasından dolayı yükselteceği düşünülmektedir. Bu durum da karıştırma sıcaklığının artması bitümün yaşlanmasına sebebiyet verecektir.

Ancak, tarımdan endüstriye pek çok kullanım alanı bulunan bitümün yüksek viskozite gerektiren kullanım alanlarında (çeşitli izolasyonlar gibi) PTFE modifiye bitümün kullanımının daha iyi sonuçlar yaratabileceği düşünülmektedir.

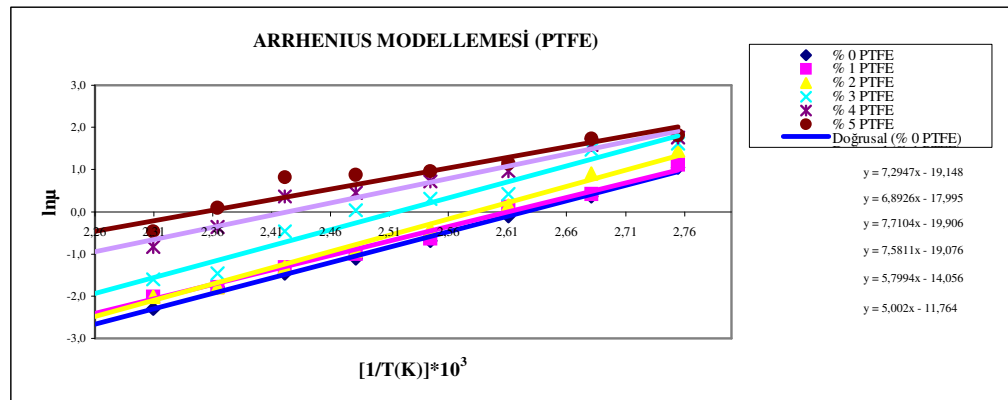
PTFE modifiye bitümün sıcaklığa bağlı viskozite değişimini veren grafiğe (Şekil 11.9) bakıldığında sıcaklık yükseldikçe viskozitenin azaldığı, ara sıcaklıklarda ise bir dalgalanma olduğu görülmektedir. Bunun üniform bir karışım elde edilemediğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yine sıcaklığın azalması ile viskozitenin yükselişe

geçmesi ve katkısız bitüm ile katkılı bitümler arasındaki viskozite farkları çok belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 11.9. PTFE modifiye bitümün sıcaklığa bağlı viskozite değişimi

Diğerlerinde olduğu gibi PTFE modifiye bitümün Arrhenius denkleminde modellenmesi yapıldığında elde edilen kayma değerleri ve aktivasyon enerjileri Çizelge 11.7'de verilmektedir.



Şekil 11.10. PTFE modifiye bitümün Arrhenius denkleminde modellenmesi

Çizelge 11.7. PTFE modifiye bitümün Arrhenius denklemi kayma değerleri ve aktivasyon enerjileri

% PTFE	A (Pa.s)	B (kJ*mol ⁻¹)
0	4,832.10 ⁻⁹	-60,648
1	1,530.10 ⁻⁸	-57,305
2	2,264.10 ⁻⁹	-64,104
3	5,192.10 ⁻⁹	-63,029
4	7,862.10 ⁻⁷	48,216
5	7,780.10 ⁻⁶	-41,587

PTFE ilavesi ile aktivasyon enerjisinde önce bir artış ve hemen sonrasında azalış görülmüş, sonra katkı miktarı ile aktivasyon enerjisi artmıştır. Daha öncede bahsedildiği gibi PTFE katkısı ile homojen bir karışım elde edilememiş olmakla birlikte aktivasyon enerjisinin artışı ile kristalizasyonun azaldığı düşünülmektedir.

11.1.5. Mg abietat bileşiği modifiyeli bitümün viskozite test sonuçları

Mg abietat bileşiği ile modifiye edilen bitüm numuneleri etüvde 100 °C'a kadar ısıtıldıktan sonra Brookfield Thermosel aparatına yerleştirildi. Ölçüm yapılacak her bir sıcaklıkta sabitleme yapıldıktan sonra ölçümler gerçekleştirildi. Viskozite testleri, davranış değişikliklerini görebilmek için 90 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C, 150 °C, 160 °C ve 170 °C sıcaklıklarda yapıldı.

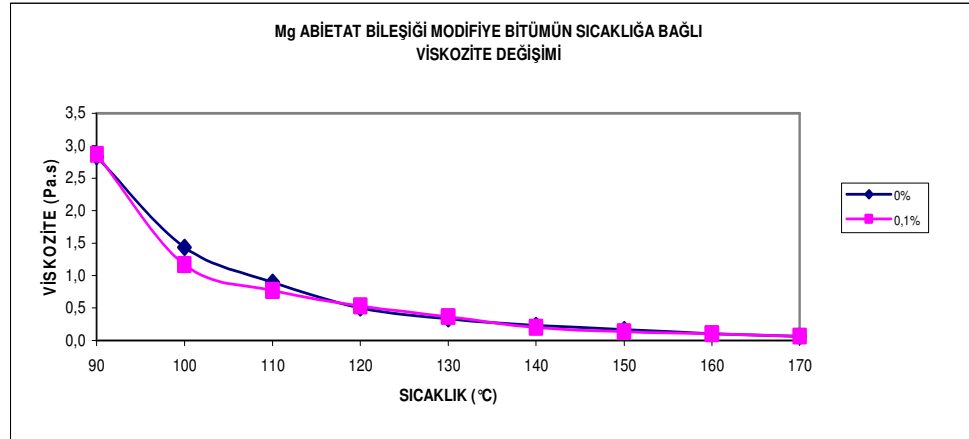
50/70 sınıfı bitümün kütlece %0,1 Mg içerecek şekilde Mg abietat bileşiği ile modifiye edilmesinden elde edilen viskozite verileri Çizelge 11.8.'de verilmiştir.

%0,1'lik Mg katkı maddesi ilavesinin bitümün viskozitesini artırmadığı yukarıdaki verilerden görülmektedir. Katkı maddesinin bitümün viskozitesini pek etkilemediği tespit edilmiştir. Bu durum beklenen bir sonuç olup, katkı miktarının artması ile viskozitenin pek fazla değişmeyeceği düşünülmektedir. Mg abietat bileşiği modifiye bitüm eldesinde asıl amaç soyulmayı azaltıcı etki göstermeyi bekleyişimizdir [37].

Çizelge 11.8. Mg katkılı modifiye bitümün viskozite değerleri

Viskozite, Pa.s (Brookfield) (ASTM D4402-87) (20 rpm)	Sıcaklık (°C)	Mg Abietat Bileşiği	
		0%	0,1%
	90	2,833	2,867
	100	1,433	1,167
	110	0,900	0,767
	120	0,500	0,533
	130	0,333	0,367
	140	0,233	0,200
	150	0,167	0,133
	160	0,100	0,100
	170	0,067	0,067

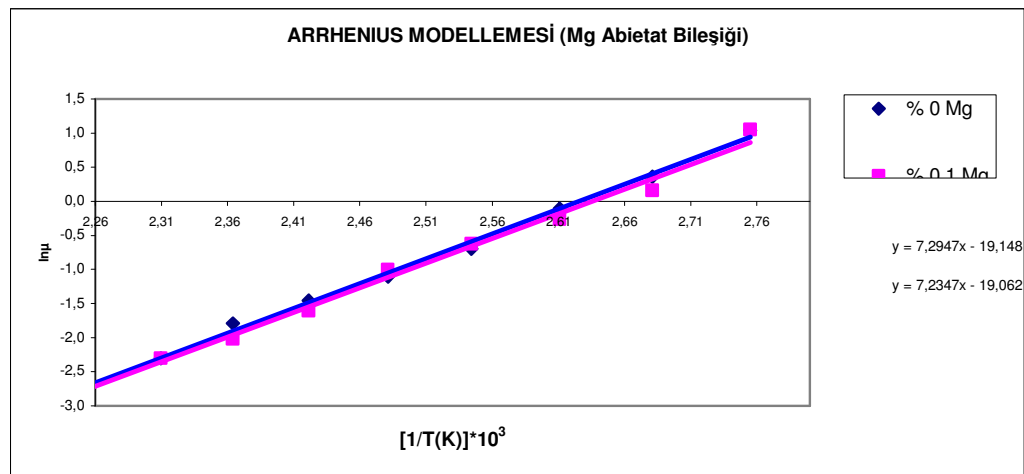
Mg katkılı modifiye bitümün viskozite değerleri sıcaklığa karşı grafiğe (Şekil 11.11) geçirildiğinde de katkı maddesinin bitümün viskozitesini pek etkilemediği görülmektedir.



Şekil 11.11. Mg katkılı modifiye bitümün sıcaklığa bağlı viskozite değişimi

Bu durumda Mg katkısı, bitümün agrega ile karıştırma sıcaklığını yükseltmeyeceğinden ilave bir oksitlenmeye sebebiyet vermeyecektir. Viskoziteyi artırmayışı hatta grafikten görüleceği üzere düşük sıcaklıklarda kısmen de olsa azalış göstermesi bitümün işlenebilirliğini de artıracabileceğini göstermektedir.

Verilerin Arrhenius denklemine modellemesi yapıp grafiğe geçirildiğinde Şekil 11.12 elde edilmiştir. Şekil 11.12’de elde edilen doğru denklemlerinden hesaplanan aktivasyon enerjileri ve kayma değerlerine (Çizelge 11.9) bakıldığında da Mg abietat bileşiğinin bitümün aktivasyon enerjisinde önemli bir değişiklik yaratmadığı görülmektedir.



Şekil 11.12. Mg abietat bileşiği modifiye bitümün Arrhenius denklemi modellemesi

Çizelge 11.9. Mg abietat bileşiği modifiye bitümün Arrhenius denklemini kayma değerleri ve aktivasyon enerjileri

% Mg abietat bileşiği	A (Pa.s)	B (kJ*mol ⁻¹)
0	$4,832 \cdot 10^{-9}$	-60,648
0,1	$5,266 \cdot 10^{-9}$	-60,149

Viskozite test sonuçlarını genel olarak incelendiğinde; termoset grubu polimerlerin (epoksi reçine, fenolformaldehit reçine) bitümün viskozitesini artırdığı, termoplastik türü polimerlerden PTFE’den homojen karışım elde edilememekle birlikte viskoziteyi çok fazla artırdığı ve Mg katkısının ise viskoziteyi pek etkilemediği tespit edilmiştir. Bitümün viskozitesinin sıcaklığa bağlı değişiminin ise kaplamada tekerlek izi, çatlak ve yorulma gibi sorunlara neden olduğunu belirtmiştik. Dolayısıyla viskozite artışı ile kaplamada meydana gelen tekerlek izinin azaltılacağı, yorulma

özelliklerinin iyileştirileceği, kohezyonun artacağı ve kusmanın önüne geçilebileceği kısacası kalıcı deformasyonların azaltılacağı düşünülmektedir.

11.2. Orjinal ve modifiye bitümünlerin penetrasyon deneyi sonuçları

Çizelge 11.10’da penetrasyon deneyi sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde epoksi reçinenin bitümün penetrasyonunu düşürdüğü, fenolformaldehit ve PTFE’nin ise pek etkilemediği, Mg abietat bileşiğinin ise artırdığı görülmektedir.

Çizelge 11.10. Penetrasyon deneyi sonuçları

Numune	Penetrasyon
Orjinal bitüm	62
%2 epoksi modifiye bitüm	54
%3 epoksi modifiye bitüm	55
%2 fenolformaldehit modifiye bitüm	63
%3 PTFE modifiye bitüm	63
%0,1 Mg abietat bileşiği	76

Penetrasyon değerinin düşmesi daha sert bir bitüm , yükselmesi ise daha yumuşak bir bitüm anlamına gelmektedir. Dolayısıyla orjinal bitüme göre epoksi reçine katkısı ile daha sert, Mg abietat bileşiği ile daha yumuşak bitüm elde edilmiştir. Bu ise çok düşük sıcaklıklardaki uygulamalar için magnezyum abietat bileşiğinin katkı maddesi olarak uygulanabileceği, işleme kolaylığı getireceği, düşük sıcaklıklardaki çatlama ve kırılmaları önleyebileceği düşünülmektedir.

11.3. Orjinal ve modifiye bitümünlerin yumuşama noktası deneyi sonuçları

Çizelge 11.11’de yumuşama noktası deneyi sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, orjinal bitümün yumuşama noktasını epoksi reçine katkısının yaklaşık 3 °C artırdığı, fenolformaldehit reçine katkısının yaklaşık 2 °C artırdığı, PTFE’nin çok az azalttığı ve Mg abietat bileşiğinin ise 2,6 °C azalttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 11.11. Yumuşama noktası deneyi sonuçları

Numune	Yumuşama noktası (°C)
Orjinal bitüm	49,2
%2 epoksi modifiye bitüm	52,2
%3 epoksi modifiye bitüm	52
%2 fenolformaldehit modifiye bitüm	51
%3 PTFE modifiye bitüm	48,6
%0,1 Mg abietat bileşiği	46,6

Yumuşama noktası azalması istenilmeyen bir durum olmakla birlikte, yumuşama noktası düşük bitümlerin kullanıldığı kaplamalarda deformasyonların erken başladığı, yumuşama noktası yüksek bitümlerin kullanımının ise tekerlek izi oluşumunu azalttığı bilinmektedir. Bu durumda da epoksi reçinenin ve fenolformaldehit reçinenin tekerlek izini azaltması beklenmektedir. Diğer taraftan Mg katkısının bitümün yumuşama noktasını azaltması yüksek sıcaklıklarda deformasyonu erken başlatacak gibi görünse de düşük sıcaklık deformasyonlarının azalacağı beklenmekte olup, çok düşük sıcaklıklardaki çatlama ve kırılmaların önleyebileceği düşünülmektedir.

11.4. Modifiye Bitümlerin Kürlenme Süreleri

Epoksi reçinesi, fenolformaldehit reçinesi, PTFE ve Mg abietat bileşiği ile modifiye edilen bitümün zamanla viskozite değişimini tespit edebilmek amacıyla dört haftalık bir çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki kısımlarda sıra ile verilmiştir.

11.4.1. Epoksi reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozitesi

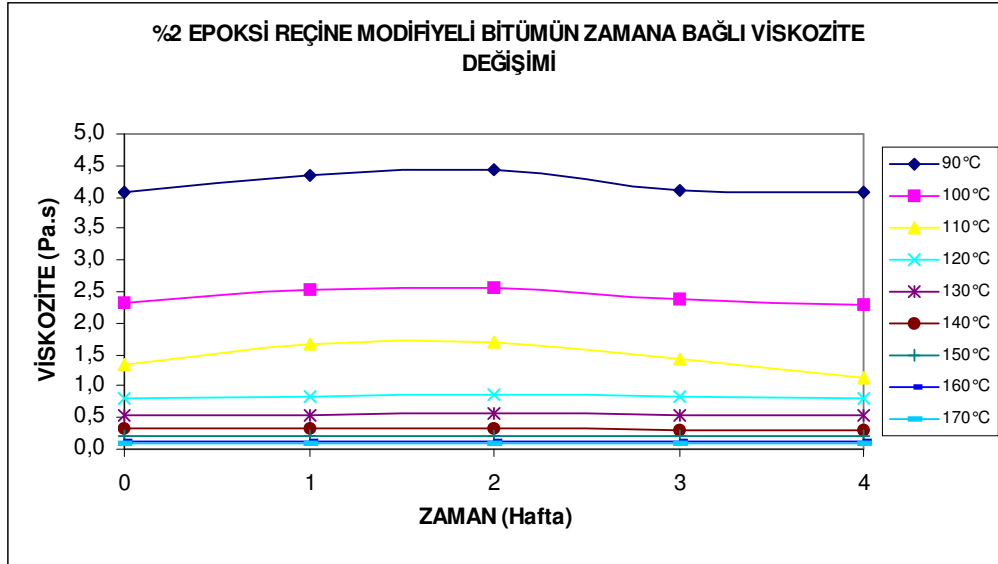
Epoksi reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değişikliklerini anlayabilmek için optimum doz olan %2'lik ve %3'lük katkıda inceleme yapılmıştır. %2 epoksi reçine modifiye bitümün birer hafta arayla ölçülmüş viskozite verileri Çizelge 11.12'de, bu verilerin zamana bağlı gafiği ise Şekil 11.13'de verilmiştir.

Viskozite değerleri %2'lik katkıda ikinci haftada bir artış göstermiş, sonrasında azalma sergilemiştir. Dördüncü haftada ise birinci gün değerlerine yaklaşmıştır.

Yüksek sıcaklıklarda ise geçen süre viskozite değişiminde etkili olmamıştır. Nitekim elde edilen verilerden 140 °C'ın üstündeki sıcaklıklarda viskozitenin birinci günden sonra değişmediği görülmektedir.

Çizelge 11.12. %2 Epoksi reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değerleri

Viskozite, Pa.s (Brookfield) (ASTM D4402-87) (20 rpm)	Sıcaklık (°C)	0%	1. Gün	1. Hafta	2. Hafta	3. Hafta	4. Hafta
			2% Epoksi Reçine MB				
	90	2,833	4,067	4,333	4,433	4,100	4,067
	100	1,433	2,333	2,533	2,567	2,367	2,300
	110	0,900	1,333	1,667	1,700	1,433	1,133
	120	0,500	0,800	0,833	0,867	0,833	0,800
	130	0,333	0,533	0,550	0,567	0,533	0,530
	140	0,233	0,333	0,333	0,333	0,300	0,300
	150	0,167	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
	160	0,100	0,133	0,133	0,133	0,133	0,133
	170	0,067	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100



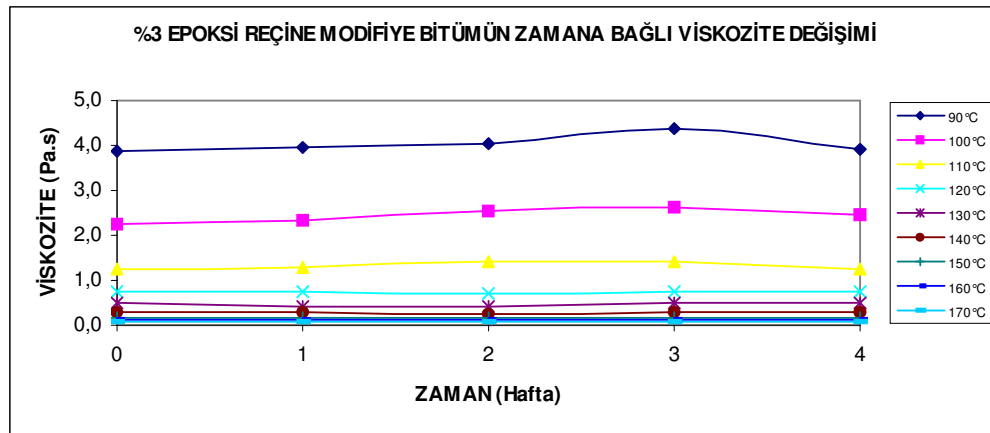
Şekil 11.13. %2 Epoksi reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değişimi

Şekil 11.13'e bakıldığında da dört haftalık zaman zarfında viskozitede çok büyük farklılıkların olmadığı, ikinci haftada viskozitede bir miktar artış görünse de dördüncü hafta sonunda birinci gün değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum da viskozitede önemli bir artışın olmayışı bitümün bu zaman zarfında önemli derecede bir yaşlanmaya da maruz kalmadığını düşündürmektedir. Ayrıca, viskozite açısından kararlı bir modifiye bağlayıcı elde edilmiştir.

%3 epoksi reçine modifiye bitümün birer hafta arayla ölçülmüş viskozite verileri ise Çizelge 11.13'de, bu verilerin zamana bağlı gafiği de Şekil 11.14'de verilmiştir.

Çizelge 11.13. %3 Epoksi reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değerleri

Viskozite, Pa.s (Brookfield) (ASTM D4402-87) (20 rpm)	Sıcaklık (°C)	0%	1. Gün	1. Hafta	2. Hafta	3. Hafta	4. Hafta
			3% Epoks Reçine MB				
	90	2,833	3,867	3,967	4,033	4,367	3,933
	100	1,433	2,233	2,333	2,533	2,633	2,467
	110	0,900	1,233	1,300	1,400	1,400	1,267
	120	0,500	0,767	0,767	0,700	0,767	0,767
	130	0,333	0,500	0,433	0,433	0,500	0,500
	140	0,233	0,300	0,300	0,267	0,300	0,300
	150	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
	160	0,100	0,133	0,133	0,133	0,133	0,133
	170	0,067	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100



Şekil 11.14. %3 Epoksi reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değişimi

%3'lük katkı ilavesinde ise viskozitenin üçüncü haftada bir artış sağladığı görülmektedir. Bu durum katkı miktarının artması ile kürlenme süresinin arttığını göstermektedir. Üçüncü haftadan sonra ise viskozitede düşüş meydana gelmiştir. Dördüncü haftada %2'lik epoksi reçine katkısında elde edilen sonuca benzer olarak viskozite değerleri birinci gün değerlerine yaklaşmıştır.

Bilindiği üzere, yaşlanmanın büyük bölümü kısa dönem yaşlanma diye adlandırılan ve depolama, taşıma, karıştırma, serilme ve sıkıştırma işlemleri sırasında meydana gelen yaşlanmadır. Bitümün sertleşmesine en önemli etken ise oksitlenmedir. Bunun yanında uçucu bileşen kaybı, fiziksel sertleşme ve sızma sertleşmesi de diğer etkenlerdir [2]. Bitüm havayla temasa geçtiğinde yavaşça oksitlenir. Oksijen içeren gruplar daha yüksek moleküler ağırlıklı gruplarla bir araya gelir ve bitümün viskozitesinin artmasına neden olur. Ayrıca, bitüm ortam sıcaklığında belli bir süre kaldığında ve bitüm moleküllerinin yeniden yönelmesi ile veya yağlı kısımların zamanla bitümden ayrılmasıyla sertleşmektedir.

Bu açıdan bakıldığında dördüncü hafta sonunda birinci gün değerlerine yakın viskozite değerlerinin elde edilişi, epoksi reçinenin bitümün zamanla sertleşmesini önleyebileceği ve oksitlenmeye karşı direnci artırdığı düşünülmektedir.

11.4.2. Fenolformaldehit reçine modifiye bitümün zamana bağlı viskozitesi

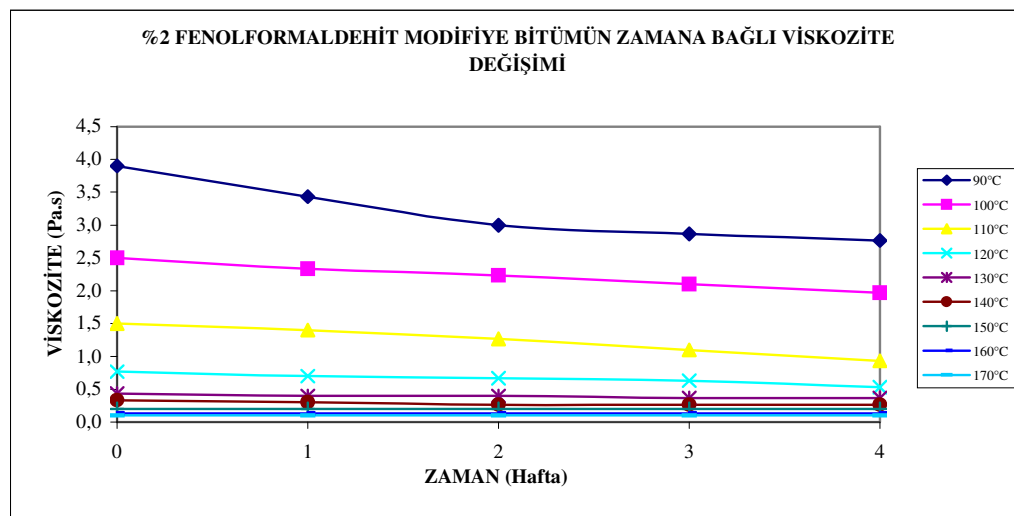
Fenolformaldehit modifiye bitüm eldesinde viskozite testlerinden elde edilen optimum %2'lik fenolformaldehit modifiye bitümün zamana bağlı kürlenme süresi araştırılmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 11.14'de verilmiştir. Verilerin grafiği ise Şekil 11.15'de görülmektedir.

Verilerden görüleceği üzere birinci günden sonra %2 fenolformaldehit modifiye bitümün viskozitesinde zamana bağlı olarak düşüş meydana gelmiştir. Fenolformaldehit modifiye bitüm hazırlanırken fenolformaldehitin bozunma sıcaklığının (130 ° C) altında bir karıştırma sıcaklığı alınmış ve bozunmasına imkan tanınmamaya çalışılmıştır. Ancak, 1 saatlik bir karıştırma ve akabinde 120 °C'lik

etüvde 1 saat bekletme fenolformaldehit moleküllerini zayıflatmış ve ayrıca 170 °C gibi yüksek sıcaklıklarda viskozite ölçümü fenolformaldehitin bozunup bileşenlerine ayrılmasına neden olmuş olabilir. Büyük bir ihtimallede bozulan ürünlerin bitüme bağlanmış olabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla formaldehit reçinesinin bitümün modifiyesinde kullanılması sırasında 130 °C'ın üzerine çıkılmamasına özen gösterilmelidir.

Çizelge 11.14. %2 Fenolformaldehit modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değerleri

Viskozite, Pa.s (Brookfield) (ASTM D4402-87) (20 rpm)	Sıcaklık (°C)		1. Gün	1. Hafta	2. Hafta	3. Hafta	4. Hafta
		0%	2% Fenolformaldehit Reçine				
	90	2,833	3,900	3,433	3,000	2,867	2,767
	100	1,433	2,500	2,333	2,233	2,100	1,967
	110	0,900	1,500	1,400	1,267	1,100	0,933
	120	0,500	0,767	0,700	0,667	0,633	0,533
	130	0,333	0,433	0,400	0,400	0,367	0,367
	140	0,233	0,333	0,300	0,267	0,267	0,267
	150	0,167	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
	160	0,100	0,133	0,133	0,133	0,133	0,133
	170	0,067	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100



Şekil 11.15. %2 Fenolformaldehit modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değişimi

Diğer taraftan çok ucuz ve endüstride sık kullanılan fenolformaldehit reçinesinin bitümün viskozitesini zamanla düşürmüş olması zamanla daha yumuşak, şertleşmemiş yani yaşlanmamış bitüm eldesi anlamına gelmekte olup, yaşlanmış bitümlerin kullanımını sağlamaya yönelik katkı maddesi olarak da kullanılabileceği ve düşük viskozite gereken yerlerde (soğuk iklim bölgeleri) birkaç hafta bekletilmiş modifiye bitümlerin kullanılabileceği düşünülmektedir. Yine düşük sıcaklıklarda yani soğuk iklim bölgelerinde de bekletilmiş fenolformaldehit reçinesi modifiye bitümün kullanılmasının düşük ısı çatlaklarını önleyebileceği değerlendirilmektedir. Çünkü yaşlanmış bitümün kullanıldığı karışımlar yük ve çevre etkilerinden doğan kuvvetlere esneklik gösterememekte ve kırılgan hale gelip çatlayabilmektedir. Çatlayan noktalardan giren suda soyulmayı hızlandırmaktadır.

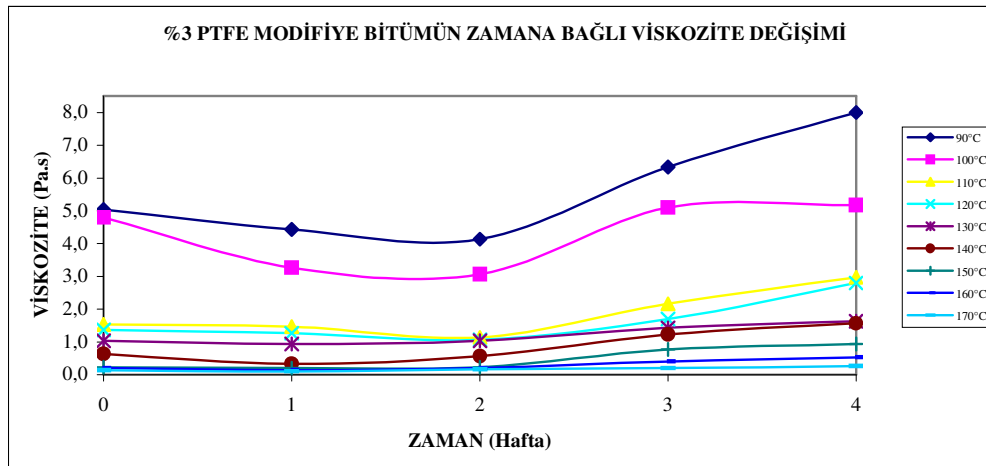
11.4.3. PTFE modifiye bitümün zamana bağlı viskozitesi

PTFE modifiye bitüm eldesinde optimum alınan %3'lük katkı ilavesli modifiye bitümün kürlenme süresi dikkate alınmıştır.

İlk günden sonra birer haftalık süreyle yapılan viskozite ölçümlerinden elde edilen veriler Çizelge 11.15'de verilmektedir.

Çizelge 11.15. %3 PTFE modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değerleri

	Sıcaklık (°C)		1. Gün	1. Hafta	2. Hafta	3. Hafta	4. Hafta
		0%	3% PTFE MB				
Viskozite, Pa.s (Brookfield) (ASTM D4402-87) (20 rpm)	90	2,833	5,033	4,433	4,133	6,333	8,000
	100	1,433	4,800	3,267	3,067	5,100	5,167
	110	0,900	1,533	1,467	1,133	2,167	2,967
	120	0,500	1,367	1,267	1,067	1,700	2,800
	130	0,333	1,033	0,933	1,033	1,433	1,633
	140	0,233	0,633	0,333	0,567	1,233	1,567
	150	0,167	0,233	0,200	0,233	0,767	0,933
	160	0,100	0,200	0,133	0,200	0,400	0,533
	170	0,067	0,133	0,100	0,167	0,200	0,267



Şekil 11.16. %3 PTFE modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değişimi

PTFE modifiye bitümün zamana bağlı viskozite değişimini veren Şekil 11.16'dan da görüleceği üzere, birinci günden sonra ikinci haftaya kadar %3 PTFE modifiye bitümün viskozitesinde düşük sıcaklıklarda ilk gün değerlerine göre çok az bir düşüş gözlenmiştir. İkinci haftadan sonra düşük sıcaklıklarda daha belirgin olmak kaydıyla hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda viskozitede artış tespit edilmiştir.

Bu durumun tam bir üniformluğun sağlanamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. PTFE'nin bozunma sıcaklığının çok yüksek olmasına nazaran yinede bir kısım moleküllerin bitüm içerisine bağlanabileceği ihtimalide akla gelmektedir.

Bununla birlikte homojen bir karışım elde edilemese de teflonun fiziksel ve kimyasal özelliklerin modifiye bitüme yansıyabileceği ve toz halinde bitüme ilave edildiğinden zamanla bitüm içerisinde bu tozların şişerek viskoziteyi artırmış olabileceği de düşünülmektedir.

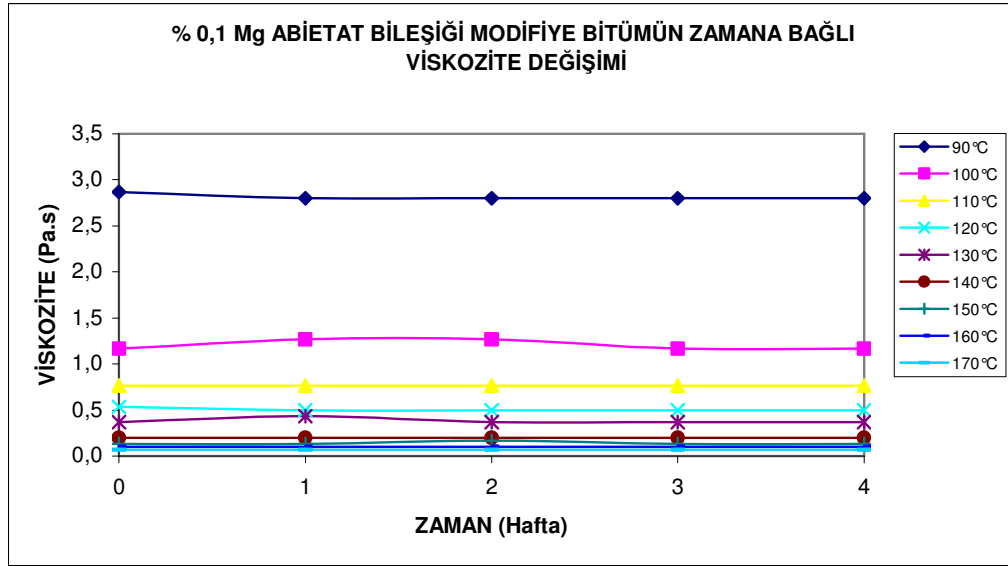
11.4.4. Mg abietat bileşiği modifiye bitümün zamana bağlı viskozitesi

%0,1'lik Mg abietat bileşiği bitümün dört haftalık viskozite değerlerinin değişiminin araştırılmasından elde edilen veriler Çizelge 11.16'da verilmektedir. Mg abietat

bileşiğı modifiye bitümün zamana bağı viskozite değışimi ise Şekil 11.17’de görölmektedir.

Çizelge 11.16. Mg abietat bileşiğı modifiye bitümün zamana bağı viskozite verileri

Viskozite, Pa.s (Brookfield) (ASTM D4402-87) (20 rpm)	Sıcaklık (°C)		1. Gün	1. Hafta	2. Hafta	3. Hafta	4. Hafta
		0%	0,1% Mg abietat bileşiğı				
	90	2,833	2,867	2,800	2,800	2,800	2,800
	100	1,433	1,167	1,267	1,267	1,167	1,167
	110	0,900	0,767	0,767	0,767	0,767	0,767
	120	0,500	0,533	0,500	0,500	0,500	0,500
	130	0,333	0,367	0,433	0,367	0,367	0,367
	140	0,233	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
	150	0,167	0,133	0,133	0,167	0,133	0,133
	160	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
	170	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067



Şekil 11.17. Mg abietat bileşiğı modifiye bitümün zamana bağı viskozite değışimi

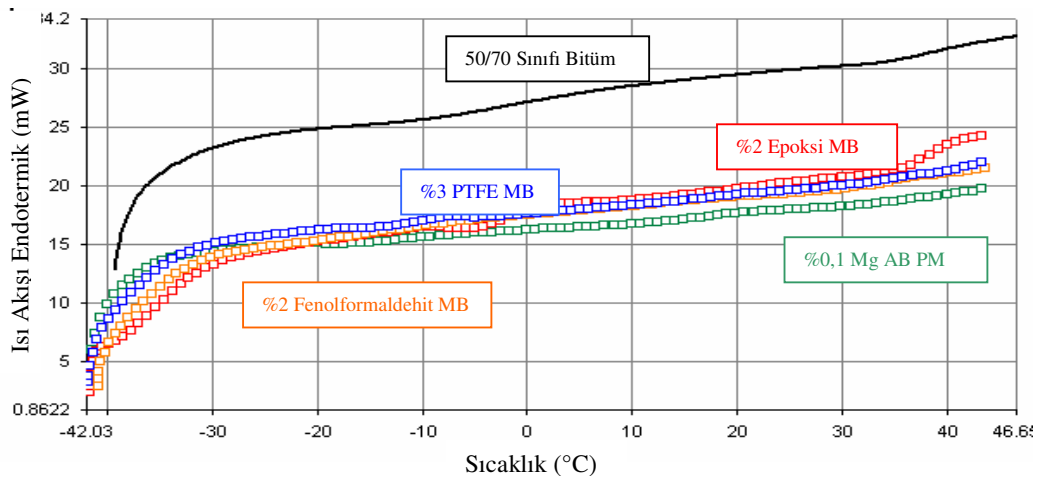
Veriler incelendiğinde dördüncü hafta sonuna kadar viskozitede önemli bir değışiklik kaydedilememiştir. Sadece birinci haftada 130 °C da viskozitede çok küçük bir artış

ve sonrasında çok küçük bir azalış tespit edilmiştir. Bu belkide o andaki ölçümden kaynaklanan bir durum olabilir.

Dört hafta boyunca viskozitede önemli bir değişiklik kaydedilmemesi, Mg katkı maddesinin bitümün yaşlanma direncini geliştireceği ve akış özelliklerini değiştirmediğinden geniş zaman zarfında da işlenebilirliğine olumlu etki sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, Mg katkı maddesinin yaşlanma direncini geliştirilmesiyle bitümün yorulma mukavemetini de artırması beklenmektedir. Bunlar ışığında soğuk iklim bölgelerinde Mg katkılı modifiye bitümün kullanılabileceği, çatlama ve kırılmaların önlenebileceği düşünülmektedir.

11.5. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Camısı Geçiş Sıcaklıklarının Tespiti

Öncelikle orjinal bitümün camısı geçiş sıcaklığı ölçülmüş ve modifiye bitümler ile karşılaştırılarak, katkıların bitümün camısı geçiş sıcaklığına etkileri tespit edilmiştir. Sonrasında ise epoksi reçineye dolgu maddesi ilave edilerek epoksi reçinenin camısı geçiş sıcaklığındaki değişim incelenmeye çalışılmıştır. Dolgu maddesi olarak termik santrellerin atığı olan uçucu kül ve hurda araç lastiği kullanılmıştır. Şekil 11.18’de orjinal bitüm ve modifiye bitümlerin DSC cihazı ile belirlenen termal eğrileri görülmektedir.

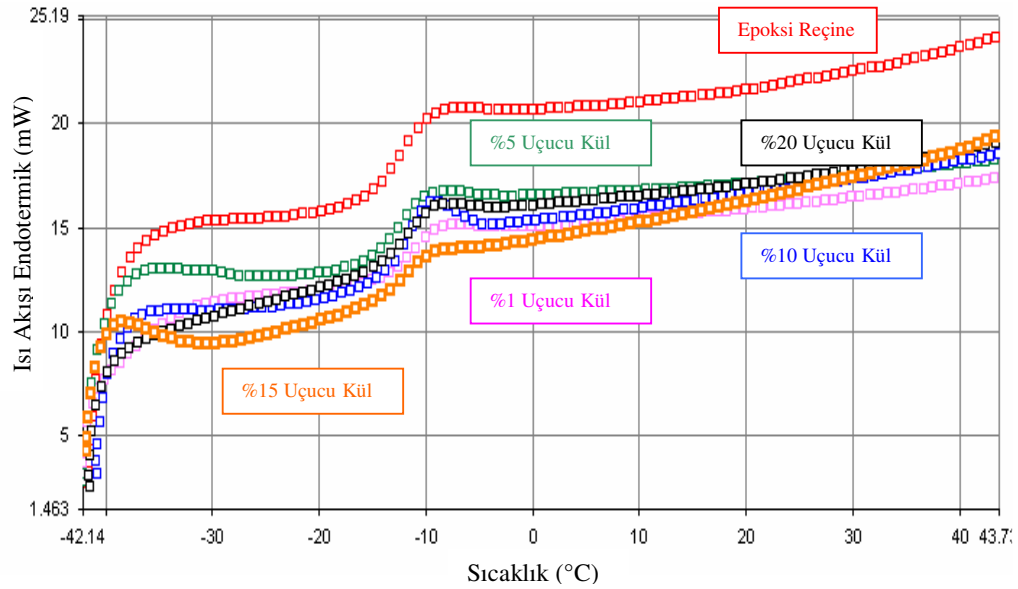


Şekil 11.18. Orjinal bitüm ve modifiye bitümlerin DSC eğrileri

Grafiğe bakıldığında katkısız ve katkılı bitümlerin benzer termal eğriler verdiği ve çok belirgin olmasa da piklerde hafif kaymalar olduğu görülmektedir. Camsı geçiş sıcaklığının yükselmesi viskozite artışına ve kararlılığa yol açacaktır. Bu durumun tekerlek izi sorunlarını azaltabileceği düşünülmektedir.

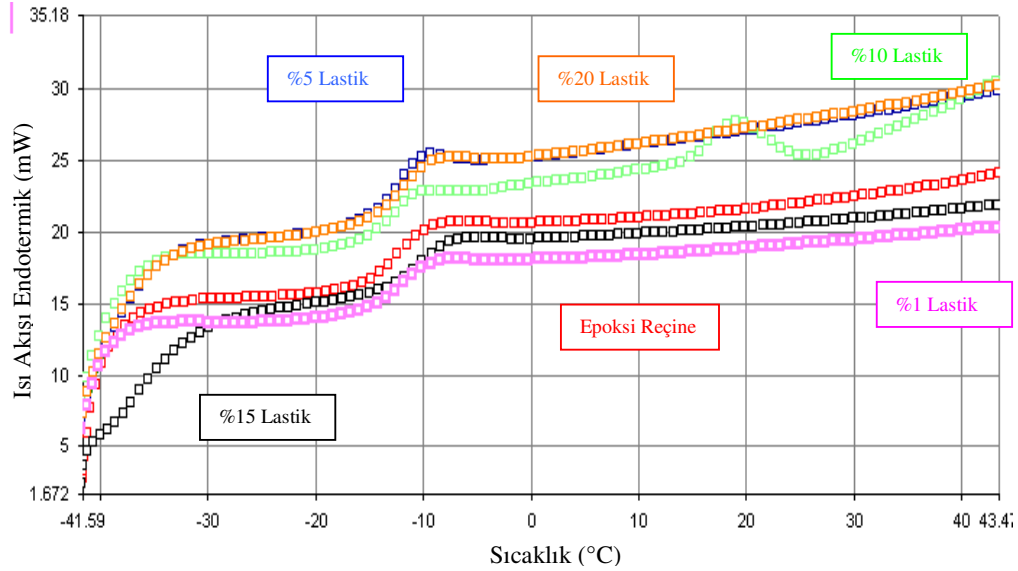
Uçucu kül, inşaat sektöründe yol yapım çalışmalarında kullanılmakta olup, yol yapımında temel malzeme ve asfalt karışımı içinde de mineral filler olarak kullanıldığı da görülmektedir [91].

Dünyada atık malzeme durumunda bulunan uçucu kül ve lastiğin değerlendirilmesi amacıyla epoksi reçineye dolgu malzemesi olarak kullanılması düşünülmüş, ancak, dolguların epoksi reçinenin camsı geçiş sıcaklığına önemli ölçüde etki etmediği tespit edilmiştir.



Şekil 11.19. Uçucu kül dolgulu epoksi reçinenin DSC eğrileri

Şekil 11.19 ve Şekil 11.20'ye bakıldığında dolgulu ve dolgusuz epoksi reçinenin benzer termal eğriler verdiği ve camsı geçiş sıcaklıklarının aynı sıcaklık aralığını kapsadığı görülmektedir.



Şekil 11.20. Lastik dolgulu epoksi reçinenin DSC eğrileri

Sonuçları desteklemek ve bitümün camsı geçiş sıcaklığına olabilecek etkisini görmek amacıyla %5 ve %20 dolgu maddesi içeren epoksi reçine yine ağırlıkça %2'lik oranda bitüme ilave edilmiş ve DSC cihazında ölçüm alınmıştır. %5'lik dolgulu %2'lik epoksi reçinenin, %2 epoksi reçine modifiye bitümün camsı geçiş sıcaklığı üzerine pek bir etkisi olmadığı ve %20'lik dolgulu %2'lik epoksi reçinenin ise %2 epoksi reçine modifiye bitümün camsı geçiş sıcaklığını azalttığı DSC verilerinden tespit edilmiştir. Ancak bu katkı maddelerinin ekonomik değerinin olmaması oldukça pahalı bir kaplamanın maliyetini düşürmektedir.

Elde edilen ve cihazın hesapladığı T_g değerleri ise Çizelge 11.17'de verilmiştir.

Camsı geçiş sıcaklığının yükselmesi viskozite artışına ve kararlılığa yol açacaktır. Nitekim viskozite test sonuçları ile camsı geçiş sıcaklıkları karşılaştırıldığında viskozite artışını veren katkı maddelerinin bitümün camsı geçiş sıcaklığını da arttırdığı görülmektedir. Dolayısıyla katkılar bitüm içerisindeki kohezyonu artırıcı etki sağlamış ve camsı yapıdaki bağların çözülmesini geciktirmiştir. Yani bitümün kohezyon kuvvetini artırıcı etki göstermiş olup, kohezyonu fazla olan bitümlerin de daha iyi bir bağlama yeteneğine sahip olduğu bilinmektedir.

Çizelge 11.17. DSC cihazı ile belirlenen camsı geçiş sıcaklıkları

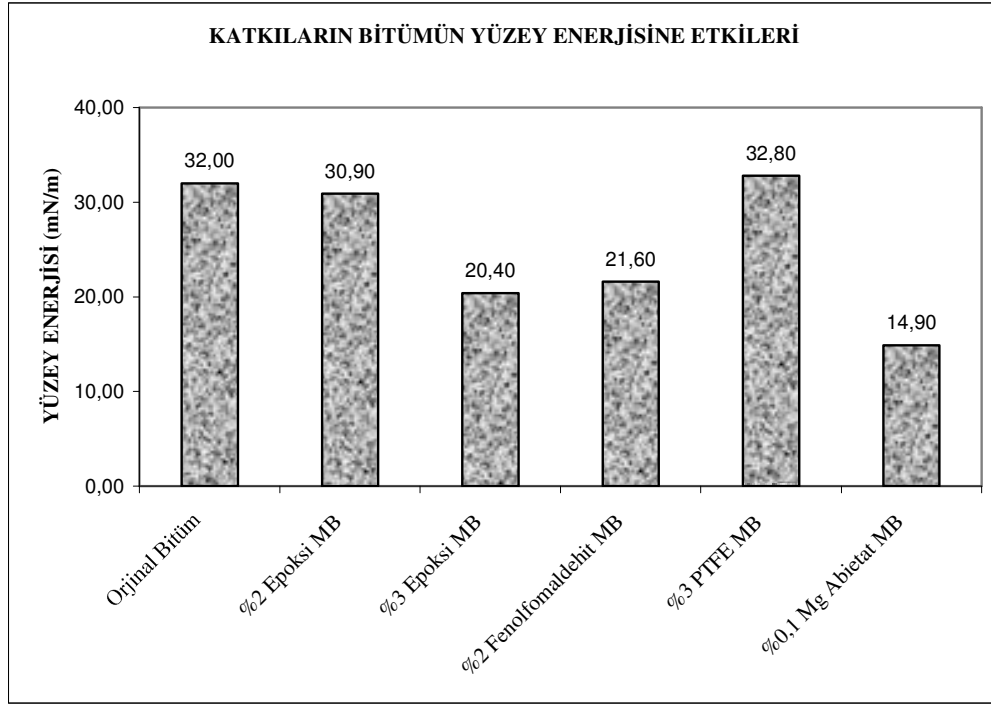
Numune	T _g (°C)
50/70 Sınıfı Bitüm	-22.50
%2 Epoksi Reçine Modifiye Bitüm	-13.85
%2 Fenolformaldehit Reçine Modifiye Bitüm	-20.88
%3 PTFE Modifiye Bitüm	-6.65
%0,1 Mg Abietat Bileşiği Modifiye Bitüm	-18.97
Fenolformaldehit Reçine	-9.64
PTFE	-15.18
Epoksi Reçine	-11.94
%1 Uçucu Kül Epoksi Reçine	-11.47
%5 Uçucu Kül Epoksi Reçine	-12.32
%10 Uçucu Kül Epoksi Reçine	-11.78
%15 Uçucu Kül Epoksi Reçine	-11.68
%20 Uçucu Kül Epoksi Reçine	-11.77
%1 Lastik Epoksi Reçine	-12.73
%5 Lastik Epoksi Reçine	-12.63
%10 Lastik Epoksi Reçine	-13.06
%15 Lastik Epoksi Reçine	-10.47
%20 Lastik Epoksi Reçine	-11.81
%5 Lastik Dolgulu %2 Epoksi Reçine Modifiye Bitüm	-11.26
%5 Uçucu Kül Dolgulu %2 Epoksi Reçine Modifiye Bitüm	-11.39
%20 Lastik Dolgulu %2 Epoksi Reçine Modifiye Bitüm	-20,41
%20 Uçucu Kül Dolgulu %2 Epoksi Reçine Modifiye Bitüm	-19,06

Katkı maddelerinin hepsi bitümün camsı geçiş sıcaklığını belirli ölçüde artırmıştır. Bu durumun tekerlek izi sorunlarını da azaltabileceği düşünülmektedir. Yani trafik yükleri altında deformasyonlara karşı daha dirençli stabil kaplama hazırlamak mümkün olacaktır.

11.6. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Yüzey Enerjilerinin Tespiti

Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjileri Krüss DSA 100 cihazı ile asit baz teorisine göre hesaplama yapılarak ölçülmüştür. Cihazın mevcut kamerası

ile de her bir ölçüm kayıt altına alınmıştır. Katkıların bitümün yüzey serbest enerjilerine etkisi Şekil 11.21’de verilmektedir.



Şekil 11.21. Orjinal ve modifiye bitümlerin DSA 100 cihazı ile tespit edilen yüzey enerjisi değerleri

Veriler incelendiğinde %0,1 Mg abietat ilavesinde yüzey gerilimi en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Polimer katkılardan ise en çok %3 epoksi reçinenin düşürdüğü tespit edilmiştir. Yine %2’lik fenolfomaldehit ilavesinde bitümün yüzey gerilimi oldukça düşmüştür. Soyulmayı önleyici katkı maddesi olarak düşünülen Mg abietat bileşiği, bitümün yüzey gerilimini yaklaşık yarısı kadar azalttığı görülmektedir.

Katkılar ile bitümün yüzey geriliminin düşürülmeye çalışılmasındaki amaç agrega ile adezyonunu güçlendirmektir. Bunun da bir sonraki basamakta yapılacak olan Nicholson soyulma deneyi ile daha iyi anlaşılması mümkün olacaktır.

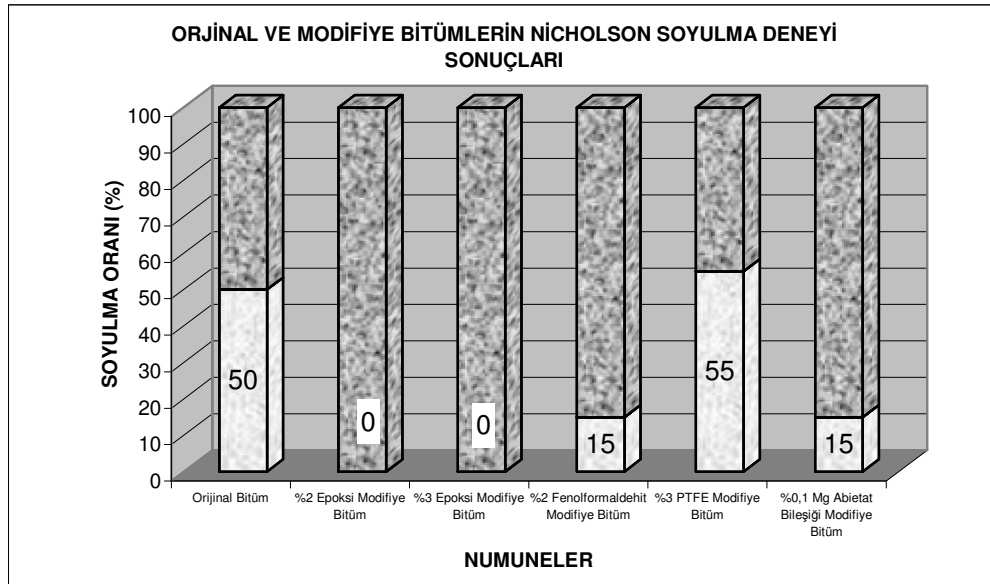
11.7. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları

Viskozite testlerine göre tespit edilen optimum katkılara Nicholson soyulma deneyi uygulanmıştır. Sonuçlar Çizelge 11.18’de verilmiştir.

Çizelge 11.18. Nicholson soyulma deneyi sonuçları

Numuneler	Soyulma Oranı (%)
Orjinal Bitüm	50-55
%2 Epoksi Modifiye Bitüm	0-5
%3 Epoksi Modifiye Bitüm	0-5
%2 Fenolformaldehit Modifiye Bitüm	15-20
%3 PTFE Modifiye Bitüm	55-60
%0,1 Mg Abietat Bileşiği Modifiye Bitüm	15-20

Sonuçlar incelendiğinde en iyi adezyon %2-3 epoksi modifiye bitümde elde edilmiştir. Deneyde göz ile ve 5 ve 5’in katları şeklinde okuma yapılmıştır. Soyulmaya karşı mukavemetin minumum 50 olması istenilmektedir.



Şekil 11.22. Orjinal ve modifiye bitümlerin Nicholson soyulma deneyi sonuçları

Yüzey enerjisinin azalması, adezyonu artırmakta ve soyulmayı önlemektedir. Bu da asfalt betonunun mukavemetini artırmakta, suyun malzeme içerisine girmesini önlemektedir.

11.8. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Superpave Deneyi Sonuçları

Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlere, Superpave karışım tasarımının ön gördüğü, dönel viskozite, kısa dönem yaşlanma (RTFOT) ile uzun dönem yaşlanma (PAV) deneyleri ile RTFOT ve PAV uygulanmış bitümler üzerine dinamik kesme ve asfalt çubuk eğilme deneyleri uygulanmıştır. Çizelge 11.19’da deney sonuçları verilmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde modifiye bitümlerden elde edilen değerlerin Süperpave Şartnamesi sınırları içinde kaldığı görülmektedir.

Tekerlek izinin en aza inmesi için $G^*/\sin\delta$ değerleri şartnamede belirlenmiştir. 1 kPa dan ve 2,2 kPa dan yüksek değerler tekerlek izi oluşmasına direnç gösterme açısından tercih edilmektedir.

Elde edilen sonuçlardan orjinal bitüm için $G^*/\sin\delta$ değerleri incelendiğinde katkıların tümünün katkısız bitümün tekerlek izi oluşumunu azaltacağı görülmektedir. Karıştırma sırasındaki yaşlanmayı temsil eden RTFOT sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri incelendiğinde, katkısız bitüme göre epoksi reçine ve PTFE katkılarının tekerlek izini azalttığı, fenolformaldehit ve Mg abietat bileşiğinin şartname sınırları içinde olmasıyla birlikte pek etkilemediği görülmüştür.

PAV ile yaşlandırılmış ve yorulma çatlakları faktörü olan $G^*.\sin\delta$ değerleri şartnamede maksimum 5000 kPa olarak sınırlandırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde katkıların yorulma çatlaklarını azaltıcı etki gösterdiği ve %2’lik epoksi reçine ve PTFE ilavesinin yorulma çatlaklarına mukavemette en iyi sonucu verdiği görülmektedir.

Çizelge 11.19. Orjinal ve modifiye bitüm Superpave deney sonuçları

Bitüm	Bitüm Durumu	Uygulanan Test	Sonuç	Şartname Sınırları
Katkısız Bitüm	Orjinal	Viskozite, 135 °C 20 rpm, 18,6 SR	0,280 Pa.s	3 Pa.s
		DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C	0,99817 kPa	1 kPa (min)
	RTFOT Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C	2,3915 kPa	2,2 kPa (min.)
	PAV Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 25 °C	4099 kPa	5000 kPa (maks.)
		BBR 60 sn, -12 °C	S m	148 MPa 0,318
%2 Epoksi Modifiye Bitüm	Orjinal	Viskozite, 135 °C 20 rpm, 18,6 SR	0,435 Pa.s	3 Pa.s
		DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C	1,2223 kPa	1 kPa (min)
	RTFOT Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C	3,08655 kPa	2,2 kPa (min.)
	PAV Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 25 °C	3010 kPa	5000 kPa (maks.)
		BBR 60 s, -12 °C	S m	218 MPa 0,388
%3 Epoksi Modifiye Bitüm	Orjinal	Viskozite, 135 °C 20 rpm, 18,6 SR	0,405 Pa.s	3 Pa.s
		DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C	1,2136 kPa	1 kPa (min)
	RTFOT Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C	3,07905 kPa	2,2 kPa (min.)
	PAV Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 25 °C	3026 kPa	5000 kPa (maks.)
		BBR 60 s, -12 °C	S m	214 MPa 0,386
%2 Fenolformaldehit Modifiye Bitüm	Orjinal	Viskozite, 135 °C 20 rpm, 18,6 SR	0,385 Pa.s	3 Pa.s
		DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C	1,2536 kPa	1 kPa (min)
	RTFOT Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C	2,3303 kPa	2,2 kPa (min.)
	PAV Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 25 °C	3054 kPa	5000 kPa (maks.)
		BBR 60 s, -12 °C	S m	185 MPa 0,316
%3 PTFE Modifiye Bitüm	Orjinal	Viskozite, 135 °C 20 rpm, 18,6 SR	0,837 Pa.s	3 Pa.s
		DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C	1,535 kPa	1 kPa (min)
	RTFOT Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C	3,0933 kPa	2,2 kPa (min.)
	PAV Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 25 °C	2903 kPa	5000 kPa (maks.)
		BBR 60 s, -12 °C	S m	208 MPa 0,411

Çizelge 11.19. (Devam) Orjinal ve modifiye bitüm Superpave deney sonuçları

%0,1 Mg Abietat Bileşiği Modifiye Bitüm	Orjinal	Viskozite, 135 °C 20 rpm, 18,6 SR		0,285 Pa.s	3 Pa.s
		DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C		1,0917 kPa	1 kPa (min)
	RTFOT Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 64 °C		2,2467 kPa	2,2 kPa (min.)
	PAV Uygulanmış	DSR ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s, 25 °C		4070 kPa	5000 kPa (maks.)
		BBR 60 s, -12 °C	S	177 MPa	300 MPa (maks)
			m	0,328	0,300 (min)

Termal çatlakları temsil etmek üzere uygulanan ve sünme sertliğinin ölçüldüğü BBR deneyinde sünme sertliği Süperpave Şartnamesinde maksimum 300 MPa olarak sınırlandırılmıştır. Katkısız ve modifiye bitümlerin sünme sertliği değerleri şartname sınırlarında kalmıştır. Zamana karşı sünme sertliğinin değişimini ifade eden m değerleri ise şartnamede minimum 0,300 olarak sınırlandırılmış ve elde edilen sonuçlar yine şartname sınırları içerisinde kalmıştır. Katkıların zamanla bitümün sünme sertliği üzerindeki etkileri ise katkısız bitüme göre olumlu sonuçlar vermiştir.

11.9. Orjinal ve Modifiye Bitümlerin Marshall Stabilite Deneyi Sonuçları

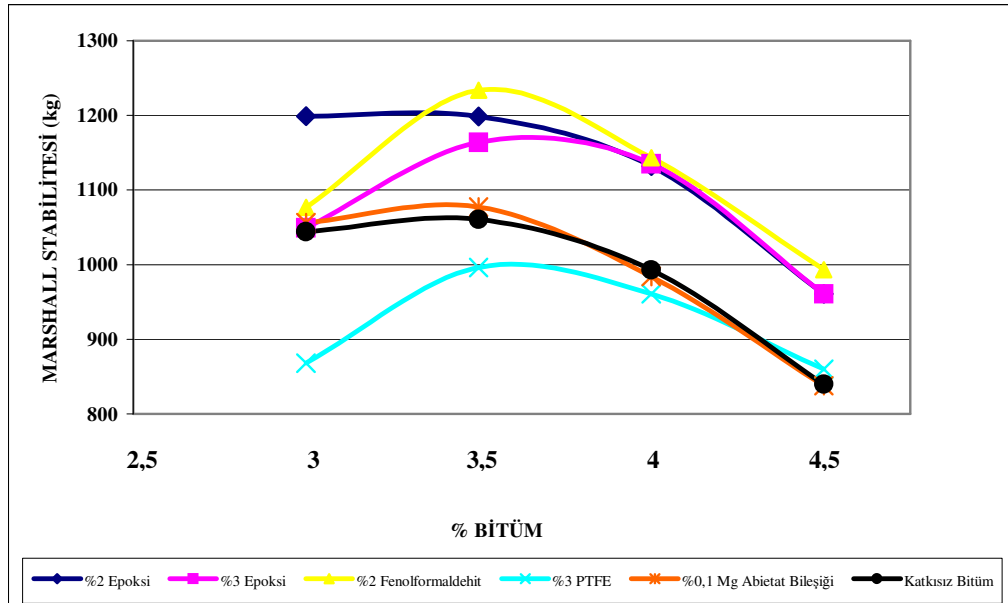
Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilitesi ve akma değerlerine ilişkin sonuçlar sırasıyla Şekil 11.23 ve Şekil 11.24’de verilmektedir.

Çizelge 11.20. Orjinal ve modifiye bitümlerin Marshall stabilite ve akma değerleri

	% Bitüm	Katkısız Bitüm	%2 Epoksi MB	%3 Epoksi MB	%2 Fenolformaldehit MB	%3 PTFE MB	%0,1 Mg Abietat Bileşiği MB
Marshall Stabilitesi (kg) (en az 750)	3	1044,05	1198,67	1049,25	1076,90	868,24	1056,40
	3,5	1060,78	1198,52	1163,72	1233,55	996,26	1077,17
	4	993,16	1131,95	1135,24	1143,10	960,82	984,29
	4,5	839,73	960,82	960,82	993,42	860,16	837,75
Akma (1/100") (8-16 arası)	3	12	11,333	9,833	7,333	11,5	12,2
	3,5	15,167	12,665	14,667	14,833	19,167	16,167
	4	18,167	15,4	18,833	16,333	18,667	18,567
	4,5	19	13	19,5	16,333	18,5	18,9

Bağlayıcı tabakası ve ağır trafikli yollara göre hazırlanan numunelerin test sonuçlarına bakıldığında polimer katkıların bitümün Marshall stabilitesini artırdığı, Mg abietat bileşinin ise pek fazla etkilemediği ve PTFE katkısının ise stabilite değerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Deneylerde oldukça kalitesiz bir agrega kullanılmıştır. Deneylerin aynı katkılar ile daha kaliteli agrega kullanılarak yapılması durumunda sonuçların çok daha iyi çıkacağı düşünülmektedir. Yine PTFE katkısı ile homojen bir karışım elde edilemeyeşinin PTFE modifiye bitüm test sonuçlarını etkilediği düşünülmektedir.

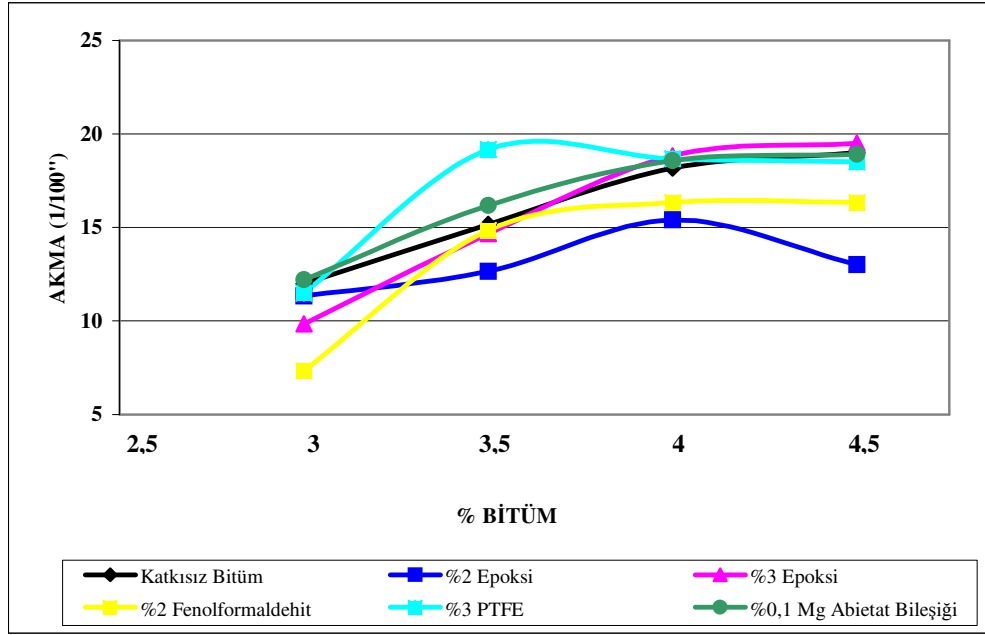
Akma değerlerinin ise genellikle Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen sınırlar içinde kaldığı görülmekte olup, katkıların bitümün akma değerini kısmen düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 11.23. Orjinal ve modifiye bitümlerin Marshall stabilite değerleri

Şekil 11.23 incelendiğinde %2 ile 3 epoksi reçine ve %2 fenolformaldehit reçinenin bitümün stabilitesini belirgin şekilde artırdığı görülmektedir. Dolayısıyla bu katkılar ile hazırlanan kaplamanın trafik yükleri altında oluşacak tekerlek izi ve çökmeler gibi deformasyonlara karşı daha fazla direnç gösterecektir. Karışımın stabilitesi agregalar

arasındaki içsel sürtünmeye ve bağlayıcının kohezyonuna bağlıdır. Dolayısıyla katkıları bitümün kohezyonunu artırarak stabiliteyi de artırmış olmaktadır. Grafikten görüleceği üzere %3,5 bitüm miktarında maksimum stabilite elde edilmiştir.



Şekil 11.24. Orjinal ve modifiye bitümlerin akma değerleri

Grafik 11.24 incelendiğinde ise stabilite değerleri yüksek çıkan katkılarda da akma miktarlarının genel olarak kısmen azaldığı görülmektedir. Malzemenin elastik davranıştan plastik davranışa geçtiği nokta olarak tanımlanan akma sınırı plastik deformasyonu temsil etmektedir. Bitüm miktarı arttıkça akma artmaktadır.

12. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

Çalışmada orjinal ve modifiye bitümlere geniş bir deney seti uygulanmıştır. Bitümün sıcaklığa duyarlı oluşu ve sıcaklık etkilerinin viskozitesini değiştirmesi ve viskozitedeki bu değişimlerin kaplamada tekerlek izi ve çatlak gibi önemli sorunlara neden olması sebebiyle, orjinal ve modifiye bitümlere uygulanan viskozite testlerinden elde edilen sonuçlar diğer deney setlerinde esas alınarak çalışmalar yürütülmüştür. Ayrıca, %2 epoksi reçine katkılı modifiye bitüm ile %3 epoksi reçine katkılı modifiye bitümün viskozite testlerinden elde edilen sonuçlar yakın olduğundan, %3 epoksi reçine katkılı modifiye bitüme de diğer testler uygulanmış, ancak %2 epoksi reçine katkılı bitümlerin kısmen daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiş ve ekonomik açıdan da %2 epoksi reçine katkı miktarı optimum katkı miktarı olarak alınmıştır. Sonuçlara ilişkin özet bilgiler Çizelge 12.1’de verilmiştir.

Çizelge 12.1. Katkı maddeleri ve etkileri

Katkı Maddesi Türü	Optimum %	Bitüm Modifikasyonu	Karışım Stabiliteeri	Tavsiye Edilen Kullanım Alanları
Epoksi Reçine	2	Viskozitede artış, penetrasyonda düşüş, yumuşama noktasında artış, ısıya duyarlılıkta azalış, camsı geçiş sıcaklığında artış, yüzey enerjisinde düşüş, tekerlek izine ve yorulma çatlaklarına dirençte artış	Soyulma mukavemetinde artış, stabilitede artış	Sıcak iklim bölgeleri, yağışlı iklim bölgeleri, ağır trafikli yollar, virajlar, otoyollar, park alanları
Fenolformaldehit Reçine	2	Viskozitede artış, penetrasyonda artış, yumuşama noktasında artış, ısıya duyarlılıkta azalış, camsı geçiş sıcaklığında artış, yüzey enerjisinde düşüş, tekerlek izine ve yorulma çatlaklarına dirençte artış	Soyulma mukavemetinde artış, stabilitede artış	Sıcak iklim bölgeleri, yağışlı iklim bölgeleri, ağır trafikli yollar, virajlar, otoyollar, park alanları

Çizelge 12.1. (Devam) Katkı maddeleri ve etkileri

Politetrafloretillen (PTFE)	3	Viskozitede artış, penetrasyonda artış, yumuşama noktasında azalış, ısıya duyarlılıkta artış, camsı geçiş sıcaklığında artış, yüzey enerjisinde artış, tekerlek izine ve yorulma çatlaklarına dirençte artış	Soyulma mukavemetinde azalış, stabilitede azalış	Sıcak iklim bölgeleri, çeşitli izolasyonlar
Mg Abietat Bileşiği	0,1	Penetrasyonda artış, yumuşama noktasında azalış, ısıya duyarlılıkta artış, camsı geçiş sıcaklığında artış, yüzey enerjisinde düşüş, tekerlek izine dirençte kısmen artış	Soyulma mukavemetinde artış, stabilitede kısmen artış	Soğuk iklim bölgeleri, yağışlı iklim bölgeleri, hafif trafikli yollar

12.1. Epoksi Reçine Modifiye Bitümün Değerlendirilmesi

Epoksi reçine katkısının bitümün viskozitesini yüksek sıcaklıklarda (karışım proses sıcaklığında) pek etkilemediği, düşük sıcaklıklarda (kullanım sıcaklıklarında) ise düşük miktarlardaki katkı ilavesinde viskoziteyi artırdığı, yüksek miktarlardaki katkı ilavesinde ise azalttığı tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda viskoziteyi artırmaması, plant tesisindeki prosesi zorlaştırmamakta, agrega bitüm işleminde herhangi bir sakınca yaratmamaktadır. Düşük sıcaklıklarda da katkı maddesi ile viskozitenin artması asfalt betonunun sıcak çevre şartlarında tekerlek izi oluşumunu önleyecektir.

Epoksi reçine modifiye bitümde en çok viskozite artışı ağırlıkça %2'lik katkıda sağlanmıştır. %3'lük katkı miktarında da yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bitümün agrega ile karıştırma sıcaklığı olan proses sıcaklığını, viskozite artışına rağmen pek fazla yükselmediği (katkı maddesi yüksek sıcaklıklarda viskozitesini önemli ölçüde artırmamaktadır) ve karıştırma sırasında meydana gelen bitümün yaşlanmasına da olumsuz etki yaratmayacağı değerlendirilmektedir. Literatürde SBS katkısı ile

yapılan çalışmada yüksek sıcaklıklarda katkı miktarı arttıkça viskozitenin arttığı tespit edilmiştir [60].

Ağırlıkça %2 ve %3'lük epoksi reçine modifiye bitümün penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri orjinal bitüm ile karşılaştırıldığında penetrasyon değerinin düştüğü ve yumuşama noktası değerinin arttığı görülmektedir. Polyolefin ve EVA katkılarının da bitümün penetrasyon değerini düşürdüğü ve yumuşama noktası değerini artırdığı bilinmektedir [58, 69].

Penetrasyon değerinin yükselmesi bitümün daha yumuşak bir kıvam alması demektir. Bunun tam tersi penetrasyonun azalması bitümün daha sert hal alması anlamındadır. Nitekim viskozite test sonuçlarına göre katkının bitümün viskozitesini artırmasından dolayı penetrasyonun azalması beklenen bir durumdur. Bitümün ısıya duyarlılığının göstergesi olan penetrasyon indisi hesaplandığında ise katkısız bitümün -0,902, %2 epoksi reçine katkılı modifiye bitümün ise -0,488 olarak bulunmuştur. Bu durumda epoksi reçinesi bitümün penetrasyon indisini yani ısıya duyarlılığını yaklaşık %46 oranında azaltmış bulunmaktadır.

Yumuşama noktasında ise yaklaşık 3 °C'lık bir artış görülmektedir. Yumuşama noktasının çok fazla azalması istenilmeyen bir durumdur. Çünkü yumuşama noktası yüksek bağlayıcıların kullanıldığı karışımlarda tekerlek izi etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olduğu görülmektedir [25]. Dolayısıyla epoksi reçine modifiye bitüm ile hazırlanan karışımlarda tekerlek izi etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olması beklenmektedir.

%2'lik epoksi reçine katkısı bitümün camsı geçiş sıcaklığını yaklaşık 11°C artırdığı tespit edilmiştir. Literatürde de polyefinlerin bitümün camsı geçiş sıcaklığını artırdığı ve polimer miktarı arttıkça camsı geçiş sıcaklığının arttığı [79], SBS'nin ise bitümün camsı geçiş sıcaklığını düşürdüğü [85] belirtilmektedir. Dolayısıyla %2'lik katkı ile daha kararlı, stabil bir kaplama hazırlanabileceği düşünülmektedir. Ancak, epoksi reçineye dolgu malzemesi olarak kullanılan uçucu kül ve artık araba lastiğinin epoksi reçinenin camsı geçiş sıcaklığını pek etkilemediği, ayrıca dolgulu epoksi reçinenin

bitüme ilavesinde bitümün camsı geçiş sıcaklığını düşük dolgu miktarlarının pek etkilemediği, yüksek dolgu miktarlarının ise dolgunsuz epoksi reçine modifiye bitüme göre camsı geçiş sıcaklığını azalttığı tespit edilmiştir.

Yapılan yüzey enerjisi testlerinde ise epoksi reçinenin bitüm yüzey enerjisini düşürdüğü tespit edilmiştir. Nitekim Nicholson soyulma deneyi sonuçlarında katkının soyulma mukavemetini %90-100 oranında artırdığı (soyulma oranı %0-5) sonuçları elde edilmiştir. Bu durumda özellikle yağışlı bölgelerde epoksi reçine modifiye bitümlerin kaplama malzemesi olarak kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

Superpave deneyleri sonucunda ise epoksi reçine modifiye bitüm Süperpave Şartnamesi sınırları içinde kaldığı tespit edilmiştir. %2'lik epoksi reçine ilavesinin katkısız bitümün tekerlek izi oluşumunu yaklaşık %22 oranında azalttığı, karıştırma prosesi sonrası yaşlanmış bitümün tekerlek izi oluşumunu ise yaklaşık %29 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Bu durumda %2'lik epoksi reçine ilavesinin orjinal bitümün hem karıştırma işlemi sırasında yaşlanma direncini artıracığı hem de tekerlek izi oluşumunu azaltacağı görülmektedir. Yorulma çatlaklarını temsil eden değerler incelendiğinde ise %2'lik epoksi reçine ilavesinin katkısız bitüme göre yorulma çatlaklarını yaklaşık %27 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Termal çatlaklar açısından ise epoksi reçine modifiye bitüm Süperpave şartnamesi sınırları içerisinde kalmıştır.

Marshall stabilite sonuçlarına bakıldığında ise %2 ve %3 epoksi reçine modifiye bitümün katkısız bitüme göre stabiliteyi artırdığı ve akma değerlerinin Karayolları Teknik Şartnamesi sınırları içinde kaldığı tespit edilmiştir. En çok stabilite artışı ise %3 ve 3,5'lik bitümlü karışımda elde edilmiştir. %2'lik epoksi reçine ilavesinin stabiliteyi yaklaşık %13 oranında artırdığı görülmektedir. Agregalı malzemesi olarak daha kaliteli olan bazalt kullanılması durumunda stabilitenin daha da artacağı düşünülmektedir. Bu konuda farklı agregalar ile deneysel çalışmalar yapılması önerilmektedir. Literatürde de yapılan Marshall deneylerinde polimer modifiye

bitümler ile hazırlanan numunelerin stabiliteleri katkısız bitümler ile hazırlanan numunelerin stabilitelerinden daha yüksek bulunmuştur [71, 87].

Bu sonuçlar ışığında epoksi reçine modifiye bitümün sıcak iklim bölgelerinde, yağışlı iklim bölgelerinde, ağır trafikli yollarda, virajlar, otoyollar ve park alanları gibi yerlerde kaplama malzemesi olarak kullanılmasının uygun olacağı önerilmektedir.

12.2. Fenolformaldehit Reçineli Modifiye Bitümün Değerlendirilmesi

Epoksi reçineli modifiye bitümlere benzer durum fenolformaldehit reçineli modifiye bitümde de görülmektedir. Katkının bitümün viskozitesini yüksek sıcaklıklarda (karışım proses sıcaklığında) %2'lik ilave hariç pek etkilemediği, %2'lik ilavede de viskozite artışının yüksek sıcaklıklarda çok küçük olduğu, düşük sıcaklıklarda (kullanım sıcaklıklarında) ise %2'lik katkı ilavesinin viskoziteyi artırdığı, yüksek miktarlardaki katkı ilavesinde ise azalttığı tespit edilmiştir.

Fenolformaldehit katkısını da bitümün agrega ile karıştırma sıcaklığı olan proses sıcaklığını, viskozite artışına rağmen pek fazla yükseltmediği (katkı maddesi yüksek sıcaklıklarda viskozitesini önemli ölçüde artırmamaktadır) ve karıştırma sırasında meydana gelen bitümün yaşlanmasına da olumsuz etki yaratmayacağı değerlendirilmektedir.

Ayrıca, fenolformaldehit reçinesi ile zamanla daha yumuşak, şertleşmemiş yani yaşlanmamış bitüm elde edilmiştir. Bu da çok ucuz olan fenolformaldehit reçinesinin yaşlanmış bitümlerin kullanımını sağlamaya yönelik katkı maddesi olarak da kullanılabileceği ve düşük viskozite gereken yerlerde (soğuk iklim bölgeleri) birkaç hafta bekletilmiş modifiye bitümlerin kullanılabileceği düşünülmektedir.

Yine düşük sıcaklıklarda yani soğuk iklim bölgelerinde de bekletilmiş fenolformaldehit reçinesi modifiye bitümün kullanılmasının düşük ısı çatlaklarını önleyebileceği değerlendirilmektedir. Çünkü yaşlanmış bitümün kullanıldığı

karışımlar yük ve çevre etkilerinden doğan kuvvetlere esneklik gösterememekte ve kırılgan hale gelip çatlayabilmektedir. Çatlayan noktalardan giren suda soyulmayı hızlandırmaktadır.

Kütlece %2'lik fenolformaldehit reçine modifiye bitümün penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri orjinal bitüm ile karşılaştırıldığında penetrasyon değerinin ve yumuşama noktası değerini etkilemediği, yaklaşık 1-2 derecelik artışlar olduğu görülmektedir.

Penetrasyon değerinin yükselmesi bitümün daha yumuşak bir kıvam alması demektir. Bitümün ısıya duyarlılığının göstergesi olan penetrasyon indisi hesaplandığında ise katkısız bitümün $-0,902$, %2 fenolformaldehit reçine katkılı modifiye bitümün ise $-0,399$ olarak bulunmuştur. Bu durumda fenolformaldehit reçinesi bitümün penetrasyon indisini yani ısıya duyarlılığını yaklaşık %56 oranında azaltmış bulunmaktadır.

Yumuşama noktasında ise yaklaşık $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lık bir artış görülmektedir. Yumuşama noktasının çok fazla azalması istenilmeyen bir durumdur. Çünkü yumuşama noktası yüksek bağlayıcıların kullanıldığı karışımlarda tekerlek izi etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olduğu görülmektedir [25]. Dolayısıyla fenolformaldehit reçine modifiye bitüm ile hazırlanan karışımlarda tekerlek izi etkisiyle oluşan deformasyonların kısmen daha az olması beklenmektedir.

%2'lik fenolformaldehit reçine katkısı bitümün camsı geçiş sıcaklığını yaklaşık 2°C artırdığı tespit edilmiştir.

Yapılan yüzey enerjisi testlerinde ise fenolformaldehit reçinenin bitüm yüzey enerjisini düşürdüğü tespit edilmiştir. Nicholson soyulma deneyi sonuçlarında katkının soyulma mukavemetini %60-70 oranında artırdığı (soyulma oranı %15-20) sonuçları elde edilmiştir.

Superpave deneyleri sonucunda ise fenolformaldehit reçine modifiye bitüm Süperpave Şartnamesi sınırları içinde kaldığı tespit edilmiştir. %2'lik fenolformaldehit reçine ilavesinin katkısız bitümün tekerlek izi oluşumunu yaklaşık %26 oranında azalttığı, RTFOT sonrası yaşlanmış bitümün tekerlek izi oluşumunu ise pek etkilemediği tespit edilmiştir. Yorulma çatlaklarını temsil eden değerler incelendiğinde ise %2'lik fenolformaldehit reçine ilavesinin katkısız bitüme göre yorulma çatlaklarını yaklaşık %25 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Termal çatlaklar açısından ise fenolformaldehit reçineli modifiye bitümden elde edilen sonuçlar Süperpave Şartnamesi sınırları içerisinde kalmıştır. Böylece özellikle yaz aylarında daha da artan kaplamanın deformasyona uğrama yatkinliğinin azaltılması ve trafik yüklerinin aşırı tekrarı nedeniyle değişen gerilme altında meydana gelen kırılmalar azaltılmış olacaktır. Bu kırılan bölgelerden suyun girişi ve soyulma gibi olumsuzluklar da engellenmiş olacaktır.

Marshall stabilite sonuçlarına bakıldığında ise %2 fenolformaldehit reçine modifiye bitümün katkısız bitüme göre stabiliteyi artırdığı ve akma değerlerinin hemen hemen Karayolları Teknik Şartnamesi sınırları içinde kaldığı tespit edilmiştir. En çok stabilite artışı ise %3,5'lik fenolformaldehit katkılı bitümlü karışımda elde edilmiştir. %2'lik fenolformaldehit ilavesinin stabiliteyi yaklaşık %16 oranında artırdığı görülmektedir. Agrega malzemesi olarak daha kaliteli olan bazalt kullanılması durumunda stabilitenin daha da artacağı düşünülmektedir. Bu konuda farklı agregalar ile deneysel çalışmalar yapılması önerilmektedir.

Bu sonuçlar ışığında fenolformaldehit modifiye bitümün sıcak iklim bölgelerinde, ağır trafikli yollarda, virajlar, otoyollar ve park alanları gibi yerlerde kaplama malzemesi olarak kullanılmasının uygun olacağı önerilmektedir.

Ayrıca viskozite düşmesi sonuçlarını elde ettiğimiz kürlendirilmiş fenolformaldehit modifiye bitümlere benzer çalışmaların yapılması önerilmekle birlikte, soğuk iklim bölgelerinde kullanılması durumunda düşük ısı çatlaklarını ve kırılmaları önleyebileceği ve kullanılmış (yaşlanmış) bitümlerin kullanımına olanak sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

12.3. PTFE Modifiye Bitümün Değerlendirilmesi

PTFE'nin erime ısısının çok yüksek oluşu ve katı halde bitüme ilave edilmesiyle bitümün modifiyesinde tamamen homojen bir karışım elde edilememiştir. Bununla birlikte elde edilen sonuçların değerlendirilmesi aşağıdaki paragraflarda verilmiştir.

Katkının bitümün viskozitesini hem düşük, hem de yüksek sıcaklıklarda katkı miktarı arttıkça çok fazla artırttığı görülmektedir.

Kütlece %3'lik PTFE modifiye bitümün penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri orjinal bitüm ile karşılaştırıldığında penetrasyon değerini ve yumuşama noktası değerini pek fazla etkilemediği görülmektedir.

Bitümün ısıya duyarlılığının göstergesi olan penetrasyon indisi hesaplandığında ise katkısız bitümün $-0,902$, %3 PTFE katkılı modifiye bitümün ise $-1,022$ olarak bulunmuştur. Bu durumda PTFE bitümün penetrasyon indisini yani ısıya duyarlılığını yaklaşık %13 oranında artırmış bulunmaktadır.

Yumuşama noktasında ise yaklaşık $0,6^{\circ}\text{C}$ 'luk bir azalış görülmektedir. Yumuşama noktasının çok fazla azalması istenilmeyen bir durumdur. Çünkü yumuşama noktası yüksek bağlayıcıların kullanıldığı karışımlarda tekerlek izi etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olduğu görülmektedir.

%3 PTFE katkısı bitümün camsı geçiş sıcaklığını yaklaşık 16°C artırdığı tespit edilmiştir.

Yapılan yüzey enerjisi testlerinde ise PTFE'nin bitümün yüzey enerjisini düşürmediği tespit edilmiştir. Nicholson soyulma deneyi sonuçlarında da katkının soyulma mukavemetini %10-20 oranında azalttığı (soyulma oranı %55-60) sonuçları elde edilmiştir.

Superpave deneyleri sonucunda ise PTFE modifiye bitümün Süperpave Şartnamesi sınırları içinde kaldığı tespit edilmiştir. Şartname sınırları içinde kalmakla birlikte, %3'lük PTFE ilavesinin katkısız bitümün tekerlek izi oluşumunu yaklaşık %54 oranında azalttığı, karıştırma prosesi sonrası yaşanmış bitümün tekerlek izi oluşumunu ise yaklaşık %29 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Yorulma çatlaklarını temsil eden değerler incelendiğinde ise %3'lük PTFE ilavesinin katkısız bitüme göre yorulma çatlaklarını yaklaşık %2,5 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Termal çatlaklar açısından ise PTFE modifiye bitümden elde edilen sonuçlar şartname sınırları içerisinde kalmıştır.

Marshall stabilite sonuçlarına bakıldığında ise %3 PTFE modifiye bitümün katkısız bitüme göre stabiliteyi azalttığı ve akma değerlerin de artış sağladığı görülmektedir.

Bu sonuçları PTFE modifiye bitüm hazırlanmasında homojen bir karışım elde edilememesinin etkili olduğu düşünülmekte olup, PTFE'nin modifiye bitüm eldesinde katkı maddesi olarak kullanılması uygun görülmemektedir. Ancak, homojen karışım elde edilebilecek bir sistem sağlanabilirse sonuçların PTFE polimerinin özelliklerini kısmen yansıtacak şekilde daha iyi sonuçlar alınacağı düşünülmektedir. Ayrıca, bitümün yüksek viskozite gerektiren kullanım alanlarında (çeşitli izolasyonlar gibi) PTFE modifiye bitümün kullanımının daha iyi sonuçlar yaratabileceği de düşünülmekte olup, bu konuda çalışmalar yapılması önerilmektedir.

12.4. Mg Abietat Bileşiği ile Modifiye Bitüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Viskozite test sonuçlarından katkının bitümün viskozitesini pek etkilemediği tespit edilmiştir. Dolayısıyla katkı maddesi orjinal bitümün karışım proses ve hizmet sıcaklığında akışkanlığında değişiklik göstermeyecektir.

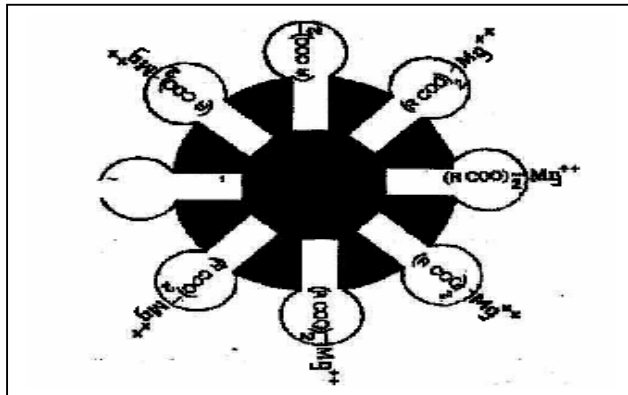
Kütlece %0,1'lik Mg abietat bileşiği modifiye bitümün penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri orjinal bitüm ile karşılaştırıldığında penetrasyon değerinin artırdığı ve yumuşama noktası değerini ise azalttığı görülmektedir.

Penetrasyon değerinin yükselmesi bitümün daha yumuşak bir kıvam alması demektir. Bitümün ısıya duyarlılığının göstergesi olan penetrasyon indisi hesaplandığında ise katkısız bitümün $-0,902$, %0,1 Mg abietat bileşiği modifiye bitümün ise $-1,097$ olarak bulunmuştur. Bu durumda Mg abietat bileşiği bitümün penetrasyon indisini, yani ısıya duyarlılığını yaklaşık %22 oranında artırmış bulunmaktadır.

Yumuşama noktasında ise yaklaşık $2,6^{\circ}\text{C}$ 'lık bir azalış görülmektedir. Yumuşama noktasının çok fazla azalması istenilmeyen bir durumdur. Çünkü yumuşama noktası yüksek bağlayıcıların kullanıldığı karışımlarda tekerlek izi etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, bu özelliklerle çok düşük sıcaklıklarda kırılmalara ve çatlamalara yol açan asfalt betonların modifikasyonunda kullanılabileceğini göstermektedir.

%0,1'lik Mg abietat bileşiği katkısı bitümün camsı geçiş sıcaklığını yaklaşık $3,5^{\circ}\text{C}$ artırdığı tespit edilmiştir.

Yapılan yüzey enerjisi testlerinde ise Mg abietat bileşiğinin bitümün yüzey enerjisini yaklaşık 2 kat düşürdüğü tespit edilmiştir. Nicholson soyulma deneyi sonuçlarında katkının soyulma mukavemetini ise %60-70 oranında artırdığı (soyulma oranı %15-20) sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 12.1. Mg katkısının bağlanma mekanizması

Mg abietat bileşiği, bitümün apolar yapıdaki yüzeyine polar özellik kazandırarak polar yapıdaki agrega ile adezyonunu artırmaktadır. Yani bir ucu apolar maddeye doğru çekilen, diğer ucu polar madde tarafından çekilen anyonik yüzey aktif madde görevi yapmıştır (Şekil 12.1). Benzer şekilde Mn bileşiğinin de bitümün agrega ile adezyonunu artırdığı ve soyulmaya mukavemetini yükselttiği bilinmektedir [29].

Superpave deneyleri sonucunda ise Mg abietat bileşiği modifiye bitüm Süperpave Şartnamesi sınırları içinde kaldığı tespit edilmiştir. Şartname sınırları içinde kalmakla birlikte, %0,1'lik Mg abietat bileşiği ilavesinin katkısız bitümün tekerlek izi oluşumunu ($G^* \sin \delta$) yaklaşık %9 oranında azalttığı, karıştırma prosesi sonrası yaşlanmış bitümün tekerlek izi oluşumunu ise yaklaşık %6 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Yorulma çatlaklarını temsil eden değerler incelendiğinde ise %0,1 Mg abietat bileşiği ilavesinin katkısız bitüme göre yorulma çatlaklarının oluşumunu pek değiştirmedığı tespit edilmiştir. Termal çatlaklar açısından ise Mg abietat bileşiği şartname sınırları içerisinde kalmıştır.

Marshall stabilite sonuçlarına bakıldığında ise %0,1 Mg abietat bileşiği modifiye bitümün katkısız bitüme göre stabiliteyi %3-3,5 bitüm yüzdelerinde çok az artırmış, %4-4,5 bitüm yüzdelerinde ise çok az azaltmıştır. Literatürde yapılmış çalışmada ise Mn katkı maddesinin de stabiliteyi çok az düşürdüğü tespit edilmiştir [29]. Mg abietat bileşiği katkısı bitümün akma değerlerini önemli önemli ölçüde etkilememiştir. Agrega malzemesi olarak daha kaliteli olan bazalt kullanılması durumunda stabilitenin artabileceği düşünülmektedir. Bu konuda farklı agregalar ile deneysel çalışmalar yapılması önerilmektedir.

Bu sonuçlar ışığında Mg abietat bileşiği modifiye bitümün yağışlı ve düşük sıcaklıklı bölgelerde ve hafif trafikli yollarda kaplama malzemesi olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, literatürde çinko dialkilditiyofosfat ile yapılmış bir çalışmada katkı maddesi ile bitümün yaşlanma direnci geliştirilmiştir [92]. Mg abietat bileşiği ile benzer bir çalışma yapılabileceği ve bitümün yaşlanma direncini geliştirebileceği de düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K., “Asfalt ve Uygulamaları”, *İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.*, İstanbul, 37-46, 91-97 (2001).
2. Whiteoak, D., “Shell Bitüm El Kitabı”, Editörleri, **Abdullah Hilmi Lav, M. Ayşen Lav**, *İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.*, İstanbul, 33-34, 47, 50, 101-114, 123, 133-136, 148, 150-159 (2004).
3. TS 1081 EN 12591, “Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar- kaplama sınıfı bitümler- özellikler”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2004).
4. Kaşak, S., Orhan, F., Eribol, S., Güngör, A. G., “Yeni bitüm standardı”, **4. Ulusal Asfalt Sempozyumu**, Ankara, 405-413 (2004).
5. Kuleli, Ö., “Yağlama yağı, vaks ve asfalt”, “Petrol Arıtım Teknolojisi”, *Çağlayan Kitapevi*, İstanbul, 201-202 (1981).
6. Ertekin, S. B., “Polyefin katkıların asfaltın kıvamı ve yumuşama noktasına etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 19-52 (2003).
7. Tunç, A., “Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı”, *Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti.*, Ankara, 54, 98, 104-115, 125-127, 163-168, 206-215 (2004).
8. Sybilski, D., “Relationship between absolute viscosity of polymer modified bitumens and rutting resistance of pavement”, *Material and Structures*, 27, 110-120 (1994).
9. Orhan, F., “Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları”, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara, 10-24 (2005).
10. TS 118 EN 1426, “Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar –İğne Batma Derinliği Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2002).
11. Keçeciler, A. F., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A., Gökçe, A.F., “Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı”, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara, 37-54 (1990).
12. Dinç, E., “Superpave”, *TCK 16. Bölge Müdürlüğü*, Sivas, 11-31 (2000).
13. Dinç, E., Yazıcı, A., “Superpave bitüm deneyleri ve agrega gradasyonu”, **3. Asfalt Sempozyumu**, Ankara, 161-172 (2000).

14. Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, Superpave Series No. 1 (SP-1); *Asphalt Institute*, Kentucky, (1994).
15. TS 120 EN 1427, “Bitümler ve Bitümü Bağlayıcılar-Yumuşama Noktası Tayini-Halka ve Bilya Metodu”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2002).
16. Kutluhan, S., Açar, E., “Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunun incelenmesi”, *4. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 213-223 (2004).
17. Özgan, E., Kap, T., “Asfalt çimentolarında bekleme süresi ve ortam sıcaklığının düktüliteye etkisi”, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (1): 43-47 (2005).
18. TS EN 13398, “Bitümlü Maddelerin Düktülite Deneyi İçin Metod”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2005).
19. TS 1090 EN 12592, “Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar-Çözünürlük Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002).
20. TS EN 12607-2, “Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar-Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini-Bölüm 2: TFOT (Etüvde İnce Film Deneyi) Yöntemi”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2003).
21. TS 1080, “Sıvılar-Parlama ve Yanma Noktası Tayini-Tag Açık Kap Cihazı ile”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (1993).
22. TS EN ISO 2592, “Petrol Ürünleri-Parlama ve Yanma Noktası Tayini-Cleveland Açık Kap Metodu”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2006).
23. TS 1171, “Parlama Noktası Tayini-Tag Kapalı Lap Cihazı ile”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2006).
24. Balta, İ., “Bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı duyarlılığı”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 51-52, 83 (2004).
25. Asphalt Institute, Mix Design Methods For Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types, *Asphalt Institute*, Manual Series No.2 (MS-2) Kentucky, (1996).
26. Ünal, E. N., “Asfaltın kalite özelliklerinin katkı maddesi ile iyileştirilmesi”, Doktora Tezi, *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 31-36 (1997).
27. Hefer, A., Little, D., “Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond”, *Texax Transportation Institute*, Texax, 53-69 (2005).
28. Van Oss, C. J., “Interfacial forces in aqueous media”, *Marcel Dekker Inc.*, New York, 355-400 (1994).

29. Gürü, M., "Improvement of adhesion of bitumen-aggregate coatings by additives", *Cellulose Chem. Technol.*, 38 (1-2): 129-140 (2004).
30. Şengöz, B., Ağar, E., "Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına etkisi", *İTÜ Dergisi*, 4 (1), 71-82 (2005).
31. Çubuk, M. K., "Karayolları üstyapısında meydana gelen bozunmalar ve çözüm önerileri", *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14 (1): 221-230 (2001).
32. Kuloğlu, N., Kök, B. V., Öndaş, M., "Sathi kaplamalarda kasma olayına etki eden faktörler", ", **4. Ulusal Asfalt Sempozyumu**, Ankara, 141-148 (2004).
33. Çakıroğlu, M., "Esnek üstyapıda oluşan bozulmalar", **1. Ulusal Asfalt Sempozyumu**, İstanbul, 154-163 (1996).
34. Little, D. N., Epps, J. A., "The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt", *National Lime Association and The Versalite Chemical*, Washington D.C., 7-14 (2001).
35. Curtis, C. W., Ensley, K., Epps, J., "Fundemental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption", **SHRP-A-341, Strategic Highway Research Program**, Washington D.C., 56-58 (1993).
36. Lee, D. Y., Dunning, R. L., "Absorption of asphalt into prous aggregates", **SHRP-A/UIR-90-009, Strategic Highway Research Program**, Washington D.C., 4-7 (1990).
37. Alataş, A., Ahmedzade, P., Doğan, Y., "Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agrega cinsinin kaplamanın fiziksel özelliklerine etkisi", *Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bil. Der.*, 18 (1): 79-89 (2006).
38. Kurtis, K., "Asphalt and asphalt concerete", *Georgia Institute Tecnology*, Altanta-Georgia, 14-18 (2003).
39. Önal, M. A., Kahramangil, M., "Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı", *Karayolları Genel Müdürlüğü*, 26-30 (1993).
40. Skok, E. A., Chadbourn, B.A., Crow, B. L., Spindler, S., "The effect of voids in mineral aggregate (VMA) on hot-mix asphalt pavements", **MN/RC 2000-13, Minnesota Department of Transportation Research Service, Minnesota**, 1-13 (2000).
41. Çelik, O. N., "Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği", ", **4. Ulusal Asfalt Sempozyumu**, Ankara, 181-187 (2004).
42. Uluçaylı, M., "Modifiye bitüm ve modifikasyon katkıların kullanımı", **2. Ulusal Asfalt Sempozyumu**, Ankara, 15-18 (1998).

43. Harold, R., Paul, P. E., Chris, P. E., "Pavement distress", *Technical Assistance Report, Louisiana Transportation Research Center, Louisiana*, 12-16 (1995).
44. Dodd, W. J., Tonge, K.H., "Termal Yöntemler", Çeviri Editörü, *Baki Erdoğan*, Ankara, 1-11, 26-27, 94-100, 144-146 (2003).
45. Basan, S., "Polimer kimyası", *Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları*, Sivas, 10-26, 157, 217-225 (2001).
46. Gonzales, O., Munoz, M. E., Santamaria, A., Garcia-Morales, M., Navarro, F. J., Partal, P., "Rheology and stability of bitumen/EVA blends", *European Polymer Journal*, 40 (10): 2365-2372 (2004).
47. Jin, H., Gao, G., Y., Zhang, Y., Zhang, Sun, K., Fan, Y., "Improved properties of polystyrene-modified asphalt through dynamic vulcanization", *Polymer Testing*, 21 (6): 633-640 (2002).
48. Gürü, M., Tekeli, S., Çubuk, M. K., Çubuk, M., "Recycling of scrap vehicle tyre as elastic surface material", *The First Jordanian International Conference of Materials Science and Engineering*, Jordan, 39-44 (2005).
49. Stastna, J., Zanzotto, L., Vacin, O. J., "Viscosity function in polymer-modified asphalts", *Journal of Colloid and Interface Science*, 259: 200-207 (2003).
50. Lu, X., Isacsson, U., Ekblad, J., "Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures", *Materials and Structures*, 36: 652-656 (2003).
51. Nadkarni, V. M., Shenoy, A. V., Mathew, J., "Thermomechanical behavior of modified asphalts", *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, 24: 478-484 (1985).
52. Yalçın, H., Gürü, M., "Malzeme Bilgisi", *Palme Yayıncılık*, Ankara, 280-284, 296-300, 308, 319, 330-331 (2002).
53. Lu, X., Isacsson, U., "Modification of road bitumens with thermoplastic polymers", *Polymer Testing*, 20 (1): 77-86 (2000)
54. Daly, H. W., Qui, Z., Negulescu, I., "Preparation and characterization of asphalt-modified polyethylene blends", *Transportation Research Record*, 1391: 56-64 (1993).
55. Wen, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Sun, K., Chen, Z., "Vulcanization characteristics of asphalt/SBS blends in the presence of sulfur", *Journal of Applied Polymer Science*, 82: 989-996 (2001).

56. Wen, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Sun, K., Fan, Y., "Improved properties of SBS-modified asphalt with dynamic vulcanization", *Polymer Eng. And Science*, 42 (5): 1070-1081 (2002).
57. Gahvari, F., "Effects of thermoplastik block copolymers on rheology of asphalt", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9: 11-116 (1997).
58. Topal, A., Şengöz, B., Metli, M., "Polyolefin katkıli bitümlü bağlayıcıların kıvamı ve yumuşama noktasına etkileri", *4. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 70-79 (2004).
59. İnternet: Aksoy, A., "Bitümün reolojik yapısının bitümün yaşlanmasına ve kaplamanın performansına olan etkisinin incelenmesi", <http://www.trafik.gov.tr/icerik/C2-17.doc> (2000).
60. Eribol, S., Orhan, F., "Elastomerlerle modifiye edilmiş bitümlerin özellikleri", *4. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 80-93 (2004).
61. Vonk, W., Korenstra, J., "Geliştirilmiş sathi kaplamalar için SBS modifiye bitüm emülsiyonu", *4. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 106-116 (2004).
62. Bouldin, M. G., Collins, J. H ., Berker, A., "Rheology and microstructure of polymer/asphalt blends", *Rubber Chemistry and Thechnology*, 64: 577-600 (1991).
63. Ait-Kadi, A., Brahimi, B., Bousmina, M., "Polymer blends for enhanced asphalt binders", *Polymer Engineering and Science*, 36: 1724-1733 (1996).
64. Sekar, V. A., Selvavathi, V., Sriram, V., Sairam, B., "Modifications of bitümen by elastomer and reactive polymer", *Petroleum Science and Technology*, 20: 535-547 (2002).
65. Lenoble, C., "Performance/microstructure relationship of blends of asphalt with two inco", *Fuel Science& Technology International*, 10: 549-564 (1992).
66. Negulescu, I., Daly, W. H., "Rheology of polymer reinforced asphalts", *Proceedings of the 1996 54th Annual Technical Conference, Indianapolis USA*, 1: 1175-1181 (1996).
67. Gao, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Sun, K., "Enhanced performance of LDPE/SBS blend modified asphalt through dynamic vulcanization", *Polymers and Polymer Composites*, 10: 433-440 (2002).
68. Huang, S., Huh, J., Robertson, R. E., Tia, M., "Aging effects on temperature susceptibility of polymer modified asphalts", *Proceedings of the Materials Engineerin Conference*, 2: 1367-1378 (1996).

69. Malkoç, G., Güngör, N., Dumanlılar, N., “Çeşitli katkı maddeleri ile modifiye edilen asfalt çimentolarının özelliklerindeki değişiklikler”, **1. Ulusal Asfalt Sempozyumu**, İstanbul, 77-89 (1996).
70. Çelik, O. N., “Otomobil lastiği ile modifiye edilmiş asfaltın dinamik reolojik analizi”, **1. Ulusal Asfalt Sempozyumu**, İstanbul, 297-304 (1996).
71. Tayfur, S., Özen, H., Aksoy, A., “Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers”, **Construction and Building Materials**, 21 (2): 328-337 (2007).
72. Garcia-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Gallegos, C., “Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen”, **Fuel**, 85 (7-8): 936-943 (2006).
73. Valtorta, D., Poulikakos, L. D., Partl, M. N., Mazza, E., “Rheological properties of polymer modified bitumen from long-term field tests”, **Fuel**, 86 (7-8): 938-948 (2006).
74. Airey, G. D., “Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens”, **Construction and Building Materials**, 16 (8): 473-487 (2002).
75. Airey, G. D., “Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens”, **Fuel**, 82 (14): 1709-1719 (2003).
76. Airey, G. D., Rahimzadeh, B., “Combined bituminous binder and mixture linear rheological properties”, **Construction and Building Materials**, 18 (7): 535-548 (2004).
77. Perez-Lepe, A. P., Martinez-Boza, F. J., Gallegos, C., Gonzales, O., Munoz, M. E., Santamaria, A., “Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen”, **Fuel**, 82 (11): 1339-1348 (2003).
78. Lu, X., Isacsson, U., “Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens”, **Fuel**, 77: 961-972 (1998).
79. Fawcett, A. H., McNally, T., “Blends of bitumen with various polyolefins”, **Polymer**, 41 (14): 5315-5326 (2000).
80. Garcia-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martinez-Boza, F., Gallegos, C., Gonzales, N., Gonzales, O., Munoz, M. E., “Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen”, **Fuel**, 83 (1): 31-38 (2004).
81. Masson, J. F., Polomark, G. M., “Bitumen microstructure by modulated differential scanning calorimetry”, **Thermochimica Acta**, 374: 105-114 (2001).

82. Masson, J. F., Polomark, G., Collins, P., “Glass transitions and amorphous phases in SBS-bitumen blends”, *Thermochimica Acta*, 436 (1-2): 96-100 (2005).
83. Lucena, M. C. C., Soares, S. A., Soares, J. B., “Characterization and thermal behavior of polymer-modified asphalt”, *Materials Research*, 7 (4): 529-534 (2004).
84. Collins, P., Mason, J. F., Polomark, G., “Ordering and steric-hardening in SBS-modified bitumen”, *Energy&Fuels*, 20: 1266-1268 (2006).
85. Navarro, F. J., Partal, P., Martinez-Boza, F., Valencia, C., Gallegos, C., “Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens”, *Chemical Engineering Journal*, 89: 53-61 (2002).
86. Çelik, O. N., “Öğütülmüş atık otomobil lastiğiyle modifiye edilmiş bitümler ile yapılan asfalt betonunun yorulma davranışı”, *Türk J. Engin Environ Sci., Tübitak*, 25: 487-495 (2001).
87. Namlı, R., Kuloğlu, N., “Farklı tasarım yöntemlerine göre hazırlanmış asfalt beton numunelerinin rijitliği”, *Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bil. Der.*, 18 (2): 235-241 (2001).
88. Clark, L. G., Hawley, G. G., “The Encyclopedia of Chemistry”, *Reinhold Publishing Corporation*, New York, 393, 419, 442-443 (1966).
89. Clauser, H. R., Fabian, R., Peckner, D., Rivey, M. W., “The Encyclopedia of Engineering Materials and Processes”, *Reinhold Publishing Corporation*, New York, 222-223, 270-271, 280, 481-487 (1963).
90. Akıncı, A., Akbulut, H., Yılmaz, F., Ekim, *Metalurji*, 133 (17):33-44 (2003).
91. Aruntaş, H. Y., “Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli”, *G.Ü. Müh. Mim. Fak. Der.*, 21 (1): 193-205 (2006).
92. Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y., Zhang, Y., “Improving the aging resistance of asphalt by addition of zinc dialkyldithiophosphate”, *Fuel*, 85: 1060-1066 (2006).

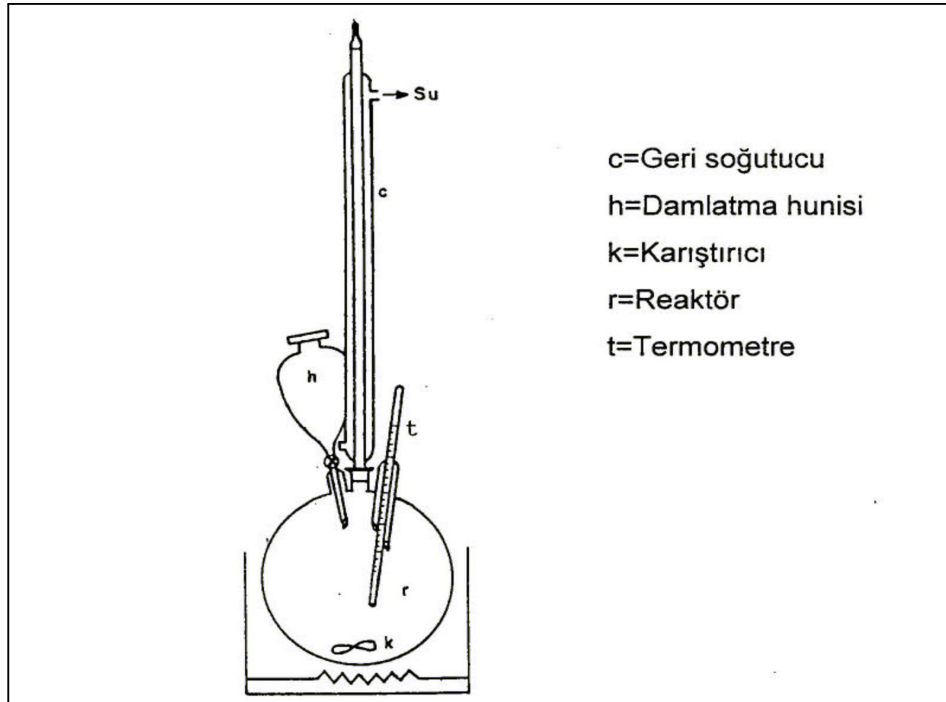
EKLER

EK-1. Mg abietat bileşigi modifiye bitüm hazırlanması

1. Mg abietat bileşiginin sentezi:

Öğütülerek toz haline getirilmiş ve 105 °C de kurutulmuş olan MgO, spindle oil ile 25 °C de üniformluk sağlamak amacıyla karıştırılmıştır. Bu karışım damlatma hunisine doldurulmuş ve reaktör içindeki reçine-yağ karışımına damlatılarak ilave edilmiştir. 200 °C de atmosferik basınçta, 2 saat süre ile geri soğutucu altında MgO spindle oil ortamında tabii reçine ile reaksiyona sokulmuştur. Oda sıcaklığına soğutulmasıyla sentez bileşigi içine oluşan katı partiküller çözünene kadar etil alkol ilave edilmek sureti ile homojenlik sağlanmıştır.

Elde edilen çözeltide stokiyometrik hesaplama ile 1 ml çözeltide 0,0474 g Mg metali içeren bir katkı maddesi sentezlenmiştir.



Şekil 1.1. Mg abietat bileşigi eldesi düzeneği

EK-1. (Devam) Mg abietat bileşiği modifiye bitüm hazırlanması

2. Mg abietat bileşiği modifiye bitüm hazırlanması:

Elde edilen Mg abietat bileşiği ile modifiye bitüm hazırlamak için 100 gram 50/70 sınıfı bitüm önceden 100 °C fırında 1 saat süre ile ısıtmış ve sonra hemen karıştırıcıya alınmıştır. Karıştırma için sıcaklığı önceden 100 °C'a ayarlanmış yağ banyosu kullanılmıştır.

4 pervaneli mikser önce düşük hızda (400 rpm) çalıştırılmıştır. Sonra karıştırma işlemine hemen başlanılmış ve ağırlıkça % 0,1 Mg abietat bileşiği ilave edilmiştir. Mikser hızlandırılarak (1300 rpm) 20 dakika karıştırma yapılmıştır. Sonra hazırlanan modifiye bitüm 20 dakika 100 °C'lik etüvde bekletilmiştir. Karışım etüvden çıkartılarak sıcaklığı, oda sıcaklığına ulaştığında ağzı kapatılarak viskozite ve diğer deneyler için muhafaza edilmiştir.

EK-2. Epoksi modifiye bitüm hazırlanması

Karıştırma için 500 gram 50/70 sınıfı bitüm önceden 150 °C fırında 1 saat süre ile ısıtılır ve sonra hemen karıştırıcıya alınır. Karıştırma için sıcaklığı önceden 150 °C'a ayarlanmış yağ banyosu kullanılmıştır.

4 pervaneli mikser önce düşük hızda (400 rpm) çalıştırılmıştır. Sonra karıştırma işlemine hemen başlanılmış ve 5 dakika içerisinde ağırlıkça % 1 epoksi reçine ilave edilmiştir. Mikser hızlandırılarak (1300 rpm) 1 saat karıştırma yapılmıştır. Sonra hazırlanan modifiye bitüm 1 saat 150 °C'lık etüvde bekletilmiştir. Karışım etüvden çıkartılarak sıcaklığı, oda sıcaklığına ulaştığında ağzı kapatılarak viskozite ve diğer deneyler için muhafaza edilmiştir.

50/70 sınıfı bitüme ağırlıkça % 2 epoksi reçine 6 dakikada, % 3 epoksi reçine 7 dakikada, % 4 epoksi reçine 8 dakikada, % 5 epoksi reçine 9 dakikada ve % 6 epoksi reçine 10 dakikada karıştırılarak bitümü modifiye etmek için aynı işlemler tekrarlanmıştır.

EK-3. Fenolformaldehit modifiye bitüm hazırlanması

Karıştırma için 500 gram 50/70 sınıfı bitüm önceden 120 °C fırında 1 saat süre ile ısıtılmış ve sonra hemen karıştırıcıya alınmıştır. Karıştırma için sıcaklığı önceden 120 °C'a ayarlanmış yağ banyosu kullanılmıştır.

4 pervaneli mikser önce düşük hızda (400 rpm) çalıştırılmıştır. Sonra karıştırma işlemine hemen başlanılmış ve 5 dakika içerisinde ağırlıkça % 1 fenolformaldehit ilave edilmiştir. Mikser hızlandırılarak (1300 rpm) 1 saat karıştırma yapılmıştır. Sonra hazırlanan modifiye bitüm 1 saat 120 °C'lik etüvde bekletilmiştir. Karışım etüvden çıkartılarak sıcaklığı, oda sıcaklığına ulaştığında ağzı kapatılarak viskozite ve diğer deneyler için muhafaza edilmiştir.

50/70 sınıfı bitüme ağırlıkça % 2 fenolformaldehit 6 dakikada, % 3 fenolformaldehit 7 dakikada, % 4 fenolformaldehit 8 dakikada karıştırılarak bitümü modifiye etmek için aynı işlemler tekrarlanmıştır. Ölçülen değerlerden görüleceği üzere % 4 fenolformaldehit ilavesinden sonra daha fazla miktarlarda ilave yapmaya gerek duyulmamıştır.

EK-4. PTFE modifiye bitüm hazırlanması

Karıştırma için 500 gram 50/70 sınıfı bitüm önceden 150 °C fırında 1 saat süre ile ısıtılmış ve sonra hemen karıştırıcıya alınmıştır. Karıştırma için sıcaklığı önceden 150 °C'a ayarlanmış yağ banyosu kullanılmıştır.

4 pervaneli mikser önce düşük hızda (400 rpm) çalıştırılmıştır. Sonra karıştırma işlemine hemen başlanılmış ve 5 dakika içerisinde ağırlıkça % 1 PTFE ilave edilmiştir. Mikser hızlandırılarak (1300 rpm) 1 saat karıştırma yapılmıştır. Sonra hazırlanan modifiye bitüm 1 saat 150 °C'lık etüvde bekletilmiştir. Karışım etüvden çıkartılarak sıcaklığı, oda sıcaklığına ulaştığında ağzı kapatılarak viskozite ve diğer deneyler için muhafaza edilmiştir.

50/70 sınıfı bitüme ağırlıkça % 2 PTFE 6 dakikada, % 3 PTFE 7 dakikada, % 4 PTFE 8 dakikada ve % 5 PTFE 9 dakikada karıştırılarak bitümü modifiye etmek için aynı işlemler tekrarlanmıştır.

EK-5. Dönel viskozimetre deneyi (ASTM D 4402-87)

Numune hazırlanması:

Ölçüm yapılacak malzemeye göre uygun spindle seçilir ve cihaza takılır. Bitüm etüvde sıvı hale gelene kadar ısıtılır. Isıtma sırasında bitüm içinde hapsolan havanın atılması için arada bir karıştırma yapılır. Seçilen spindle için belirtilen numune hacmi kadar bitüm numune kabına konulur. İçinde bitüm bulunan numune kabı önceden belli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış ısı kontrollü cihazın thermosel aparatına yerleştirilir. Spindle belirli ölçüde numune kabına daldırılır. Ölçüm yapılacak sıcaklıkta sabitleme oluncaya kadar beklenir ve sonra ölçümlere başlanır.



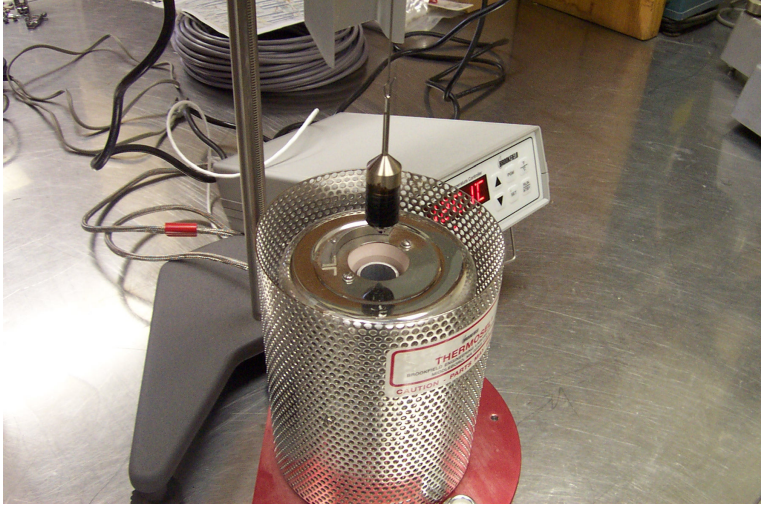
Resim 5.1. Numune kabı ve spindle

Deneyin yapılışı:

Bilgisayarda kontrol panelinden dönme hızı ve shear rate ayarlanır. Çalıştır komutu verildikten sonra motor, spindle dönmesini (kendi etrafında) sağlar ve dönüş hareketi sırasında viskoz bitüm tarafından dirençle karşılaşır ve cihaz viskozite okumalarını yapar. Viskozite okumaları sabitlendiğinde deney sonuçları kaydedilir. Aynı numune

EK-5. (Devam) Dönel viskozimetre deneyi (ASTM D 4402-87)

için üç viskozite okuması yapılır ve bu üç değerin ortalaması alınır. Sonuçlar Pa.s olarak kaydedilir.



Resim 5.2. Thermosel aparat



Resim 5.3. DV-III Rheometer

EK-6. Bitümlü ve bitümlü bağlayıcılar-iğne batma deneyi tayini (TS 118 EN 1426)

Numune hazırlama:

Penetrasyon deneyi uygulanacak bitümlü bağlayıcı aşırı ısınmalara sebebiyet vermeden kolay dökülebilecek kıvama gelinceye kadar ısıtıldıktan sonra, penetrasyon kabına dökülür. Penetrasyon kabının ağzı toz girmeyecek şekilde kapatılarak 1-1,5 saat süreyle oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Soğuduktan sonra taşıma kabı ile birlikte su banyosuna batırılır. Burada da 1-1,5 saat bekletildikten sonra numune deney için hazır hale gelmiştir.

Deneyin yapılışı:

Deneyde öncelikle penetrasyon cihazı (penetrometre) düzgün bir yere yerleştirilir ve gösterge sıfıra getirilir. İçi bitüm numunesi dolu olan penetrasyon kabı, içi su dolu olan taşıma kabı ile birlikte penetrasyon cihazının tablasına yerleştirilir. İstenilen ağırlıkla yüklenen iğne (genellikle 100 gr) numunenin yüzeyine değecek şekilde ayarlanır. İğne belirli bir zaman aralığında (5 saniye) serbest bırakılır. Zaman bitiminde penetrasyon değeri göstergeden okunur. Kabın kenarından ve birbirlerinden 1'er cm uzaklıkta en az 3 okuma yapılır. Bu okumalar en kısa zamanda arka arkaya yapılır. Deneyin sonunda kabul edilecek penetrasyon, bu üç okuma değeri arasındaki farkın şartnamelerde belirtilen en yüksek ve en düşük değerler arasındaki fark sınırını aşmaması durumunda bu üç değerın ortalamasıdır. Eğer ölçüm sonucunda bulunan değerlerin, en yüksek ile en düşük arasındaki fark şartnamelerde belirtilen sınırı aşıyorsa deney ikinci bir numune ile tekrarlanır.

EK-6.(Devam) Bitümlü ve bitümlü bağlayıcılar-iğne batma deneyi tayini (TS 118
EN 1426)



Resim 6.1. Penetrasyon cihazı

EK-7. Bitümlü ve bitümlü bağlayıcılar-yumuşama noktası tayini-halka ve bilye metodu (TS 120 EN 1427)

Numune hazırlama:

16 mm (5/8 inç) çapında ve 6,4 mm (1/4 inç) kalınlığında pirinç bir yüzük vazelinle yağlandıktan sonra, deneye tabi tutulacak bitümlü malzeme eritilerek pirinç yüzüğe doldurulur. Bir saat süre ile soğutulduktan sonra taşan kısımları ısıtılmış bir spatula ile kesilip alınır. Numune ve 9,5 mm (3/8 inç) çapındaki çelik top, 5 °C'ye kadar soğutulmuş saf su ile tabandan yaklaşık 9 cm yüksekliğe kadar doldurulmuş olan beherin içine yerleştirilir. Numuneyi taşıyan halkanın alt yüzü beherin tabanından 2,5 cm (1 inç) yukarıda olacak şekilde yerleştirilir. Termometre civa haznesinin ucu halkanın alt yüzü ile aynı düzeyde ve halkadan 0,5 cm uzaklıkta bulunacak şekilde behere sarkıtılır. Beherdeki suyun sıcaklığı 15 dakika süreyle 5 °C'de sabit tutulur. Daha sonra bilye uygun bir maşa yardımı ile halka içindeki numunenin tam ortasına yerleştirilir.

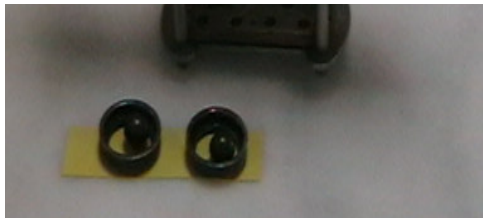
Deneyin yapılışı:

Beherdeki suyun sıcaklığı ilk 3 dakikadan sonra dakikada 5°C yükselecek şekilde ısıtılır. Sıcaklığın artması ile yumuşayan malzeme, beherin tabanına değdiği anda termometreden okunan sıcaklık, yumuşama noktası değeri olarak kaydedilir. Yumuşama noktası tayini iki numune üzerinde yapılır ve sonuç bu iki değer in ortalaması olarak alınır.

EK-7.(Devam) Bitümlü ve bitümlü bağlayıcılar-yumuşama noktası tayini-halka ve bilye metodu (TS 120 EN 1427)



Resim 7.1. Yumuşama noktası cihazı



Resim 7.2. Bilye ve halkalar

EK-8. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin camsı geçiş sıcaklıklarının tespiti

Numune hazırlama:

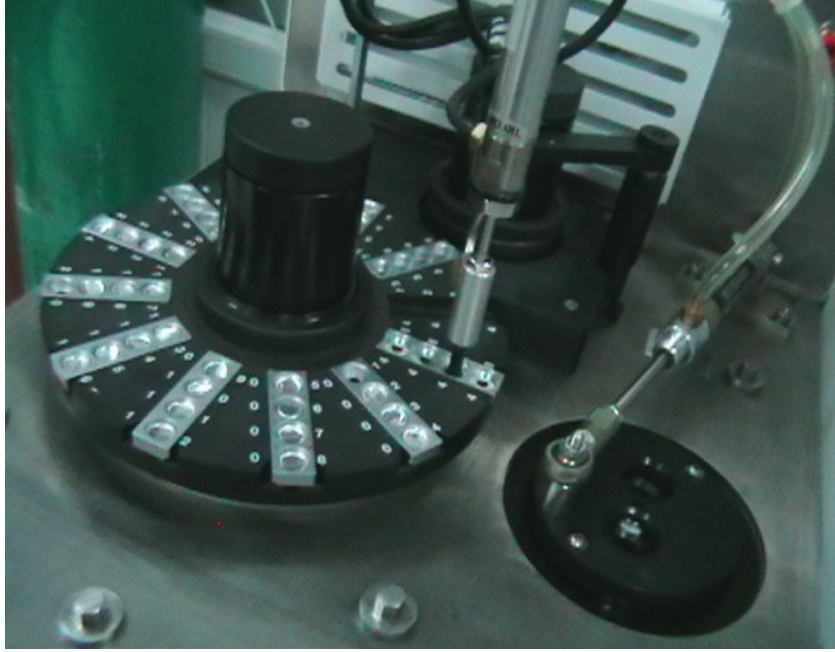
Öçüm yapılacak malzeme için uygun numune kapları ve kapakları seçilir. Numune kabının hassas terazide mg olarak ağırlığı ölçülür. Darası alınmış numune kabına ısıtıldığı zaman taşmayacak miktarda bitüm düzgün bir şekilde konulur. Sonra tekrar tarım alınarak içindeki numune miktarının ağırlığı tespit edilir. İçerisinde bitüm bulunan numune kabının kapağı yerleştirilerek, numune pres aparatında kapak sıkıştırılarak etrafındaki fazlalıklar kesilerek atılır. Bu şekilde ölçüme hazır numune kapları hazırlanmış olunur.

Benzer şekilde içinde bitüm bulunmayan boş referans kabı (numunenin hazırlandığı aynı ölçüdeki kap ile) hazırlanır.



Resim 8.1. Numune panları hazırlama aparatı

EK-8. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin camsı geçiş sıcaklıklarının tespiti



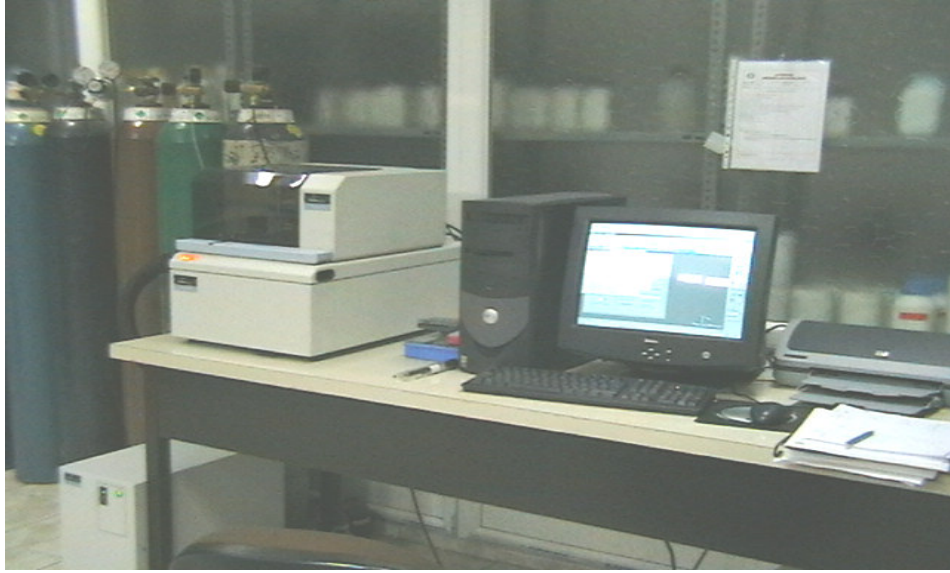
Resim 8.2. DSC cihazı otomatik numune alma düzeneği

Deneyin yapılışı:

Cihazın mevcut programı, soğutucu, azot ve kuru hava tüpleri açılarak, tüpler uygun basınca getirilir. Numuneler cihaza manuel veya auto sample yardımıyla yerleştirilir. Yerleştirme, fırında yer alan iki bölmeden birinde referans, diğerinde numune yer alacak şekilde yapılır. Programdan numuneye ilişkin bilgiler, tarama yapılacak sıcaklık aralığı, ısıtma hızı vb. bilgiler girilerek, program ve numune sıcaklığının istenilen düzeye gelmesi beklenir. İstenilen sıcaklığı gelindiğinde çalıştır konutu verilerek tarama başlatılır. Tarama bittikten sonra elde edilen termal eğride, cihazın mevcut programı yardımıyla istenilen hesaplama (camsı geçiş sıcaklığı) otomatik olarak yaptırılır.

EK-8. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin camsı geçiş sıcaklıklarının tespiti

Ölçümler 50 °C/dk ısıtma hızında ve cihazın içinden azot gazı (20 ml/dk) geçirilerek gerçekleştirilmiştir. Belirgin olmayan eğrilerin türevleri alınarak hesaplatma yapılmıştır.



Resim 8.3. DSC cihazı

EK-9. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjilerinin tespiti

Numune hazırlama:

Bitüm akıcı hale gelinceye kadar ısıtılır. Isıtma sırasında içindeki hava kabarcıklarını yok etmek için karıştırılır. Akıcı hale gelen bitüm bir plaka üzerine düzgün bir yüzey elde edilecek şekilde dökülür. Sonra oda sıcaklığına soğutulur.

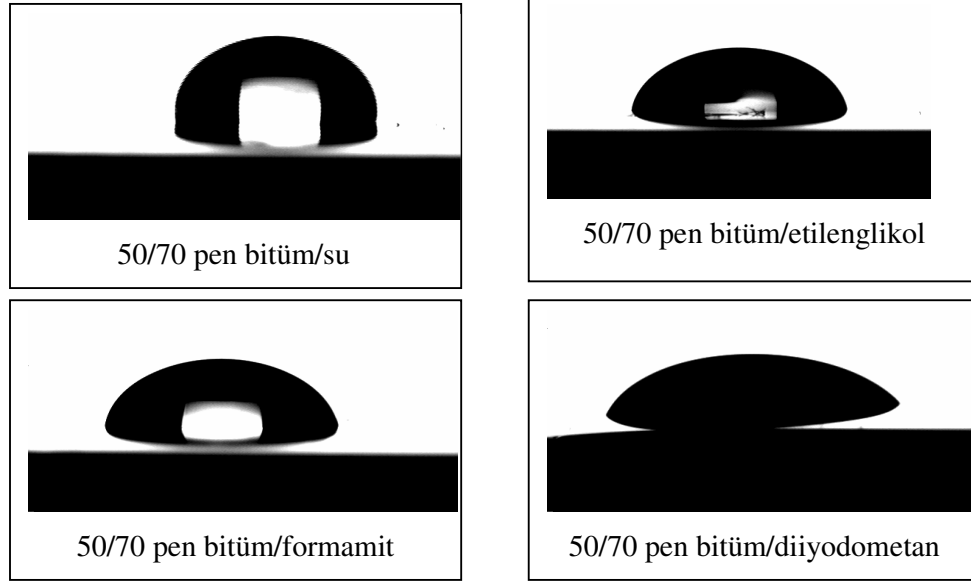
Deneyin yapılışı:

Cihazın şırınga ünitesi kullanılacak sıvılara göre ayarlanır. Şırıngalarda su, formamit, etilen glikol olmak üzere üç adet polar sıvı ve diiyodometan olmak üzere bir adet apolar sıvı doldurulur. Focus, base line, zoom, şırınga konumu, şırınga hızı, damlatılacak sıvının hacmi, hesaplama yöntemi vb. ayarlar yapılır. Tüm bu ayarlara cihazın kontrol panelinden girilir. Çalışma dosyası seçilir ve şırıngalarda hava olup olmadığı kontrol edilir.

Damlatılacak sıvı için şırınga seçilir ve çalıştır komutu ile sıvı damlatılır. Sıvının katı yüzeyine temas ettiği anda cihaz her iki taraftan temas açısını ölçer. Her bir sıvı için ölçülen değerler ile cihazın yazılımı seçilen hesaplama yöntemine göre serbest yüzey enerjilerini hesaplar. Sonuçlar kayıt altına alınır ve cihazın yazılımı ölçüm raporunu oluşturur.

Cihazın mevcut programı sağlıklı olmayan ölçümleri “bad” olarak kaydeder. Bu durumda ise ölçümler tekrarlanır.

EK-9. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjilerinin tespiti



Resim 9.1. 50/70 sınıfı bitümün DSA fotoğrafları

Report of Surface Free Energy Calculation

Workspace : MELTEM5070
 Project : New MT
 DB-File : C:\Program Files\KRUSS\Drop Shape Analysis
 System : NA [1] / Air [2]
 Measured by : DSA User
 Time : 23.03.2007 13:18:17
 Memo : DSA User

Calculation Method : Acid-Base Theory

Measuring Data :

N	Measurement Name	Liquid Name	CA [deg.]	IFT(l) [mN/m]	IFT(d) [mN/m]	IFT(a) [mN/m]	IFT(b) [mN/m]
1	Measurement313	diiodo-methane	42,6	50,00	47,40	0,00	0,00
2	Measurement314	ethylene glycol	84,8	47,70	30,10	0,00	0,00
3	Measurement315	formamide	89,6	56,90	23,50	0,00	0,00
4	Measurement316	water	111,4	72,10	19,90	0,00	0,00

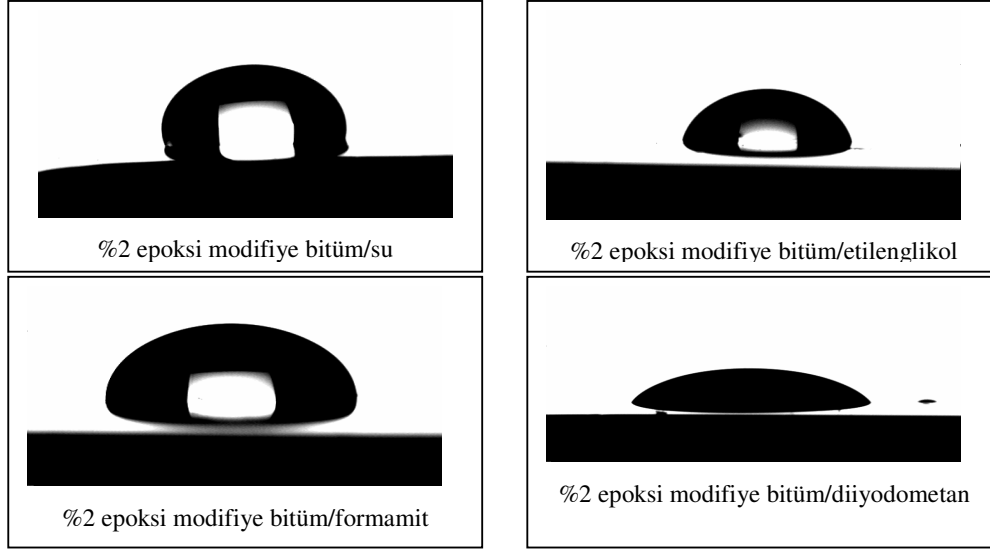
N - Run Number; CA - Contact Angle; IFT(l) - Liquid Surface Tension; IFT(d) - Disperse Part; IFT(a) - Acid Part; IFT(b) - Base Part;

Calculated Values [mN/m]:

DispersePt(IFT(s,d)) : 32 ± 88
 HH Part(IFT(s,h)) : 32 ± 88

Resim 9.2. 50/70 sınıfı bitümün DSA çıktısı

EK-9. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjilerinin tespiti



Resim 9.3. %2 epoksi modifiye bitümün DSA fotoğrafları

Report of Surface Free Energy Calculation

Workspace : % 2 EPOXY
 Project : CA % 2 EPOXY
 DB-File : C:\Program Files\KRUSS\Drop Shape Analysis
 System : NA [1] / Air [2]
 Measured by : DSA User
 Time : 05.10.2006 15:40:45
 Memo : DSA User

Calculation Method : Acid-Base Theory

Measuring Data :

N	Measurement Name	Liquid Name	CA [deg.]	IFT(l) [mN/m]	IFT(d) [mN/m]	IFT(a) [mN/m]	IFT(b) [mN/m]
1	Measurement121	water	106,2	72,10	19,90	0,00	0,00
2	Measurement122	formamide	87,4	56,90	23,50	0,00	0,00
3	Measurement123	ethylene glycol	76,9	47,70	30,10	0,00	0,00
4	Measurement124	diiodo-methane	62,5	50,00	47,40	0,00	0,00

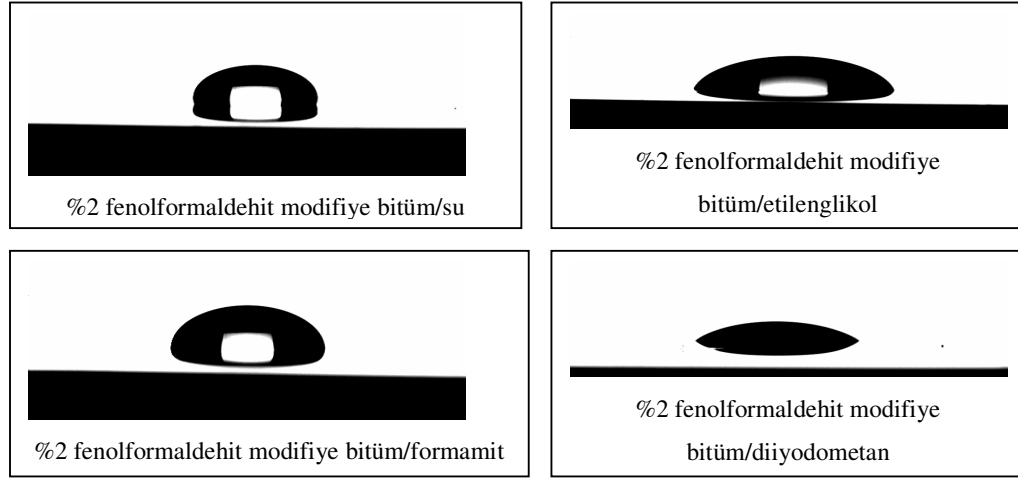
N - Run Number; CA - Contact Angle; IFT(l) - Liquid Surface Tension; IFT(d) - Disperse Part; IFT(a) - Acid Part; IFT(b) - Base Part;

Calculated Values [mN/m]:

DispersePt(IFT(s,d)) : 30,9
 HH Part(IFT(s,h)) : 30,9

Resim 9.4. %2 epoksi modifiye bitümün DSA çıktısı

EK-9. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjilerinin tespiti



Resim 9.5. %2 fenolformaldehit modifiye bitümün DSA fotoğrafları

Report of Surface Free Energy Calculation

Workspace : % 2 FF
 Project : CA % 2 FF
 DB-File : C:\Program Files\KRUSSE\Drop Shape Analysis
 System : % 2 FF [1] / Air [2]
 Measured by : DSA User
 Time : 14.09.2006 16:56:46
 Memo : DSA User

Calculation Method : Acid-Base Theory

Measuring Data :

N	Measurement Name	Liquid Name	CA [deg.]	IFT(l) [mN/m]	IFT(d) [mN/m]	IFT(a) [mN/m]	IFT(b) [mN/m]
1	Measurement82	water	103,5	72,80	21,80	25,50	25,50
2	Measurement83	formamide	87,9	58,00	39,00	2,28	39,60
3	Measurement84	ethylene glycol	84,6	48,00	29,00	3,00	30,10
4	Measurement85	diiodo-methane	70,8	50,80	50,80	0,00	0,00

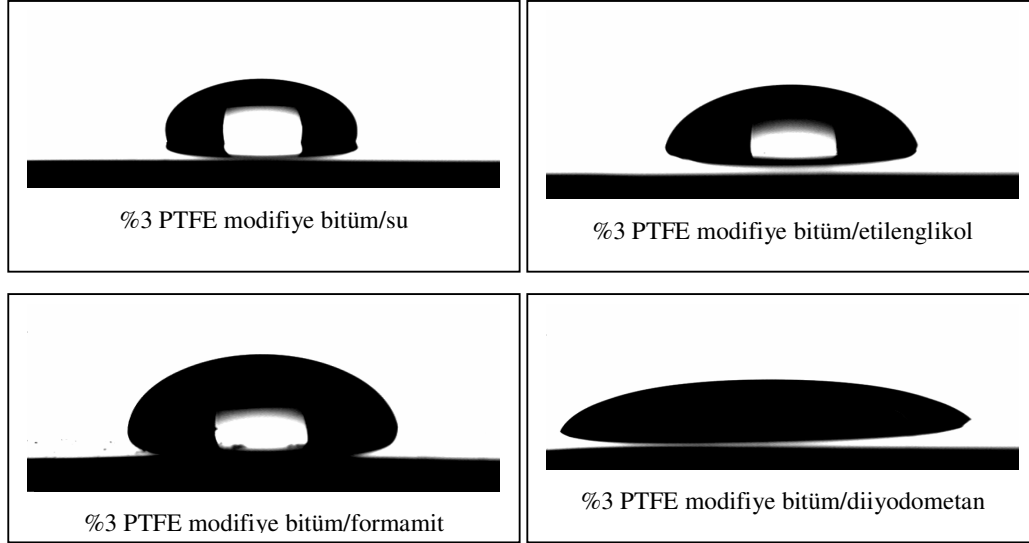
N - Run Number; CA - Contact Angle; IFT(l) - Liquid Surface Tension; IFT(d) - Disperse Part; IFT(a) - Acid Part; IFT(b) - Base Part;

Calculated Values [mN/m]:

Total IFT(IFT(s)) : 21,6
 DispersePt(IFT(s,d)) : 22,4
 PolarPt(IFT(s,p)) : -0,8 ± 0,47
 AcidPt(IFT(s,a)) : 0,1
 BasePt(IFT(s,b)) : 2
 HH Part(IFT(s,h)) : 22,4

Resim 9.6. %2 fenolformaldehit modifiye bitümün DSA çıktısı

EK-9. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjilerinin tespiti



Resim 9.7. %3 PTFE modifiye bitümün DSA fotoğrafları

Report of Surface Free Energy Calculation

Workspace : MELTEM % 3 PTFE
 Project : New MT
 DB-File : C:\Program Files\KRUSS\Drop Shape Analysis
 System : NA [1] / Air [2]
 Measured by : DSA User
 Time : 23.03.2007 13:10:50
 Memo : DSA User

Calculation Method : Acid-Base Theory

Measuring Data :

N	Measurement Name	Liquid Name	CA [deg.]	IFT(l) [mN/m]	IFT(d) [mN/m]	IFT(a) [mN/m]	IFT(b) [mN/m]
1	Measurement309	water	102,1	72,10	19,90	0,00	0,00
2	Measurement310	formamide	86,5	56,90	23,50	0,00	0,00
3	Measurement311	ethylene glycol	74,8	47,70	30,10	0,00	0,00
4	Measurement312	diiodo-methane	42,9	50,00	47,40	0,00	0,00

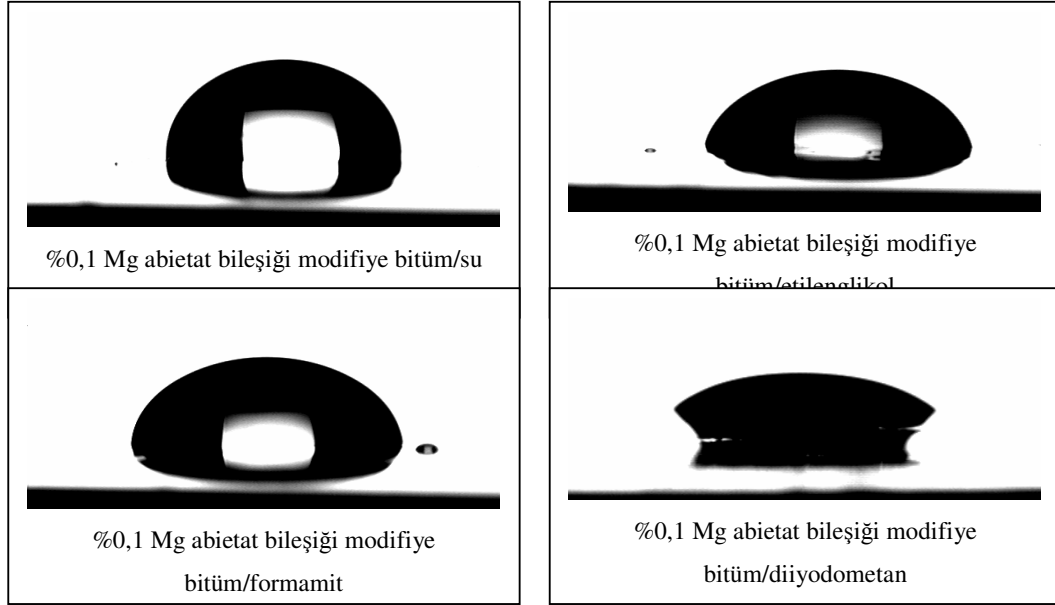
N - Run Number; CA - Contact Angle; IFT(l) - Liquid Surface Tension; IFT(d) - Disperse Part; IFT(a) - Acid Part; IFT(b) - Base Part;

Calculated Values [mN/m]:

Disperse Pt(IFT(s,d)) : $32,8 \pm 559,73$
 HH Part(IFT(s,h)) : $32,8 \pm 559,73$

Resim 9.8. %3 PTFE modifiye bitümün DSA çıktısı

EK-9. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjilerinin tespiti



Resim 9.9. %0,1 Mg abietat modifiye bitümün DSA fotoğrafları

Report of Surface Free Energy Calculation

Workspace : % 0.1 MgO
 Project : CA % 0.1 MgO
 DB-File : C:\Program Files\KRUSS\Drop Shape Analysis
 System : NA [1] / Air [2]
 Measured by : DSA User
 Time : 05.10.2006 15:35:24
 Memo : DSA User

Calculation Method : Acid-Base Theory

Measuring Data :

N	Measurement Name	Liquid Name	CA [deg.]	IFT(l) [mN/m]	IFT(d) [mN/m]	IFT(a) [mN/m]	IFT(b) [mN/m]
1	Measurement117	diiodo-methane	167,2	50,00	47,40	0,00	0,00
2	Measurement118	water	92,6	72,10	19,90	0,00	0,00
3	Measurement119	formamide	85,0	56,90	23,50	0,00	0,00
4	Measurement120	ethylene glycol	77,9	47,70	30,10	0,00	0,00

N - Run Number; CA - Contact Angle; IFT(l) - Liquid Surface Tension; IFT(d) - Disperse Part; IFT(a) - Acid Part; IFT(b) - Base Part;

Calculated Values [mN/m]:

DispersePt(IFT(s,d)) : 14,9
 HH Part(IFT(s,h)) : 14,9

Resim 9.10. %0,1 Mg abietat modifiye bitümün DSA çıktısı

EK-9. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin yüzey serbest enerjilerinin tespiti



Resim 9.6. DSA 100 cihazı

EK-10. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson soyulma deneyi

Numune hazırlama:

Agrega numunesinin 9,5 mm(3/8") elekten geçen ve 6,3 mm (1/4") elek üzerinde kalan kısmından yaklaşık 200 g alınarak saf su ile yıkanır. Yıkanmış agregası 110 °C'lik etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur. Kurutulmuş agregası kullanılacağı zamana kadar desikatörde muhafaza edilir.

Hazırlanan agregadan 100±0,5 g tartılır ve bir behere konulur. İçinde agregası olan beher 135-150 °C sabit sıcaklıktaki etüve konulur ve 1 saat bekletilir. Bitümde ayrıca 135-150 °C'a ısıtılır. Sonra 5,0±0,1 g bitüm 250 ml lik cam behere tartılır ve cam beher kum banyosuna yerleştirilir. Üzerine önceden etüvde ısıtılmış agregası ilave edilir ve ısıtılmış cam baget ile agregaların yüzeyi bitümle iyice kaplanana kadar 2-3 dakika karıştırılır.

Deneyin yapılışı:

Bitüm ile kaplanmış agregası 10 cm çapındaki iki petri kabına eşit miktarlarda konulur. Cam bagetle karışımın petri kabında homojen bir şekilde dağılması sağlanır. Numuneler 15 dakika oda sıcaklığında bekletildikten sonra petri kapları içi saf su ile doldurulmuş tepsilere konularak tamamen su ile örtülmeleri sağlanır. Tepsilerin üzeri örtülür ve 24 saat bekletilmek üzere 60 °C sıcaklıktaki etüve konulur.

24 saat sonunda etüvdeki petri kapları çıkarılır ve karışımı sarmadan üzerindeki su boşaltılır. Sonra yeni saf su konularak yandan gelen ışık altında agregası yüzeyleri dikkatlice incelenir. Soyulmamış agregası yüzeyinin toplam agregası yüzeyine oranı soyulmaya karşı mukavemet olarak verilir.

EK-10. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson soyulma deneyi



Resim 10.1 Deney örnekleri

EK-10. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson soyulma deneyi



Resim 10.2. Orjinal bitüm deney numunesi



Resim 10.3. Orjinal bitüm deney numunesinin büyütülmüş görünüşü

EK-10. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson soyulma deneyi



Resim 10.4. %2 fenolformaldehit modifiye bitüm deney numunesi



Resim10.5. %2 fenolformaldehit modifiye bitüm deney numunesinin büyütülmüş görünüşü

EK-10. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson soyulma deneyi



Resim 10.6. %3 PTFE modifiye bitüm deney numunesi



Resim 10.7. %3 PTFE modifiye bitüm deney numunesinin büyütülmüş görünüşü

EK-10. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson soyulma deneyi



Şekil 10.8. %2 epoksi modifiye bitüm deney numunesi

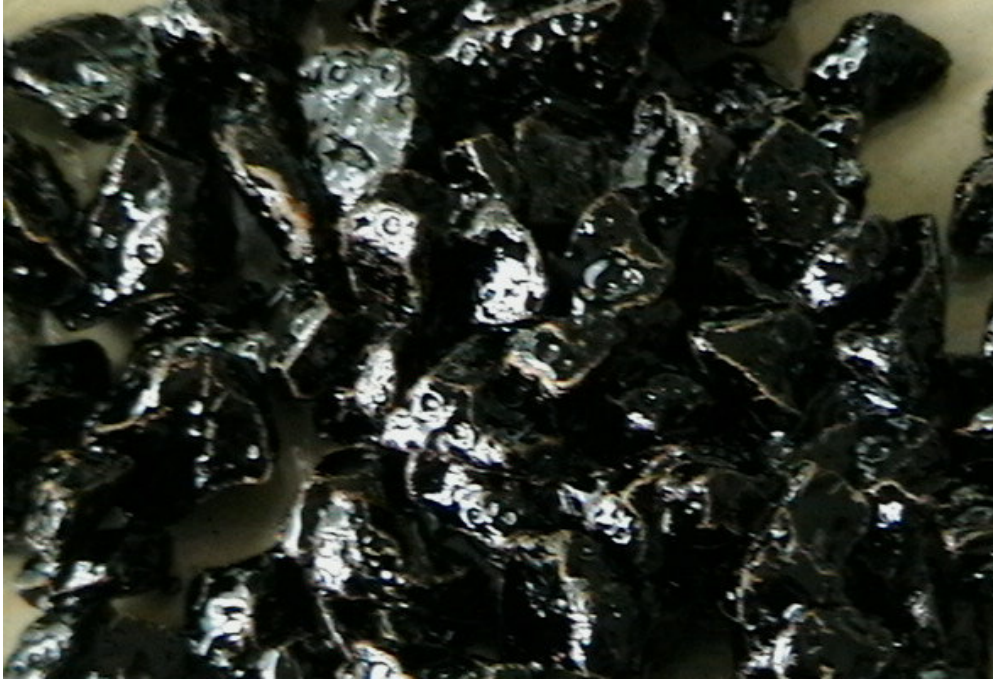


Resim 10.9. %2 epoksi modifiye bitüm deney numunesinin büyütülmüş görünüşü

EK-10. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson soyulma deneyi



Resim 10.10. %3 epoksi modifiye bitüm deney numunesi



Resim 10.11. %3 epoksi modifiye bitüm deney numunesinin büyütülmüş görünüşü

EK-10. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson soyulma deneyi



Resim 10.12. %0,1 Mg abietat bileşiği modifiye bitüm deney numunesi



Resim 10.13. %0,1 Mg abietat bileşiği modifiye bitüm deney numunesinin büyütülmüş görünüşü

EK-11. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin SUPERPAVE deneyleri

Dinamik Kesme Deneyi (DSR) (AASHTO TP5)

Numune hazırlama:

Deneyde hareketli plaka ile aynı çapta disk şeklinde numune gereklidir. Plakalar reometre üzerinde iken plakalar arasındaki uygun boşluk ayarlanır. Orjinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış bitüm için 1000 mikron boşluk ve 25 mm çaplı plakalar kullanılır. PAV ile yaşlandırılmış bitüm için ise 2000 mikron boşluk ve 8 mm çaplı plakalar kullanılır.

Deney numunelerini hazırlamak için bitüm akıcı hale gelinceye kadar ve 163 °C'ı geçmeyecek şekilde ısıtılır ve hava kabarcıkları yok olacak şekilde iyice karıştırılır. Sonra uygun kalınlıkta bitüm doğrudan taban plakasına dökülür ve iki plaka arasında taşan kısımlar alınır.



Resim 11.1. Dinamik kesme reometresi (DSR)

EK-11. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin SUPERPAVE deneyleri

Deneyin yapılışı:

Numune yerleştirildikten ve test sıcaklığına erişildikten sonra bir süre beklenir ve numunenin her iki tarafında aynı sıcaklık olması sağlanır. Numuneye on tur yükleme yapılarak hazır hale getirilir. Bu on tur boyunca reometre gerekli gerilmeyi ölçer ve deney boyunca bu gerilmeyi sabit tutar. 10 tur hazırlıktan sonra 10 ilave tur yaptırılarak deney verileri elde edilir. Reometre yazılımı uygulanan gerilme ve elde edilen deplasman arasındaki ilişkiyi kullanarak G^* ve δ değerlerini hesaplar.

EK-11. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin SUPERPAVE deneyleri

Döner İnce Film Isıtma Deneyi (RTFOT) (AASHTO T240 ve ASTM D 2872)

Numune hazırlama:

Bitüm 150 °C'yi geçmeyecek şekilde ısıtılır. 8 adet numune şişesine 35'er g bitüm konulur.

Etüv kullanılmadan önce 16 saat süreyle uygulama sıcaklığı olan 163 °C'a kadar ısıtılır. Numune şişeleri yerleştirilip kapak kapatıldıktan sonra 10 dakika içerisinde bu sıcaklığa çıkacak şekilde termostat ayarlanır.

Deneyin yapılışı:

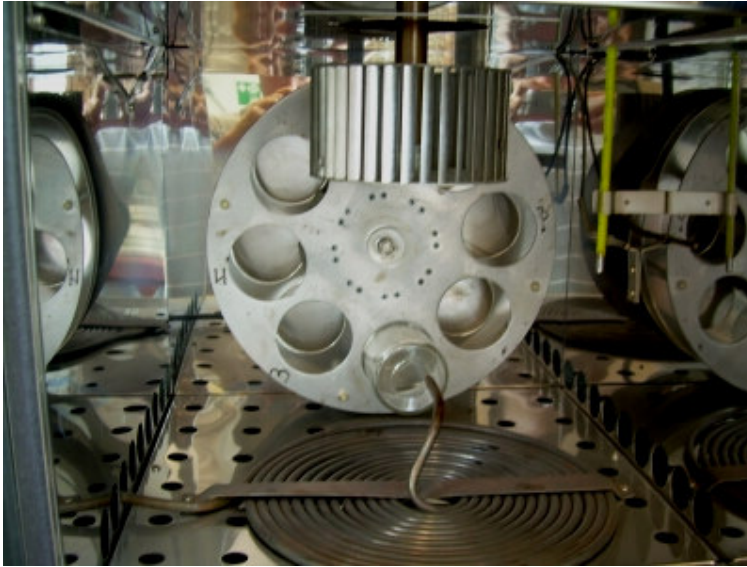
Etüv dairesel, dikey ve kendi eksenini etrafında dönen numune şişelerinin üzerine takılabildiği bir taşıyıcıya sahiptir. Numune şişeleri taşıyıcıya yerleştirilir ve dakikada 15 tur yapacak şekilde döndürülür. Şişeler taşıyıcı ile birlikte dönerken en alt konuma geldiklerinde hava üfleyici parça, sıra ile her bir şişenin içerisine hava püskürtür. Hava üfleme düzeneği ise dakikada 4000 ml olacak şekilde ayarlanır. Numuneler bu şartlar altında 85 dakika kalır.

Yaşlandırma işlemi sonunda şişelerde bulunan bitüm numuneleri bir kaba dökülür ve homojen hale gelinceye kadar karıştırılır. Sonra bu yaşlandırılmış bitüm numuneleri dinamik kesme reometresi ve basınçlı oksidasyon kabı deneylerinde kullanılır.

EK-11. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin SUPERPAVE deneyleri



Resim 11.2. RTFOT cihazı



Resim 11.3. RTFOT cihazının iç görünüşü

EK-11. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin SUPERPAVE deneyleri

Basınçlı Oksidasyon Kabı Deneyi (PAV) (AASHTO PP1)

Numune hazırlama:

Bu deneyde RTFO deneyinde yaşlandırılan numuneler kullanılır. Bitüm akıcı hale gelene kadar ısıtılır ve homojen hal alıncaya kadar karıştırılır. 50 g lık üç numune kabı hazırlanır ve kaplar numune rafına yerleştirilir.

Deneyin yapılışı:

Basınç kabı basınç uygulanmadan önce istenilen sıcaklığa kadar ısıtılır. Sonra raflı taşıyıcı basınç kabına yerleştirilir ve ısı kaybına sebebiyet vermeden kapak kapatılır.

İklim koşullarına uygun görülen sıcaklıkta deney uygulanır. Kabin sıcaklığı gerekli sıcaklığa ± 2 °C hassasiyetle yaklaştığında basınç vermeye dolayısıyla yaşlandırma işlemine başlanır. 20 saat sonra basınç boşaltma işlemi 8-10 dakika sürecek şekilde tedricen boşaltılır. Sonra numuneler çıkarılarak 163 °C da 30 dakika etüvde tutularak içinde hapsolan hava uzaklaştırılır ve etüvden alınan numuneler sonra kullanılmak üzere saklanır.

EK-11. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin SUPERPAVE deneyleri



Resim.4. PAV cihazı

EK-11. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin SUPERPAVE deneyleri

Çubuk Eğilme Deneyi (BBR) (AASHTO TP1)

Numune hazırlama:

Deney numuneleri, dikdörtgen kesitli alüminyum kalıplar kullanılarak hazırlanır. Kalıp kullanılmadan önce iki uzun kenar parçası ve alt parçanın iç yüzeyleri madeni bir yağ ile hafifçe yağlanır. Üç adet asetat bant yağlanan yüzeylere dikkatlice yerleştirilir. Uçtaki parçalara gliserin veya talktan oluşan bir ayırıcı madde uygulanarak kalıp kurutulur ve parçaların ayrılmaması için iki uçtan birer lastik halka sıkıştırılır.

Bitüm 163 °C sıcaklığı aşmayacak şekilde (genelde 135 °C'da) ısıtılarak akıcı hale getirilir ve bir uçtan diğer uca doğru kalıbın içine dökülür. 45-60 dakikalık bir soğutma işleminden sonra kalıptan taşan kısımlar sıcak bir spatula ile temizlenir. Bu şekilde numune oda sıcaklığında 2 saati geçmeyecek şekilde bekletilir ve deney koşulları hazır olduğunda kalıptan çıkartılır.

Numuneyi kalıptan çıkarmak için kalıp, 30-45 dakika kadar buz banyosunda veya 5-10 dakika kadar dondurucuda soğutulur. Sonra dikkatlice numune kalıptan çıkarılır.

Deneyin yapılışı:

Sistemin kalibrasyonu yapılır ve referans çubuğun kullanılması ile ön yükleme ve yükleme seviyeleri ayarlanır. Sıcaklık şartlarının oluşması için 60 dakikalık beklemeden sonra numune mesnetler üzerine yerleştirilir. Sonra çubuk bir seri yükleme hazırlığı adımına tabi tutulur. 30 mN luk bir ön yük çubuğun mesnetler üzerine tamamen oturmasını sağlamak amacıyla elle uygulanır. Daha sonra 1 saniye içinde 980 mN luk bir yerleştirme yükü yazılım tarafından otomatik olarak uygulanır. Bu yerleştirme işleminden sonra 20 saniyede ön yükleme seviyesine kadar geri indirilir.

EK-11. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin SUPERPAVE deneyleri

20 saniyelik geri dönüş periyodundan sonra toplam 240 saniye içinde 980 mN luk bir yük numuneye uygulanır ve şekil değiştirme ölçülür. Deney sırasında zamana karşı yer değiştirme yazılım tarafından belirlenir ve 240 saniye sonunda deney yükü otomatik olarak kalkar ve yazılım sünme sertliği ve sünme oranını hesaplar.



Resim 11.5. BBR cihazı

EK-12. Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri (ASTM D-1559)

Numune hazırlama:

Agregalar 105-110 °C sıcaklıkta sabit ağırlığa gelene kadar kurutulur. Kuru eleme ile istenilen fraksiyonlara ayrılır. Deneyde kullanılan fraksiyonlar aşağıda verilmiştir.

Çizelge 12.1. Agregada gradasyonu

Elek Boyutu (mm)	Binder tabakası için istenilen	% Geçen
25	100	100
19	80-100	91
12,5	58-80	70
9,5	48-70	59,5
4,75	30-52	42
2,00	20-40	30
0,425	8-22	15
0,180	5-14	10
0,075	2-8	6

Bitüm 170 ± 20 cSt viskozite de olacak şekilde ısıtılacağı sıcaklık karıştırma sıcaklığıdır. Sıkıştırma sıcaklığı ise bitümün viskozitesinin 280 ± 30 cSt olduğu sıcaklıktır.

Deney numunesi için 63,5 ± 1,27 mm (2,5 ± 0,05 inç) yüksekliğinde biriket hazırlayabilecek miktarda (yaklaşık 1200 g) agregada numunesi tartarak ayrı ayrı tepsilere konulur ve karıştırma sıcaklığında etüve yerleştirilir. Isıtılmış agregada karıştırma kabına yerleştirilir ve iyice karıştırılır. Sonra agregaların ortası çukurlaştırılır ve belirlenen miktarda ve karıştırma sıcaklığına ısıtılmış bitüm bu

EK-12. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri
(ASTM D-1559)

çukura dökülür. Karıştırma sırasında malzeme kaybolmasına sebebiyet vermeyecek şekilde agregalar tamamen bitüm ile kaplanacak şekilde karıştırılır.

Temiz kalıp ve tokmak kaynayan suda veya ısıtma plakasında 93,3-148,9 °C arasında ısıtılır. Kabın dibine uygun kesilmiş filtre kağıdı veya normal kağıt konulur. Tüm karışım kalıba dökülür ve ısıtılmış bir spatula yardımıyla 15 kere kenarı, 10 kerede iç bölge karıştırılır. Sonra yaka çıkarıp, numune yüzeyi düzeltilir.

Sıkıştırmadan hemen önceki sıcaklığın belirtilen limitlerde olması kontrol edilir ve yaka takılıp, kalıp sıkıştırma tabanı üzerine yerleştirilir. Tokmak eksenini kalıp tabanına dik konumda 75 (yüksek düzey trafik yükü için) darbe uygulanarak sıkıştırılır. Sonra taban plakası ve yaka çıkarılır ve kalıp ters çevrilerek yeniden bağlanır. Çevrilen bu yüze de aynı sayıda darbe uygulanır.

Sıkıştırmadan sonra taban plakası çıkartılır ve numune çıkartıcısına yerleştirilir. Daha sonra yaka çıkartılıp, numune dikkatlice alınır ve oda sıcaklığında düzgün ve temiz bir yerde bir gece bırakılır. Numunelerin boyları ölçüldükten sonra havada, suda ve doymun-yüzey kuru ağırlıkları tartılır ve deneye alınır.



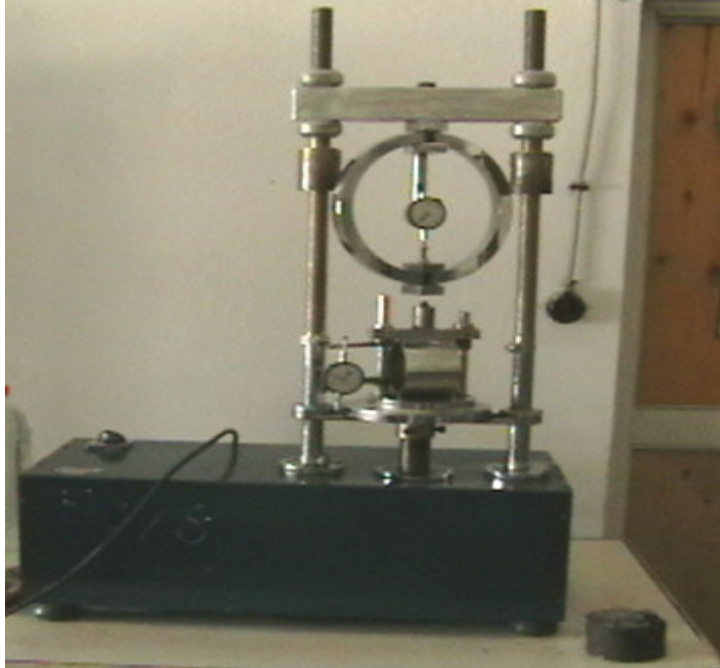
Resim 12.1. Marshall karışım hazırlama ve sıkıştırma aleti

EK-12. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri
(ASTM D-1559)

Deneyin yapılışı:

Numuneleri 60 °C sıcaklığa getirmek için 30-40 dakika su banyosunda veya 2 saat etüvde bekletilir. Klavuz çubuğu ve deney kafaları temizlenip, üst kafa çubukta rahatça kayacak şekilde klavuz çubuğu yağlanır. Briket banyodan veya etüvden çıkarılarak kırma kafasının alt kısmına yerleştirilir. Kafanın üst parçası da briketin üstüne yerleştirilerek, her şeyin deney pozisyonunda olması sağlanır. Flowmetre yerleştirilerek sıfıra ayarlanır ve yük uygulanırken flowmetre kolu kırma kafasının üst parçası karşısında tutulur.

Maksimum yüke ulaşıncaya kadar dakikada 50,8 mm lik bir hız ile yükleme yapılır ve maksimum yük kaydedilir. Flowmetre kolu boşaltılır, maksimum yükün azalmaya başladığı andaki mikrometre okuması kaydedilir ve akma değeri saptanır.



Resim 12.2. Marshall stabilite aleti

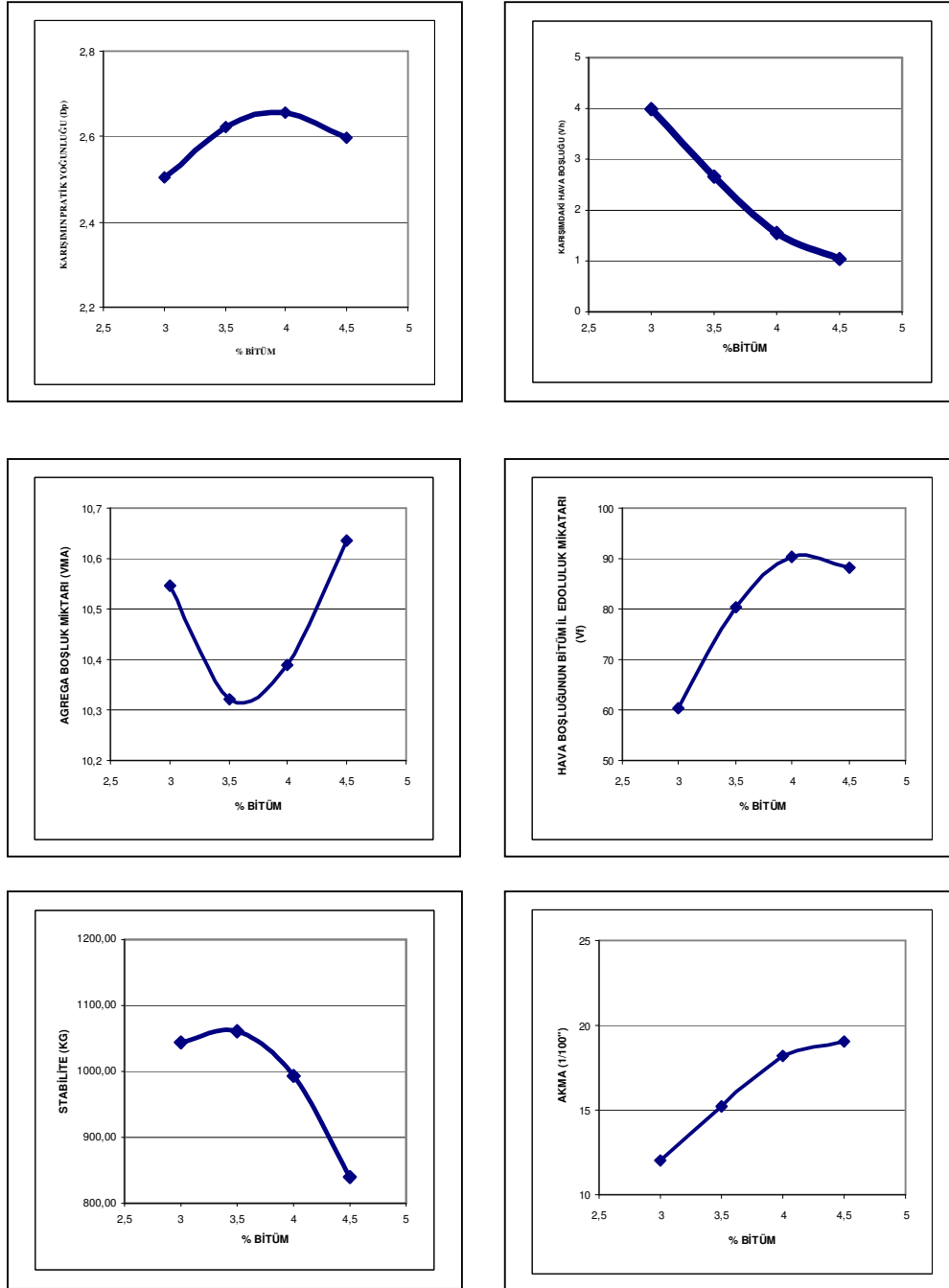
EK-12. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri
(ASTM D-1559)

Numunenin su banyosunda  kartılıp maksimum yük saptamasına kadar geçen süre 30 sn den fazla olmamalıdır. Numune yüksekliği 63,5 mm den farklı ise düzeltme faktörü uygulanır.



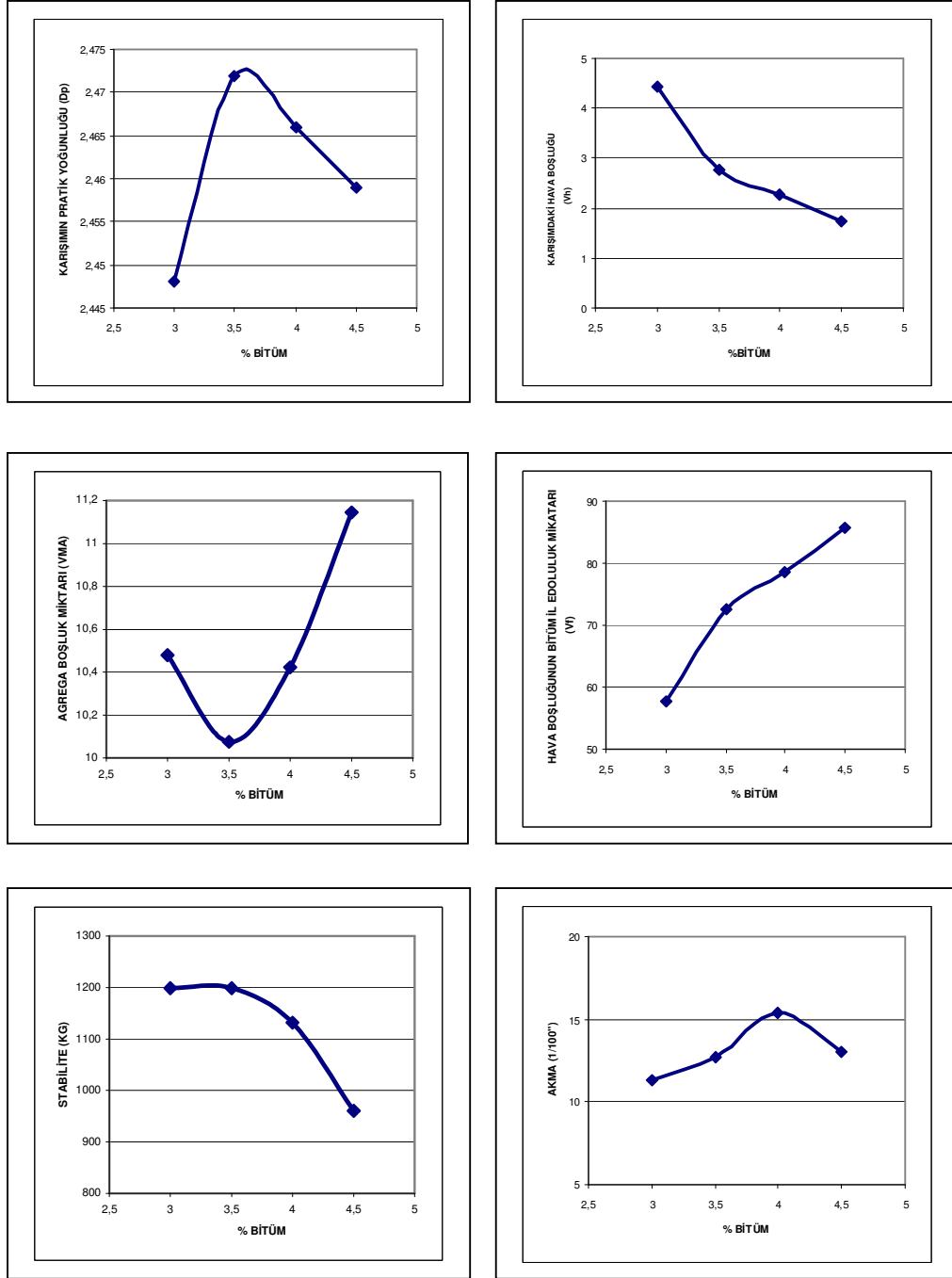
Resim 12.3. Marshall deney numuneleri

EK-12. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri
(ASTM D-1559)



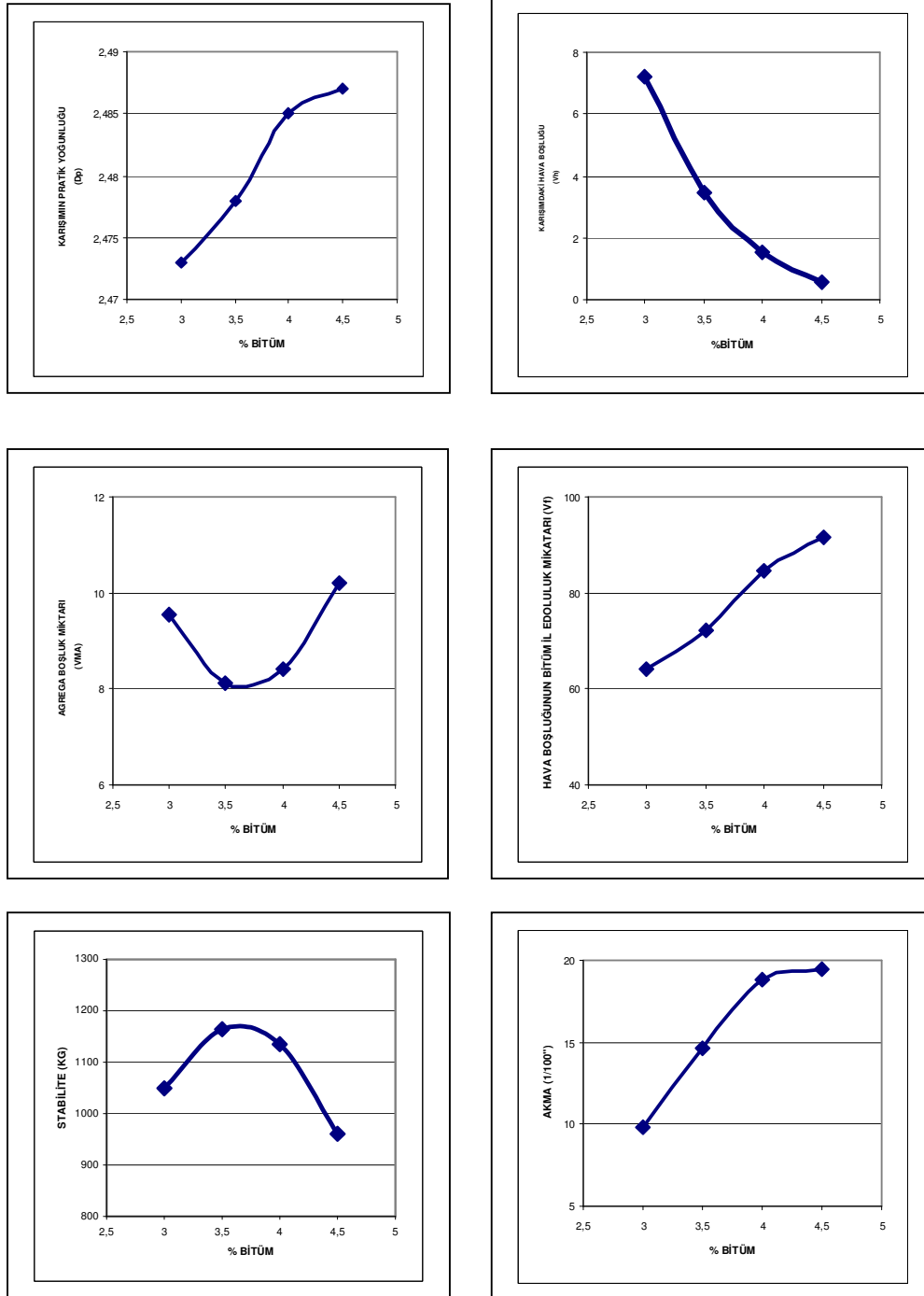
Şekil 12.1. Katkısız bitümün Marshall dizayn sonuçları

EK-12. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri
(ASTM D-1559)



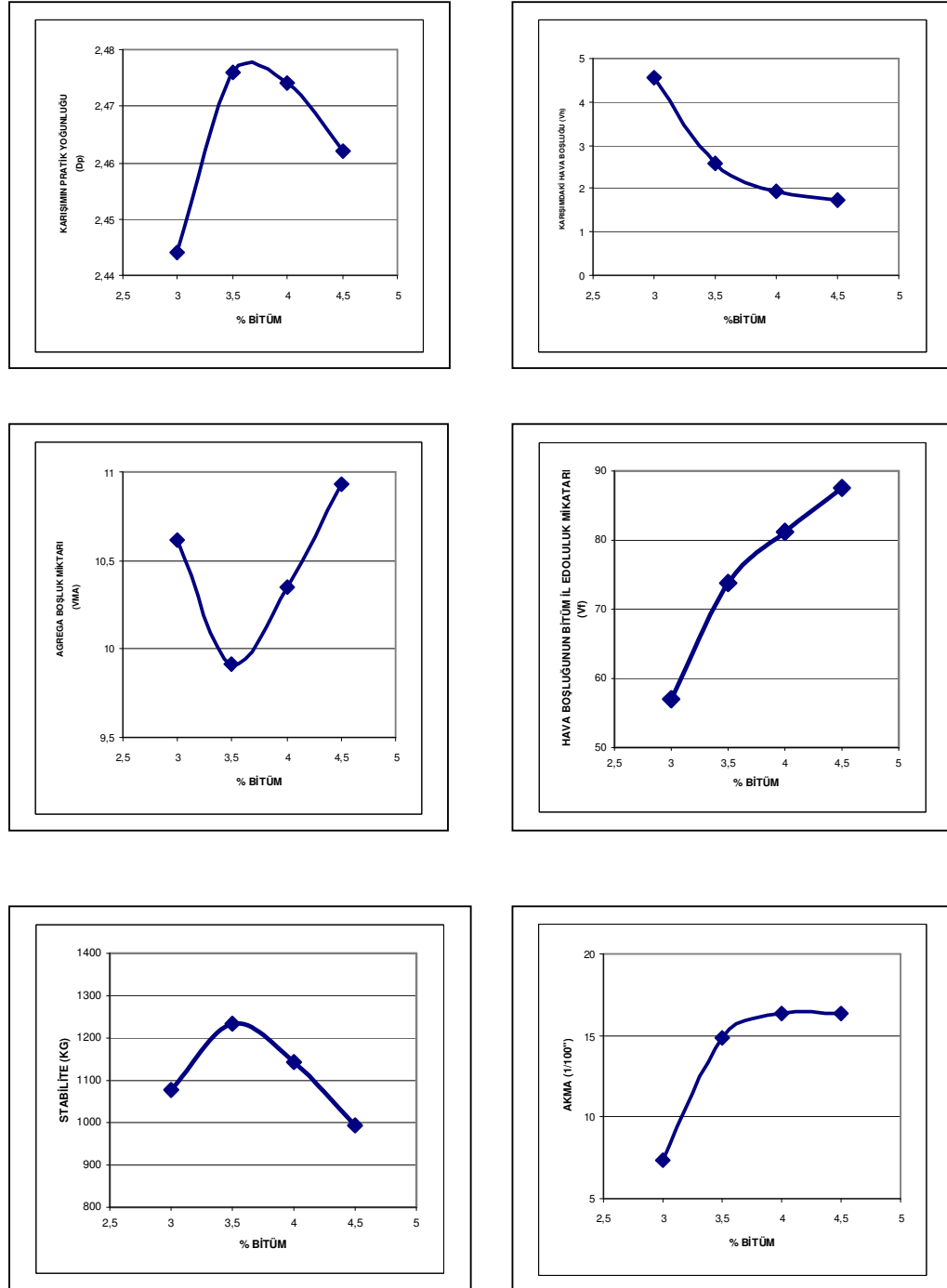
Şekil 12.2. %2 epoksi modifiye bitümün Marshall dizayn sonuçları

EK-12. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri
(ASTM D-1559)



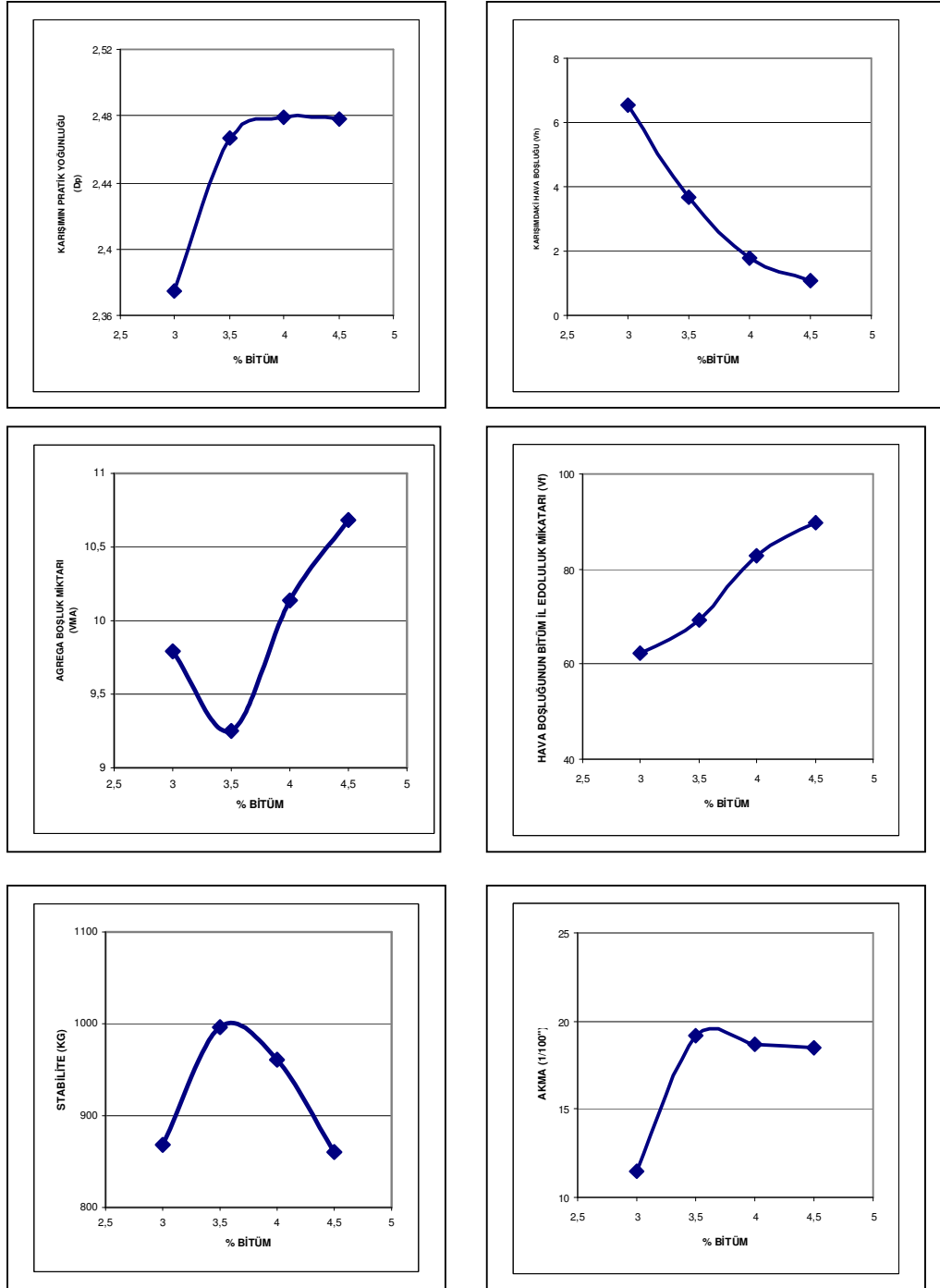
Şekil 12.3. %3 epoksi modifiye bitümün Marshall dizayn sonuçları

EK-12. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri
(ASTM D-1559)



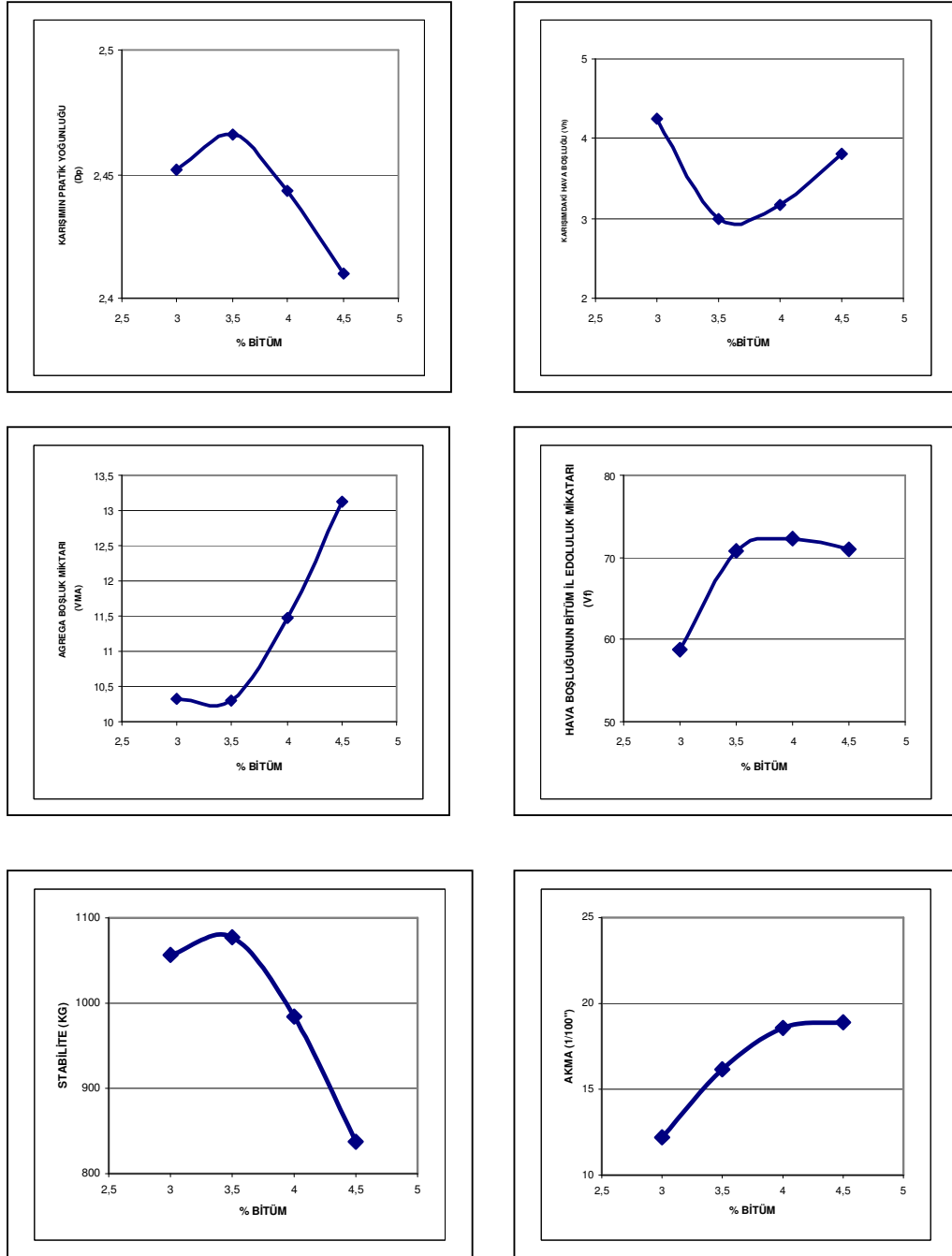
Şekil 12.4. %2 fenolformaldehit modifiye bitümün Marshall dizayn sonuçları

EK-12. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri
(ASTM D-1559)



Şekil 12.5. %3 PTFE modifiye bitümün Marshall dizayn sonuçları

EK-12. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri
(ASTM D-1559)



Şekil 12.6. %0,1 Mg Abietat bileşiği modifiye bitümün Marshall dizayn sonuçları

EK-12. (Devam) Orjinal ve modifiye edilmiş bitümlerin Marshall stabilite deneyleri
(ASTM D-1559)

Çizelge 12.2. Marshall tasarım kriterleri

ÖZELLİKLER	HAFİF VE ORTA TRAFİKLİ YOLLAR				AĞIR TRAFİKLİ YOLLAR, OTOYOLLAR, TIRMANMA ŞERİDİ				BİTÜMLÜ TEMEL	
	BİNDER		AŞINMA		BİNDER		AŞINMA			
	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.
Biriket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	50	-	50	-	75	-	75	-	50	-
Marshall Stabilitesi (kg)	600	-	750	-	750	-	900	-	400	-
Boşluk %	4	6	3	5	4	6	3	5	5	9
Bitümle Dolu Boşluk %	65	75	75	85	65	75	75	85	45	65
Akma (1/100 inç)	10	18	10	18	8	16	8	16	0,08	0,02
Filler/Bitüm Oranı	-	-	-	-	-	1,4	-	1,5	-	-
Bitüm % (Ağırlıkça)	3,5	6,5	4,0	7,0	3,5	6,5	4,0	7,0	2,5	5,5

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇUBUK, Meltem
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 25.02.1973 Görele
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 215 44 41
 Faks :-
 e-mail : melcubuk@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/ Kimya Mühendisliği Bölümü	1999
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Kimya Mühendisliği Bölümü	1995
Lise	Görele Lisesi	1989

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2001-2007	Denizcilik Müsteşarlığı	Mühendis
1997-2001	Petrol Ofisi A.Ş.	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Gürü, M., Çubuk, M., Dursun, Ş., Demirbaş, A., “Biodesulfurization of cayırhan lignites”, Energy Sources, Part A, 28, 559-565 (2006).
- Gürü, M., Tekeli, S., Çubuk, M. K., Çubuk, M., “Recycling of scrap vehicle tyre as elastic surface material”, The First Jordanian International Conference of Materials Science and Engineering, Jordan, 39-44 (2005).

3. Çubuk, M., Gürü, M., Alıcılar, A., “Kömürdeki yanabilir kükürdün giderilmesinde thiobacillus mikroorganizmaların etkinliği”, 7. Uluslararası Yanma Sempozyumu, Ankara, 426-432 (2002).

Hobiler

Masa tenisi, yüzme, kalite sistemleri