

**ESNEK ÜSTYAPILARIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN
SENTETİK METAL VE POLİBOR KATKI MADDELERİYLE
GELİŞTİRİLMESİ**

Deniz ARSLAN

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2010
ANKARA**

Deniz ARSLAN tarafından hazırlanan ESNEK ÜSTYAPILARIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN SENTETİK METAL VE POLİBOR KATKI MADDELERİYLE GELİŞTİRİLMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Kürşat ÇUBUK
Tez Danışmanı, İnşaat Müh. Anabilim Dalı
Prof. Dr. Metin GÜRÜ
Tez Danışmanı, Kimya Müh. Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Ayhan İNAL
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, O.D.T.Ü.
Yrd. Doç. Dr. Kürşat ÇUBUK
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Nail ÜNSAL
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Ebru Arıkan ÖZTÜRK
Gazi Meslek Yüksek Okulu, Gazi Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Seda HATİPOĞLU
Gazi Meslek Yüksek Okulu, Gazi Üniversitesi

Tarih: 24 / 06 / 2010

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

Prof. Dr. Bilal TOKLU
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 bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Deniz ARSLAN

ESNEK ÜSTYAPILARIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN SENTETİK METAL VE POLİBOR KATKI MADDELERİYLE GELİŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Deniz ARSLAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2010

ÖZET

Karayolu ulaşımını sağlamak için farklı özelliklere sahip çeşitli üstyapı türleri kullanılmaktadır. Bu yapılar genel olarak; esnek, rijit ve kompozit olmak üzere üç gruba ayrılır. Bunlar arasında esnek üstyapılar sahip oldukları özelliklere bağlı olarak günümüzde tercih edilmektedirler.

Esnek üstyapılarda trafik-çevre-iklim etkileriyle bozulmalar oluşabilmektedir. Karayolu ulaşım niteliğini arttırmak için bu bozulmaların önlenmesi veya en aza indirilmesi gerekir. Yapı içerisinde bulunan bitüm oranı agregaya kıyasla oldukça düşük olmasına rağmen bitümün sahip olduğu özellikler üstyapının bozulmalara karşı gösterdiği direnç yeteneğini yakından etkiler.

Bu çalışmada, bitümün katkı maddeleriyle modifiye edilerek özelliklerinin iyileştirilmesi suretiyle esnek üstyapı performansının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bitüm modifikasyonunda dokuz farklı katkı maddesi kullanılmıştır. Bu katkı maddeleri, basit bir cihaz grubuyla laboratuvar ortamında sentezlenerek elde edilmiş yeni malzemelerdir. Her bir katkı maddesi, sentezinde kullanılan malzemelere göre en genel haliyle organik esaslı metal bileşiği veya etilen glikol esaslı polibor bileşiği olarak isimlendirilmiştir. Orijinal ve çalışma kapsamında üretilen

katkı maddeleri ile modifiye edilen bitüm numunelerine viskozite testleri, yumuşama noktası testleri, düktilite testleri, dinamik kesme reometre (DSR) testleri, eğilme kirişi reometre (BBR) testleri uygulanmıştır. Ayrıca Marshall testleri ve Nicholson soyulma testleriyle modifikasyonun bitüm-agrega karışımlarındaki etkileri araştırılmıştır.

Test sonuçlarına göre her bir katkı maddesinin bitüm ve bitümlü karışım (bitüm-agrega karışımı) özelliklerinde etkili değişimler meydana getirerek esnek üstyapı performansını geliştirdiği belirlenmiştir. Buna göre çalışma kapsamında sentezlenen uygun katkı maddesi kullanımı ile esnek üstyapıların tekerlek izi oluşumuna karşı direnci, düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamalara karşı direnci ve soyulmaya karşı direnci artmıştır. Bunların yanı sıra, katkı maddeleri bitümlü sıcak karışımların üretim ve uygulama süreçlerinde enerji tasarrufu, bitümün kısa dönem yaşlanma miktarında azalma ve işlenebilirlikte artış sağlamıştır.

Bilim Kodu	: 911.1.134
Anahtar Kelimeler	: Bitüm, modifiye bitüm, sentetik metal katkı maddeleri, polibor katkı maddeleri, esnek üstyapı performansı
Sayfa Adedi	: 298
Tez Yöneticisi	: Yrd. Doç. Dr. Kürşat ÇUBUK Prof. Dr. Metin GÜRÜ

**IMPROVEMENT OF PERFORMANCE PROPERTIES OF FLEXIBLE
PAVEMENTS BY SYNTHETIC METAL AND POLYBORON ADDITIVES
(Ph.D. Thesis)**

Deniz ARSLAN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
June 2010**

ABSTRACT

Various pavement types having different features are used to provide highway transportation. These structures are usually divided into three groups as flexible, rigid and composite. Among these, flexible pavements are preferred today depending on their properties.

In flexible pavements distresses can be formed by the effects of traffic-environment-climate. In order to improve the quality of highway transportation, prevention or minimization of those distresses is necessary. Although bitumen ratio available in structure is so low comparing with aggregate, the properties of bitumen closely effect the resistance ability of pavement against distresses.

In this study, it is aimed to improve the flexible pavement performance by enhancing properties of bitumen by modification with additives. Nine different additives are used in bitumen modification. These additives are new materials obtained by synthesising at laboratory conditions with a simple equipment group. Each additive is named in most general form as organically based metallic compound or ethylene glycol based polyboron compound according to materials used in its synthesis. Viscosity tests, softening point tests, ductility tests, dynamic

shear rheometer (DSR) tests, bending beam rheometer (BBR) tests are applied to the original bitumen samples and the bitumen samples modified by the additives which are produced in the scope of this study. The effects of modification to the bitumen-aggregate mixtures are also investigated by Marshall tests and Nicholson stripping tests.

Depending on the test results it is determined that each additive improve flexible pavement performance by creating effective changes on the properties of bitumen and bituminous mixtures (bitumen-aggregate mixtures). Accordingly, rutting resistance, low temperature cracking resistance and stripping resistance of flexible pavements increased by using the suitable additive synthesised in the scope of the study. Moreover; in the production and application processes of bituminous hot mixtures, additives provided energy saving, decrease in short term aging of bitumen and increase in workability.

Science Code	: 911.1.134
Key Words	: Bitumen, modified bitumen, synthetic metal additives, polyboron additives, flexible pavement performance
Page Number	: 298
Adviser	: Assist.Prof.Dr. Kürşat ÇUBUK Prof. Dr. Metin GÜRÜ

TEŞEKKÜR

Çalışmamın tüm aşamalarında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, aynı zamanda manevi desteklerini de her zaman hissettiğim Hocam Yrd.Doç.Dr. Kürşat ÇUBUK'a ve Hocam Prof.Dr. Metin GÜRÜ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilimsel Araştırma Projesi ile çalışmama finansal olarak destek veren Gazi Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmamda da yanımda olan ve bu günlere onun sayesinde ulaştığımı bildiğim Annem'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xix
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xxii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. BİTÜM.....	4
2.1. Bitümün Kimyasal Yapısı	11
2.2. Bitümün Reolojik Özellikleri	17
2.3. Bitümlü Bağlayıcıların Sınıflandırılması	19
2.4. Bitümün Mühendislik Özellikleri	27
2.4.1. Bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığı	28
2.4.2. Bitümün rijitlik modülü	31
2.4.3. Bitümün kohezyonu	33
2.4.4. Bitümün dayanıklılığı (durabilitesi)	33
2.4.5. Bitümün adezyonu	37
3. BİTÜM MODİFİKASYONU	43
3.1. 2001 - 2008 Yılları Arasında Ülkelere Göre Karayollarında Bitüm Tüketimi	44

Sayfa

3.2. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddeleri ve Modifiye Bitümlerin Esnek Üstyapılarda Sağladığı Faydalar.....	49
3.3. Literatür Araştırması	55
4. ESNEK ÜSTYAPILAR.....	65
4.1. Düşük Standartlı Esnek Üstyapılar	65
4.2. Yüksek Standartlı Esnek Üstyapılar	67
4.3. Bitümlü Sıcak Karışımlar	69
4.3.1. Stabilite	69
4.3.2. Rijitlik	71
4.3.3. Durabilite (Dayanıklılık).....	72
4.3.4. Yorulma mukavemeti	73
4.4. Esnek Üstyapılarda Meydana Gelen Bozulmalar	75
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	78
5.1. Malzeme	79
5.2. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddelerinin Sentezi.....	80
5.3. Modifiye Bitüm Üretim Prosesi	83
5.4. Bitümlere Uygulanan Deneyler	86
5.4.1. Viskozite testleri	87
5.4.2. Marshall testleri.....	92
5.4.3. Yumuşama noktası testleri.....	97
5.4.4. Düktilite testleri.....	98
5.4.5. Soyulma testleri	98
5.4.6. DSR (Dynamic Shear Rheometer) testleri	100

	Sayfa
5.4.7. BBR (Bending Beam Rheometer) testleri	102
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	104
6.1. Viskozite Test Sonuçları	104
6.1.1. Orijinal bitümün viskozite test sonuçları	105
6.1.2. Organik esaslı magnezyum bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları	106
6.1.3. Organik esaslı borik asit bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları	112
6.1.4. Organik esaslı mangan bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları	118
6.1.5. Organik esaslı çinko bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları	124
6.1.6. Organik esaslı kalsiyum bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları	130
6.1.7. Organik esaslı çinkofosfat bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları	136
6.1.8. Trietilen glikol esaslı polibor bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları	148
6.1.9. Dietilen glikol esaslı polibor bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları	156
6.1.10. Monoetilen glikol esaslı polibor bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları	161
6.2. Bitüm Modifikasyonunda Optimum Katkı Maddesi Miktarı Tayini	171
6.2.1. Organik esaslı magnezyum bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini	172
6.2.2. Organik esaslı borik asit bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini	173

Sayfa

6.2.3. Organik esaslı mangan bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini	174
6.2.4. Organik esaslı çinko bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini	175
6.2.5. Organik esaslı kalsiyum bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini	176
6.2.6. Organik esaslı çinkofosfat bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini	177
6.3. Marshall Test Sonuçları	178
6.4. Yumuşama Noktası Test Sonuçları.....	188
6.5. Düktilite Test Sonuçları	190
6.6. Soyulma Direnci Test Sonuçları.....	191
6.7. BBR Test Sonuçları	196
6.8. DSR Test Sonuçları	201
7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	205
KAYNAKLAR	212
EKLER	217
EK-1 Agregat ve bitüm özgül ağırlık tayini	218
EK-2 Viskozite test cihazı	223
EK-3 Briket yüksekliğine bağlı düzeltme faktörleri	224
EK-4 Briket hacmine bağlı düzeltme faktörleri	225
EK-5 Marshall briketleri.....	226
EK-6 Yumuşama noktası ve düktilite ölçümleri.....	227
EK-7A Organik esaslı magnezyum bileşiği (OEMAGB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler.....	228
EK-7B OEMAGB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim	233

Sayfa

EK-8A	Organik esaslı borik asit bileşigi (OEBAB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler.....	235
EK-8B	OEBAB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim	240
EK-9A	Organik esaslı mangan bileşigi (OEMANB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler.....	242
EK-9B	OEMANB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim	247
EK-10A	Organik esaslı çinko bileşigi (OEÇB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler.....	249
EK-10B	OEÇB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim	254
EK-11A	Organik esaslı kalsiyum bileşigi (OEKB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler.....	256
EK-11B	OEKB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim.....	261
EK-12A	Organik esaslı çinkofosfat bileşigi (OEÇFB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler.....	263
EK-12B	OEÇFB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim	268
EK-13	Trietilen glikol esaslı polibor bileşigi (TEGPB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler.....	270
EK-14	TEGPB, DEGPB ve MEGPB katkılı bitümler için 50°C ile 90°C arasında konsantrasyona bağlı viskozite değişimleri	274
EK-15	Orijinal bitüm ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları.....	277
EK-16	Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan Marshall tasarım grafikleri.....	278
EK-17	Orijinal ve modifiye bitümlerle I.Grup üretimde (1.üretim günü) hazırlanan briketler ve bu briketlere ait ölçüm ve hesaplamalar	281
EK-18	Orijinal ve modifiye bitümlerle II.Grup üretimde (2.üretim günü) hazırlanan briketler ve bu briketlere ait ölçüm ve hesaplamalar	282
EK-19	Orijinal ve modifiye bitümlerle III.Grup üretimde (3.üretim günü) hazırlanan briketler ve bu briketlere ait ölçüm ve hesaplamalar	284
EK-20	Orijinal ve modifiye bitümlerle IV.Grup üretimde (4.üretim günü) hazırlanan briketler ve bu briketlere ait ölçüm ve hesaplamalar	286
EK-21	Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)	288
EK-22	Superpave test cihazları	297
	ÖZGEÇMİŞ	298

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. KGM'nin sorumluluğunda bulunan yol ağı uzunluğunun satih cinsine göre dağılımı (km)	1
Çizelge 2.1. Asfalt emülsiyon tipleri ve kullanım alanları	10
Çizelge 2.2. Bitümün kimyasal kompozisyonu	12
Çizelge 2.3. Asfalt çimentolarına ait penetrasyon sınıflandırması	20
Çizelge 2.4. Asfalt çimentoları için standart viskozite sınıflandırması	21
Çizelge 2.5. Katbek asfaltların sınıflandırılması	22
Çizelge 2.6. Emülsiyon asfaltların sınıflandırılması	23
Çizelge 2.7. Yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar için standart AR viskozite sınıflandırması	24
Çizelge 2.8. PG sınıflandırma sisteminde kullanılan test cihazları ve kullanım amaçları	26
Çizelge 3.1. Karayollarında tüketilen bitüm miktarı (milyon ton)	44
Çizelge 3.2. Karayollarında tüketilen bitümdeki modifikasyon oranı (%)	45
Çizelge 3.3. Bitüm modifikasyonunda kullanılan bazı katkı maddeleri	52
Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan bazalt türü agreganın kimyasal özellikleri	80
Çizelge 5.2. Katkı maddelerine göre modifiye bitüm imalat şartları	84
Çizelge 5.3. 50°C-90°C aralığındaki viskozite ölçümlerinde kullanılan silindirik çubuk dönüş hızları	91
Çizelge 5.4. Tip 2 gradasyon dağılımı ve tasarımda kullanılan şartname ortalama değerleri	95
Çizelge 6.1. Orijinal bitüme ait viskozite ölçümleri	105

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.2. Orijinal ve OEMAGB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)	107
Çizelge 6.3. OEMAGB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler	110
Çizelge 6.4. Orijinal ve OEBAB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)	113
Çizelge 6.5. OEBAB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler	116
Çizelge 6.6. Orijinal ve OEMANB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)	119
Çizelge 6.7. OEMANB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler	122
Çizelge 6.8. Orijinal ve OEÇB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)	125
Çizelge 6.9. OEÇB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler	128
Çizelge 6.10. Orijinal ve OEKB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)	131
Çizelge 6.11. OEKB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler	134
Çizelge 6.12. Orijinal ve OEÇFB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)	137
Çizelge 6.13. OEÇFB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler	140
Çizelge 6.14. Organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilen bitümün yüksek standartlı esnek üstyapılarda sağlayacağı avantajlar	142

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.15. Bitüme eklenen katkı maddesi türü ve miktarına göre plent sıcaklıkları (°C).....	144
Çizelge 6.16. Orijinal ve TEGPB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)	149
Çizelge 6.17. TEGPB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler	152
Çizelge 6.18. Orijinal ve TEGPB ihtiva eden bitümlerin 50°C-90°C arasındaki viskozite ölçüm sonuçları (mPa.s)	154
Çizelge 6.19. TEGPB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler	155
Çizelge 6.20. Orijinal ve DEGPB ihtiva eden bitümlerin 50°C-90°C arasındaki viskozite ölçüm sonuçları (mPa.s)	157
Çizelge 6.21. DEGPB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler	160
Çizelge 6.22. Orijinal ve MEGPB ihtiva eden bitümlerin 50°C-90°C arasındaki viskozite ölçüm sonuçları (mPa.s)	162
Çizelge 6.23. MEGPB modifikasyonunun orijinal bitüm viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler.....	165
Çizelge 6.24. Orijinal ve TEGPB katkılı bitümlerin 200 mPa.s viskozite değerine sahip oldukları sıcaklıklar	167
Çizelge 6.25. Orijinal ve TEGPB katkılı bitümlerin 3000 mPa.s viskozite değerine sahip oldukları sıcaklıklar	168
Çizelge 6.26. Organik esaslı metal bileşikleri için hesaplama aralıkları ve bu aralıklarda kullanılan hesaplama yöntemi	171
Çizelge 6.27. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEMAGB için)	172

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.28. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEBAB için)	173
Çizelge 6.29. OEBAB modifikasyonuyla farklı sıcaklıklarda bitüm viskozitesinde en büyük değişimin olduğu katkı maddesi aralıkları.....	174
Çizelge 6.30. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEMANB için)	175
Çizelge 6.31. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEÇB için).....	175
Çizelge 6.32. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEKB için).....	176
Çizelge 6.33. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEÇFB için)	177
Çizelge 6.34. Bitüm özgül ağırlığının belirlenmesinde kullanılan ölçüm değerleri	179
Çizelge 6.35. Agregaya ait özgül ağırlık değerleri.....	180
Çizelge 6.36. Briketlerde kullanılan bitüm oranına bağlı olarak Marshall tasarımında elde edilen ortalama değerler	181
Çizelge 6.37. Optimum bitüm oranı	181
Çizelge 6.38. Marshall briketi üretim süreci	183
Çizelge 6.39. Orijinal ve modifiye bitümlere ait yumuşama noktaları	188
Çizelge 6.40. Düktilite test sonuçları	190
Çizelge 6.41. Bitümlü karışımların soyulma dirençleri ve soyulma oranları.....	192
Çizelge 6.42. BBR test sonuçları	196

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.43. -18°C'deki BBR test sonuçları	200
Çizelge 6.44. DSR test sonuçları	202
Çizelge 6.45. $G^*/\sin \delta$ değerleri	202
Çizelge 7.1. Organik esaslı metal bileşiklerinin bitüm ve bitümlü karışım özelliklerinde meydana getirdikleri değişimler	206
Çizelge 7.2. Etilen glikol esaslı polibor bileşiklerinin bitüm ve bitümlü karışım özelliklerinde meydana getirdikleri değişimler	207
Çizelge 7.3. Katkı maddelerinin tavsiye edilen kullanım alanları	210

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Karayolu üstyapısında kullanılan bitüm türleri	5
Şekil 2.2. Petrolün ayrıştırılma prosesi	7
Şekil 2.3. Bitümün kimyasal yapısı	13
Şekil 2.4. Sol tipi bitüm	16
Şekil 2.5. Jel tipi bitüm	16
Şekil 2.6. Sıcaklık ve yükleme süresinin bitüm rijitliğine etkisi	32
Şekil 2.7. Karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet sırasında bitümün yaşlanması	36
Şekil 4.1. Yüksek standartlı esnek üstyapılara ait tipik enkesit	67
Şekil 4.2. Bitümlü karışımlarda yük ve yorulma ömrü arasındaki sıcaklığa bağlı ilişki	74
Şekil 5.1. DSR testi deney düzeneği.....	101
Şekil 6.1. Orijinal bitüme ait viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	106
Şekil 6.2. Orijinal ve OEMAGB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri	108
Şekil 6.3a. Bitüm viskozitesinin OEMAGB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında).....	109
Şekil 6.3b. Bitüm viskozitesinin OEMAGB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında).....	109
Şekil 6.4. Orijinal ve OEBAB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri	114
Şekil 6.5a. Bitüm viskozitesinin OEBAB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında).....	115
Şekil 6.5b. Bitüm viskozitesinin OEBAB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında).....	115

Şekil	Sayfa
Şekil 6.6. Orijinal ve OEMANB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri	120
Şekil 6.7a. Bitüm viskozitesinin OEMANB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında).....	121
Şekil 6.7b. Bitüm viskozitesinin OEMANB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında).....	121
Şekil 6.8. Orijinal ve OEÇB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri	126
Şekil 6.9a. Bitüm viskozitesinin OEÇB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında).....	127
Şekil 6.9b. Bitüm viskozitesinin OEÇB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında).....	127
Şekil 6.10. Orijinal ve OEKB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri	132
Şekil 6.11a. Bitüm viskozitesinin OEKB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında).....	133
Şekil 6.11b. Bitüm viskozitesinin OEKB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında).....	133
Şekil 6.12. Orijinal ve OEÇFB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri	138
Şekil 6.13a. Bitüm viskozitesinin OEÇFB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında).....	139
Şekil 6.13b. Bitüm viskozitesinin OEÇFB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında).....	139
Şekil 6.14. Orijinal ve TEGPB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri	150
Şekil 6.15a. Bitüm viskozitesinin TEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında).....	151
Şekil 6.15b. Bitüm viskozitesinin TEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında).....	151

Şekil	Sayfa
Şekil 6.16. Orijinal ve DEGPB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri	158
Şekil 6.17a. Bitüm viskozitesinin DEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (50°C ve 60°C)	159
Şekil 6.17b. Bitüm viskozitesinin DEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (70°C, 80°C ve 90°C)	159
Şekil 6.18. Orijinal ve MEGPB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri	163
Şekil 6.19a. Bitüm viskozitesinin MEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (50°C ve 60°C)	164
Şekil 6.19b. Bitüm viskozitesinin MEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (70°C, 80°C ve 90°C)	164
Şekil 6.20. Modifiye bitümlerin karışım stabilitesinde meydana getirdikleri oransal değişimler.....	184
Şekil 6.21. Sünme rijitliği (S) değerleri	197
Şekil 6.22. Bitümün sünme rijitliğinde meydana gelen azalma oranları.....	198
Şekil 6.23. Sünme oranı (m) değerleri	199
Şekil 6.24. Bitümün m değerinde meydana gelen artış oranları	199
Şekil 6.25. Bitümde TEGPB ve DEGPB modifikasyonu ile $G^*/\sin\delta$ değerinde meydana gelen artış oranları	203

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Trafik simulasyonlu soyulma deneylerinde kullanılan cihaz	41
Resim 4.1. Esnek üstyapıda oluşan tekerlek izi bozulması	76
Resim 4.2. Esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda oluşan çatlamlar	77
Resim 5.1. Organik esaslı çinko bileşiği sentezi	82
Resim 5.2. Trietilen glikol esaslı polibor bileşiği sentezi	83

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Penetrasyon sıcaklık indeksi
B(OH)₃	Borik asit
c	Kohezyon
CaO	Kalsiyum oksit
g	Gram
G*	Kompleks kesme modülü
km	Kilometre
m	Sünme oranı
MgO	Magnezyum oksit
MnO₂	Mangan dioksit
PI	Penetrasyon indeksi
S	Sünme rijitliği
s	Saniye
δ	Faz açısı
τ	Bitümlü sıcak karışımın kayma mukavemeti
φ	İçsel sürtünme açısı
ZnO	Çinko oksit
ZnPO₄	Çinko fosfat

Kısaltmalar	Açıklama
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Asfalt çimentosu
BBR	Eğilme kirişi reometresi
DEGPB	Dietilen glikol esaslı polibor bileşiği
Dp	Yoğunluk
DSR	Dinamik kesme reometresi
EPDM	Etilen propilen diene monomer
EVA	Etilen vinil asetat
GMA	Glisidil metakrilat
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
MEGPB	Monoetilen glikol esaslı polibor bileşiği
OEBA	Organik esaslı borik asit bileşiği
OEÇB	Organik esaslı çinko bileşiği
OEÇFB	Organik esaslı çinko fosfat bileşiği
OEKB	Organik esaslı kalsiyum bileşiği
OEMAGB	Organik esaslı magnezyum bileşiği
OEMANB	Organik esaslı mangan bileşiği
PPA	Polifosforik asit
SBR	Stiren bütadien kauçuk
SBS	Stiren butadien stiren
SHRP	Stratejik karayolu araştırma programı
TEGPB	Trietilen glikol esaslı polibor bileşiği
Vf	Bitümle dolu boşluk oranı
Vh	Boşluk oranı
VMA	Agregalar arası boşluk oranı

1. GİRİŞ

Karayolu ulaşımı farklı malzeme, imalat ve performans özelliklerine sahip üstyapılarla sağlanmaktadır. Bu yapılar genel olarak; esnek, rijit ve kompozit olmak üzere üç grupta incelenebilir. Bunlar içerisinde esnek üstyapılar günümüzde daha çok tercih edilmektedir.

Esnek üstyapılar, düşük standartlı ve yüksek standartlı olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilir. Bir karayolu kesiminde bu uygulamalardan hangisinin tercih edileceği o kesimdeki trafik hacmi ve kompozisyonu ile ilişkilidir. Trafik hacminin yüksek olduğu ve ağır taşıt trafiğinin mevcut olduğu kesimlerde yüksek standartlı esnek üstyapılar kullanılmaktadır.

Ülkemizde esnek üstyapı uygulamaları oldukça fazladır. Bu durum 2010 yılı itibarıyla Karayolları Genel Müdürlüğü'nün (KGM) sorumluluğunda bulunan yol ağı uzunluğunun yol sınıfı ve satıh cinsine göre dağılım değerlerinin sunulduğu Çizelge 1.1'de görülmektedir.

Çizelge 1.1. KGM'nin sorumluluğunda bulunan yol ağı uzunluğunun satıh cinsine göre dağılımı (km) [1]

Yol Sınıfı	Asfalt Betonu	Sathi Kaplama	Stabilize	Diğer	Toplam Uzunluk
Otoyollar	2036	-	-	-	2036
Devlet Yolları	7488	23282	137	364	31271
İl Yolları	1193	26500	1353	1902	30948
Toplam Uzunluk	10717	49782	1490	2266	64255

Çizelge 1.1'de görüldüğü üzere Türkiye'deki otoyollar, devlet yolları ve il yolları KGM'nin sorumluluğu altında bulunmaktadır. 2010 yılı itibarıyla toplam yol ağı uzunluğu 64255 km olup bunun 10717 km'si asfalt betonu yani yüksek standartlı esnek üstyapı, 49782 km'si sathi kaplama yani düşük

standartlı esnek üstyapı türündedir. Diğer karayolu sınıflarına göre geometrik standartları daha yüksek olan otoyolların 2010 yılı itibarıyla tamamının yüksek standartlı esnek üstyapı olarak inşaa edilmiş olması bu tür üstyapı tipinin diğerlerine göre tercih edilir özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Çizelge 1.1'deki veriler ışığında; 2010 yılı için Türkiye'deki otoyol, devlet ve il yollarının %94,15'inin bitümlü karışımlar kullanılarak inşa edilen yüksek veya düşük standartlı esnek üstyapılar olduğu anlaşılmaktadır.

Esnek üstyapılar agrega ve bitümün gerek sırayla gerekse plentte (sıcak karışım üretim tesisinde) karışım haline getirildikten sonra (bitümlü sıcak karışım) yola serilip sıkıştırılmasıyla inşaa edilirler. Esnek üstyapıların içerdiği bitüm oranı agregayla kıyaslandığında oldukça düşük olmasına rağmen bitümün sahip olduğu özellikler üstyapı performansını yakından etkiler. Bu sebeple esnek üstyapılarda çeşitli iklim koşullarına göre özellikleri geliştirilmiş bitümlerin kullanılması yapı performansının artmasını sağlayacaktır.

Esnek üstyapılarda tasarım-imalat-malzeme koşulları ve/veya trafik-iklim-çevre etkilerine bağlı olarak çeşitli bozulmalar/kusurlar oluşabilmektedir. Bunlar deformasyonlar, ayrışmalar ve çatlamlar olmak üzere üç grupta toplanabilir. Deformasyon tipi bozulma olan tekerlek izi ile çatlak tipi bozulma olan yorulma çatlakları ve düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklar esnek üstyapılarda görülen önemli bozulmalardır.

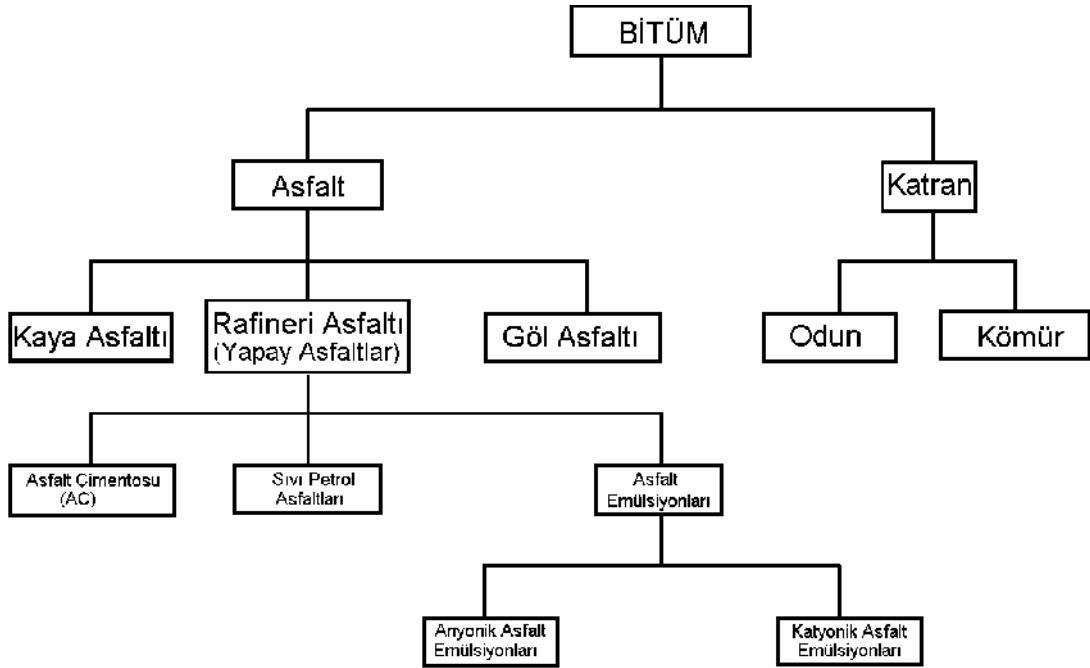
Esnek üstyapılarda meydana gelen bozulmalar üstyapının performans özelliklerini olumsuz yönde etkilemekte ve hatta hizmet ömründe azalma yaratabilmektedir. Bu yüzden bu tür bozulmaların oluşumunu önlemek, azaltmak veya geciktirmek amacıyla agrega-bitüm karışımlarının özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla çeşitli katkı maddeleri kullanılarak bitüm veya agrega-bitüm karışımları modifiye edilmektedir. Böylece özellikleri iyileştirilmiş bitümle veya özellikleri iyileştirilmiş bitüm-agrega karışımlarıyla hazırlanan esnek üstyapıların trafik-iklim-çevre kaynaklı bozulmalara karşı dirençleri arttırılabilmektedir.

Bu çalışmada esnek styapıların tekerlek izi ve düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara karşı daha dirençli olması ve buna bağlı olarak üstyapı performansının arttırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda esnek styapılarda kullanılan bitüm çeşitli katkı maddeleri ile modifiye edilerek özellikleri iyileştirilmiş ve bu suretle esnek üstyapı performansının artması sağlanmıştır. Çalışmada bitüm modifikasyonunda 9 farklı katkı maddesi kullanılmıştır. Bu malzemeler ticari olarak satın alınabilen veya herhangi bir malzemenin kullanımından sonra arta kalan veya bu yöndeki çalışmalarda daha önce kullanılmış olan malzemeler olmayıp laboratuvar ortamında sentezlenerek elde edilmişlerdir. Her bir katkı maddesi sentezinde kullanılan malzemelere göre en genel haliyle organik esaslı metal bileşiği veya etilen glikol esaslı polibor bileşiği olarak isimlendirilmiştir. Bu genel isimlerin yanı sıra her bir katkı maddesi için sentezinde kullanılan metal oksit veya etilen glikol türüne bağlı olarak özel isimler de belirlenmiştir. Bu katkı maddeleri ile modifiye edilmiş bitüm kullanımı tekerlek izi ve düşük sıcaklıklarda meydana gelen atlamalardan daha farklı bozulmalarda da iyileşme sağlamıştır ve esnek üstyapının farklı süreçlerinde (malzeme hazırlama, inşaat) eşitli uygulama avantajları sunmuştur.

2. BİTÜM

Yüksek standartlı esnek üstyapılar, belirli malzeme özellikleri ve yapım şartlarına sahip alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşur. Aşınma tabakası ve binder tabakası bu tür üstyapılarda kaplama tabakaları olarak kullanılmaktadır. Kaplama tabakaları yapının üst kısmında bulunmakta ve bulundukları konum itibarıyla trafik-iklim-çevre etkilerine daha çok maruz kalmaktadır. Bu yüzden yeterli dirence sahip olarak imal edilmeleri yüksek standartlı esnek üstyapıların yeterli performans göstermesi bakımından oldukça önem taşır. Yüksek standartlı esnek üstyapılarda kaplama tabakaları ve gerekli hallerde kaplama tabakalarının hemen altına yapılan bitümlü temel tabakası, belirli oranda agrega ve bitüm içeren karışımlarla inşaa edilir. Karışım içerisindeki bitüm miktarı gerek ağırlıkça gerekse hacimce agregaya göre oldukça azdır. Buna rağmen bitümün sahip olduğu özellikler esnek üstyapıların performans özelliklerini oldukça etkilemektedir. Bu yüzden bu bölümde esnek üstyapılar için önemli bir malzeme olan bitüm ve özellikleri ayrıntılı olarak incelenecektir.

Bitüm, doğal veya pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da bunların her ikisinin bir birleşimi olup çoğu kez bunların gaz, sıvı, yarı-katı ya da katı halde olabilen metal olmayan türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon disülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanır [2, 3]. Bitkisel kökenli kömürden elde edilen katranlar ve hayvansal kökenli petrolden elde edilen asfaltlar esnek üstyapı tabakalarında kullanılan bitüm türleridir [4]. Her iki bağlayıcı türü de bitümlü bağlayıcı (bitümlü malzeme) olarak adlandırılabilir. Ancak, gerek asfaltların gerekse katranların yapılarına bağlı olarak farklı özelliklere sahip oldukları unutulmamalıdır. Petrol asfaltları neredeyse tamamen bitümden oluşurlar, kömür katranlardaki bitüm oranı ise daha düşüktür [5]. Karayolu üstyapısında kullanılan bitüm türleri Şekil 2.1’de sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.1. Karayolu üstyapısında kullanılan bitüm türleri [2]

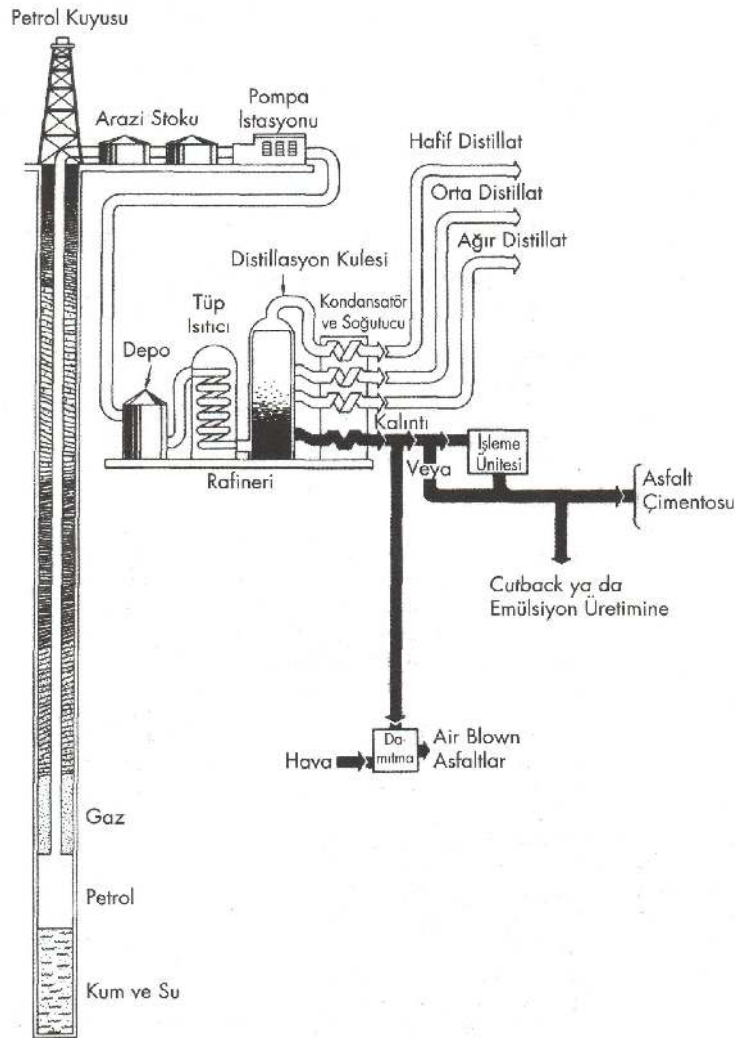
Katran, başlıca kömürün ve odunun kapalı bir sistem içerisinde damıtılmasıyla elde edilir. Bu şekilde elde edilen katrana ham katran denir. Katranlar daha ziyade arıtdıktan sonra kullanılırlar. Üstyapı tabakalarında bağlayıcı olarak kullanılan katranın kömür kökenli olması tercih edilir [2]. Katranlar kimyasal değişim sonucu oluşan ürün olduklarından dolayı doğal olarak bulunmayıp kömür, odun, şeker gibi organik maddelerin damıtılmasıyla elde edilirler [3] ve ham kömür katranı, ham odun katranı olmak üzere genelde elde edildiği madde ile birlikte anılırlar [6].

Asfaltlar, doğal halde bulunan veya petrolün rafineride işlenmesiyle elde edilen ve içindeki hakim bileşenin bitüm olduğu, koyu kahverengi ile siyah arası renge sahip olan bağlayıcı özellikte bir malzemedir [5]. Asfaltlar katı, yarı katı ya da sıvı halde bulunabilirler ve başlıca hidrokarbonlardan oluşurlar [2]. Sahip oldukları bağlayıcılık, su geçirmezlik ve reolojik özelliklerinden dolayı yol kaplamalarında kullanımları özellikle tercih edilmektedir. Asfaltlar, doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar olmak üzere iki grupta incelenebilmektedirler.

Kaya asfaltı, göl asfaltı ve gilsonit doğal olarak bulunabilen asfalt türleridir. Doğal asfaltlar, petrolün yeryüzüne çıkması ve zamanla yapısındaki uçucu maddeleri kaybetmesi sonucu oluşmaktadırlar. Kaya asfaltı, poroz özellikteki kayaların absorbe ettiği petroldeki uçucu maddelerin zamanla kaybı sonucu oluşur. Bu tip kayalarda %20 varan asfalt bulunabilmektedir [4]. Madencilik yöntemleriyle yeraltından veya taşocaklarından çıkarılan bu ürünün başlıca yatakları Fransa'nın Gard bölgesinde, İsviçre'nin Val de Travers bölgesindeki Neuchatel'de ve İtalya'nın Ragusa bölgesinde bulunmaktadır [6]. Kaya asfaltları ülkemizde daha çok Güneydoğu Anadolu'da bulunmakla beraber kullanılmamaktadır. Bir başka doğal asfalt türü olan göl asfaltı Orta Amerika'da Trinidad ve Bermuda'da göl halinde bulunur [4]. Trinidad adasında çok miktarda asfalt birikintileri bulunmaktadır. Adanın güney tarafında ve denizden 1 km. uzakta bulunan "asfalt gölü" dünyanın en büyük rezervlerinden biridir. Gölden elde edilen, ısıtılarak rafine edilen ve bünyesindeki suyun buharlaştırıldığı erimiş malzeme ince eleklerden geçirilerek iri daneli ve bitkisel maddelerden ayrılır. Bu ürün tipik olarak ağırlıkça %54 bağlayıcı madde, %36 mineral madde ve %10 organik madde ihtiva eder [6]. Gilsonit ise pratik olarak saf doğal asfalt olup çok serttir [7]. Utah ve Colorado bölgelerinde bulunan gilsonitin yumuşama noktası 250-350°F civarındadır ve 77°F'taki penetrasyonu yaklaşık olarak 0-3 arasında değişir [3]. Gilsonit, rafineri bitümü içerisinde katkı maddesi olarak kullanılabilir [8].

Yapay asfaltlar (petrol asfaltları), ham petrolün ayrıştırılmasından elde edilirler. Şekil 2.2'de petrolün ayrıştırılma aşamaları görülmektedir. Petrol kuyularından çıkarılan ham petrol öncelikle arazide depolanır. Arazi depolarından pompalama istasyonuna ve ardından ana depoya gönderilir. Ana depolardan da ısıtma kulelerine aktararak sıcaklığı yükseltilir. Daha sonra damıtma kulelerine gelir. Kaynama noktaları nispeten düşük olan yani kolay uçucu olan kısımlar bu kulelerin üst kısmından çıkar ve soğutucularda yoğunlaştırılarak ayrılır. Bu kısımlar hafif ürünleri, daha az uçuculuğa sahip olanlar benzer şekilde orta ürünleri ve en ağır uçanlar ağır ürünleri

oluştururlar. Başlıca asfalt içeren kalıntı maddeleri kulinin dibinde birikir. Bu biçimde ham petrol başlıca altı kısma ayrılmış olur. Bunlar; nafta, benzin (gazolin), gazyağı (kerosen), motorin (dizel), yağlama yağları ve ağır kalıntı maddeleridir. Gerekli durumlarda bunlara yeniden damıtma işlemi uygulanmasıyla daha değişik petrol ürünleri elde edilebilmektedir [2, 4].



Şekil 2.2. Petrolün ayrıştırılma prosesi [5]

Kalıntı maddelerinin daha ileri damıtılması ile yavaş kür olan yol yağları elde edilir ve geriye asfalt çimentosu (AC) kalır. Şartların değiştirilmesiyle istenilen penetrasyon dereceli asfalt çimentosu elde edilebilmektedir. Asfalt çimentoları, sahip oldukları özellikler ve kıvam bakımından doğrudan doğruya esnek üstyapılarda kullanılmak için hazırlanmış petrol kökenli asfaltlardır. 10-

300 arasında değişen penetrasyon derecesine sahip olabilirler ve bu değerlere göre sınıflandırılırlar [2]. Bununla birlikte, farklı şartnamelerde asfalt çimentoları için verilen penetrasyon derece aralığı değişebilmektedir [6]. Esnek  styapılarda sıkça kullanılan bu tip malzeme genellikle asfalt  imentosu, penetrasyon asfaltı, sadece asfalt, en genel ismiyle bitümlü bağlayıcı veya kısaca bitüm olarak adlandırılabilir. Asfalt  imentoları normal koşullar altında oda sıcaklığında katı halde bulunurlar. Isıtılarak veya uygun bir çözücü (benzin, gazyağı,...vs.) ile karıştırılarak veya küçük parçacıklar halinde suyla karıştırılarak akıcı hale getirilebilirler. Asfalt  imentosunun uygun çözücüler ile karıştırılmasıyla sıvı petrol asfaltları (katbek asfaltlar), su ile karıştırılmasıyla asfalt emülsiyonları elde edilmektedir.

Sıvı petrol asfaltları, kullanılan çözücüye bağlı olarak çabuk k r olan, orta hızda k r olan ve yavaş k r olan olmak   re üç farklı türde hazırlanabilir.  abuk k r olan (Rapid Cure) sıvı petrol asfaltları, asfalt çimentosuna benzin veya nafta gibi kolay uçabilen bir çözücünün eklenmesiyle, orta hızda k r olan (Medium Cure) sıvı petrol asfaltları asfalt çimentosuna benzin veya nafta yerine orta derecede uçucu bir çözücünün (gazyağı) eklenmesiyle, genellikle yol yağları olarak adlandırılan ve yavaş k r olan (Slow Cure) sıvı petrol asfaltları ise asfalt çimentosunun ağır yağlarla inceltilmesiyle elde edilmektedir. Sıvı petrol asfaltlarının akıcılıkları eklenen çözücü miktarına bağlı olarak değişir. Her bir sıvı petrol asfaltı türü sahip oldukları farklı akıcılık özelliklerine bağlı olarak kinematik viskozite değerlerine göre kendi i lerinde tiplere ayrılmaktadır [2]. Sıvı petrol asfaltlarının soğuk agrega ile birlikte kullanılabilme özelliği mevcut olup yol inşaatında birçok uygulamada kullanılabilirler [2, 5].

Emülsiyon, birbiri içinde çözünemeyen iki sıvıdan birinin diğeri içinde küçük k re tanecikleri halinde çözünmeden dağılmasıdır. Asfalt emülsiyonları, asfalt çimentosunun su içinde çok küçük parçacıklar (grob ller) halinde dağılmasından oluşmaktadır [2]. Emülsiyon haline getirme işlemi, ılık asfalt

çimentosunun grobüller haline gelecek şekilde mekanik olarak öğütülmesi ve az miktarda emülgatörün yer aldığı su içinde dağıtılmasıyla gerçekleştirilir. Karışımda kullanılan asfalt grobüllerini çoğunlukla 5-10 mikron arasında veya daha küçük boyutlardadır [5]. Asfalt emülsiyonlarının yaklaşık %60'ı asfalt çimentosudur. Kalan %40'lık kısım su ve çok az miktarda (genellikle emülsiyon ağırlığının %0,2 ile %3'ü arasında) emülgatörden oluşur [9]. Emülgatör, asfalt grobüllerinin birbirine yapışarak sudan ayrılmalarını önlemek için kullanılan katkı maddelerine verilen isimdir.

Asfalt emülsiyonları emülgatörün cinsine göre anyonik asfalt emülsiyonları ve katyonik asfalt emülsiyonları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan başka, yol kaplamalarında nadiren kullanılan iyonik olmayan emülsiyonlar ve yol kaplamalarından ziyade endüstriyel amaçlı olarak kullanılan kille stabilize edilmiş emülsiyonlar da bulunmaktadır [6]. Bir asfalt emülsiyonu agregayla karıştırıldığı ya da herhangi bir zemin yüzeyine uygulandığı zaman emülsiyon kesilerek asfalt grobüllerini sıvı ortamdan ayrılırlar ve uygulandıkları yüzeye yapışırlar. Kesilme işlemi elektrostatik yüklerin nötralize edilmesi ve/veya suyun buharlaşması ile gerçekleştirilebilmektedir. Asfalt grobüllerinin su fazından ayrılması için gerekli zamana kesilme zamanı veya priz zamanı denilmektedir [5]. Yolda kullanılan asfalt emülsiyonları;

- Çabuk kesilen (RS) asfalt emülsiyonları
- Orta hızda kesilen (MS) asfalt emülsiyonları
- Yavaş kesilen (SS) asfalt emülsiyonları

olmak üzere üçe ayrılırlar [2]. RS, MS ve SS simgeleri emülsiyonun kesilme hızını göstermektedir. Anyonik asfalt emülsiyonları, kesilme hızlarına göre başlıca bu harf gruplarıyla belirtilirken katyonik asfalt emülsiyonları aynı harf gruplarının başında katyonik olduklarını belirtmek üzere C harfinin de kullanılmasıyla ifade edilmektedir.

Asfalt emülsiyonları üstyapı imalatında belli başlı olarak; sathi kaplamalarda, karışım kaplamalarda, harç kaplamalarda, yama ve onarım işlerinde, penetrasyon makadam yol kaplamalarında kullanılmaktadır [2]. Çizelge 2.1’de farklı asfalt emülsiyon tipleri ve kullanım yerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Asfalt emülsiyon tipleri ve kullanım alanları [4]

Anyonik	Katyonik	Kesilme Hızı	Kullanım Alanı
RS-1	CRS-1	Çabuk	Yüzeysel onarım işleri, yapıştırma tabakası
RS-2	CRS-2	Çabuk	Yapıştırma tabakası
MS-1		Orta	
MS-2	CMS-2	Orta	Makadam yollar
MS-2h	CMS-2h	Orta	Makadam yollar
SS-1	CSS-1	Yavaş	Astar Tabakası, soğuk bitümlü karışımlar
SS-1h	CSS-1h	Yavaş	Astar Tabakası, soğuk bitümlü karışımlar

Çizelge 2.1’de asfalt emülsiyon tiplerinde görülen h harfi ile daha sert asfaltın kullanıldığı ifade edilmektedir.

Çizelge 2.1’de görülenlerden başka belirli kimyasal katkıların eklenmesiyle agrega daneleri üzerinde daha düşük soyulma ihtimali ve daha kalın bir asfalt film tabakasını sağlayacak özellikte asfalt emülsiyonları elde edilebilmektedir [5].

Sıvı petrol asfaltlarının kullanımlarından bir süre sonra içerdikleri çözücünün buharlaşması çevresel açıdan olumsuzluklar yaratmaktadır. Oysa asfalt emülsiyonlarının hidrokarbon emisyonları yoktur veya çok düşük miktardadır. Bu durum üstyapı inşaatı ve bakımında katbek asfalt kullanımının sınırlandırıldığı coğrafi alanlarda kullanımlarına imkan sağlamaktadır. Ayrıca asfalt emülsiyonlarının rutubetli agrega yüzeylerini kaplama özelliklerinden

dolayı bu tür bağlayıcı kullanımı ile agregayı kurutmak için gerekli olan yakıt ihtiyacı da azalmaktadır [9].

Yukarıda bahsedilen bitüm türlerinden başka bitümün ısıtılıp içerisine hava üflenerek üretilen okside (hava üflemleri) bitümler ve petrolden daha çok benzin elde etmek amacıyla ham petrolün kimyasal değişikliğe uğratılması ile elde edilen termal bitümler de bulunmaktadır [4]. Hava üflemleri bitümlerin farklı kullanım alanları mevcuttur. Çeşitli çatı kaplama uygulamaları, boru kaplama malzemeleri, portland çimentosu beton kaplama altındaki oyukların doldurulmasında kullanılan altyalıtım bitümleri, kanal ve rezervuarların astarlanmasında kullanılan su geçirmez tabakalar bunlardan bazılarıdır [5]. Hava üflemleri bitümlerin sahip oldukları özellikler yumuşama noktası ve penetrasyon değerleriyle belirtilir. Örneğin 85/40 oksitlendirilmiş (hava üflemleri) bir bitümün yumuşama noktası $85\pm5^{\circ}\text{C}$ ve penetrasyon değeri 40 ± 5 'tir. Bu tür bitümlerin yumuşama noktası, karşılık gelen penetrasyon cinsi bitümün yumuşama noktasından çok daha yüksektir [6]. Sahip oldukları özellikler sebebiyle bu tür bitümlerin yol inşaatında kullanılmaları tercih edilmemektedir [4].

2.1. Bitümün Kimyasal Yapısı

Asfalt ve katranlar organik temellidir ve yüksek molekülü hidrokarbonlar olarak tanımlanabilmektedirler. Asfaltlar katranlara göre daha karmaşık bir kimyasal yapıya sahiptir. Ayrıca katranlardan farklı olarak, rafineri asfaltlarının kimyasal özellikleri elde edildiği ham petrolün özelliklerine çok sıkı bağlıdır. Asfaltlar temel olarak hidrokarbon bileşiklerinden oluşurlar; ancak bu hidrokarbonların molekül ağırlıkları ve kimyasal özellikleri bakımından farklı gruplara ayrılabilirler. Ham petrolün bitümlü ürünlerinin analiz sonuçlarına göre bitümün kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.2'de verilmiştir [2].

Çizelge 2.2. Bitümün kimyasal kompozisyonu

Element	Kütle yoğunluk oranı (%)
Karbon	82-88
Hidrojen	8-11
Kükürt	0-6
Oksijen	0-1,5
Nitrojen	0-1

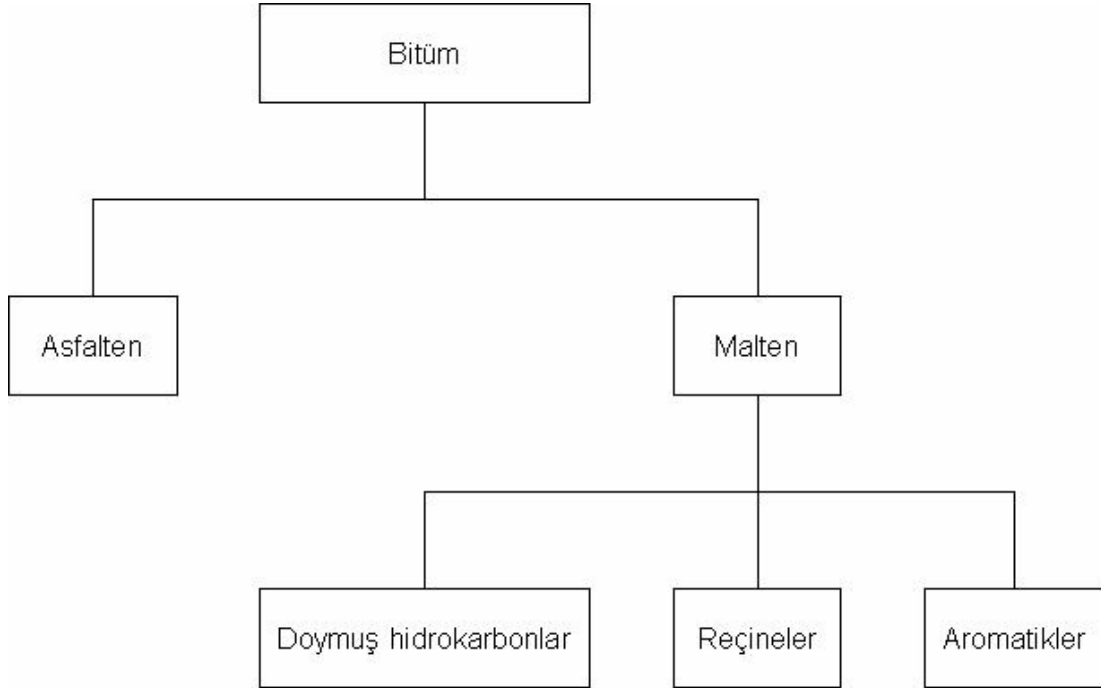
Bitümün kimyasal yapısında Çizelge 2.2’de görülen elementlerden başka az miktarda inorganik tuzlar ve oksitler ya da porfirin yapıları şeklinde ortaya çıkan kalsiyum, vanadyum, nikel, demir ve magnezyum gibi metaller de bulunmaktadır [6].

Bitüm, molekül ağırlıkları farklı olan ağır hidrokarbonların bir karışımıdır. Asfalten ve malten olmak üzere iki ana gruptan oluşur ve n-heptanda çözülmeyen kısmına asfalten, çözülen kısmına ise malten adı verilir [2]. Bitümün kimyasal yapısı çok karmaşık olup analiz edilmesi oldukça zor ve zahmetlidir. Bitümü kimyasal olarak incelemek üzere küçük parçalarına ayırmak için kullanılan yöntemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [6];

- Çözücü kullanarak ayırma,
- İnce şekilde bölünmüş katılar tarafından absorpsiyon ve filtreleme yoluyla absorbe edilmemiş çözeltinin ayrılması,
- Kromatografi,
- Moleküler damıtma (yukarıdaki tekniklerden biriyle bağlantılı olarak)

Yukarıdaki yöntemler içinde kromatografi daha çok kullanılmakta olup temeli, başlangıçta n-heptan kullanarak asfaltenleri çökeltmek ve bundan sonra kalan malzemenin kromatografik ayrımını yapmaya dayanır [6].

Bitümün kimyasal yapısını asfaltenler ve maltenler olmak üzere iki farklı grupta incelemek mümkündür. Bu grupların kimyasal yapı içindeki miktarları bitümün fiziksel özelliklerini ve yükleme koşullarında sergilediği davranış biçimini etkilemektedir. Şekil 2.3'te bitümün kimyasal yapısı görülmektedir.



Şekil 2.3. Bitümün kimyasal yapısı [7]

Asfaltenler yüksek molekül ağırlığına sahip amorf katılardır ve bitümün %5-25'ini oluştururlar. Maltenler ise düşük molekül ağırlığına sahip olup aromatikler, reçineler ve doymuş hidrokarbonlardan meydana gelirler. Aromatikler ve doymuş hidrokarbonlar viskoz sıvılar olup bitüme bağlayıcılık özelliğini sağlayan reçineler ise yarı-katı, polar malzemelerdir [9].

Asfaltenler, genel olarak yüksek molekül ağırlığına sahip, polar yapıda ve karmaşık maddelerdir. Molekül ağırlıkları 600-300000 arasındadır. Bu değer aralığının oluşmasında bitümü ayırmada kullanılan teknikler de etkilidir. Asfaltenler n-heptan içerisinde çözünmezler. Parçacık boyutları 5-30 nm arasında değişir [6]. Renkleri kahverengiden siyaha değişir. Karbon ve

hidrojenin yanında azot, kükürt ve oksijen ihtiva ederler. Asfaltın miktarının bağlayıcının reolojik özellikleri üzerinde önemli etkisi mevcuttur. Asfaltın içeriği arttıkça bitümler daha sert, daha viskoz, daha düşük penetrasyon ve daha yüksek yumuşama noktası değerlerine sahip olurlar [10].

Maltenler; reçineler, aromatikler ve doymuş hidrokarbonlardan meydana gelir. Reçineler, n-heptanda çözünürler. Asfaltın benzer şekilde büyük miktarlarda hidrojen, karbon ile küçük miktarlarda oksijen, kükürt ve azot içerirler. Molekül ağırlıklarının 500-50000 arasında, bir partikül boyutunun 1-5 nm arasında değiştiği tespit edilmiştir [6]. Koyu kahve renkli, katı ya da yarı-katı ve oldukça polar yapıdadırlar. Bu özellik reçinelerin kuvvetli bir adezyon yeteneğine sahip olmasını sağlar [2, 6, 10]. Aromatikler, bitüm içindeki en düşük molekül ağırlıklı naftenik aromatik bileşiklerden oluşur. Bitümde bulunan asfaltın yayılımları için gereken ortamın büyük kısmını oluştururlar. Koyu kahve renkli viskoz sıvı şeklindedirler. Ortalama molekül ağırlıkları 300-2000 arasında değişmektedir. Bitümün %40-65'ini oluştururlar [6]. Doymuş hidrokarbonlar, renksiz, polar olmayan ve yağlı yapıda olup parafinik ve naftenik yağ halkalarını ihtiva eder. Molekül ağırlıkları 2000-3000 arasında değişmektedir. Bitümün %5-20'sini oluştururlar [2].

Bitümdeki doymuş hidrokarbon, reçine, aromatik ve asfaltın miktarı farklı olabilmektedir. Bitümdeki asfaltın içeriği sabitlenip diğerlerinin konsantrasyonu değiştirildiğinde [2, 6];

- Doymuş hidrokarbon/reçine oranı sabit tutularak aromatik miktarındaki artışın reoloji üzerinde yarattığı etki düşük olup kayma mukavemetinde küçük miktarda bir azalma oluşturur.
- Reçinelerin aromatlara olan oranı sabit tutularak doymuş hidrokarbonların içeriği artırıldığında bitüm yumuşar.
- Reçine eklenmesi bitümü sertleştirir, penetrasyon indeksini ve kayma hassasiyetini azaltır; ancak viskozitesini artırır.

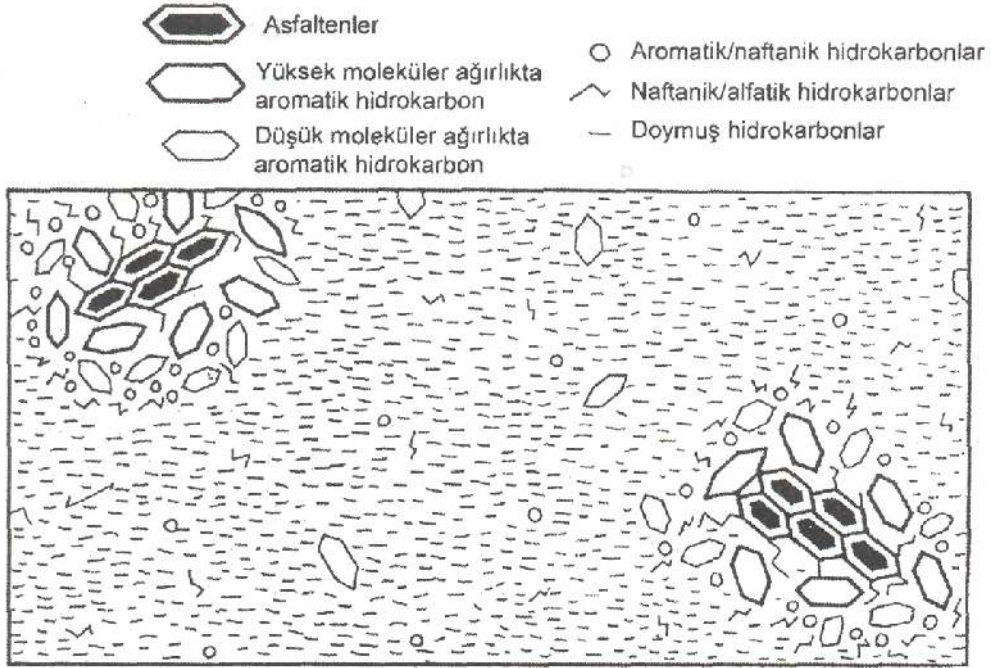
Bunlarla birlikte, bitüm yapısında bulunan asfaltten miktarı da bitümün sahip olduğu özellikler üzerinde etkili olup sabit sıcaklıkta maltenlerin içerisine daha çok asfaltten karıştırılması durumunda bitümün vizkozitesi artmaktadır [6].

Sıcaklık, asfalttenlerin yapısında değişiklik yaratarak bitüm akıcılığını etkilemektedir. Şöyle ki; asfalttenlerin levhaya benzer tabaka yığınları şeklinde olduklarına inanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda bu tabaka yığınlarını bir arada tutan hidrojen bağları koparak asfaltten elemanları ayrılmakta ve sonuç olarak da akıcılık artmaktadır. Sıcak bitüm soğurken asfaltten elemanları arasında ilave tabakalar oluşacak şekilde birleşmeler meydana gelmesiyle bitüm katılaşmaktadır [6].

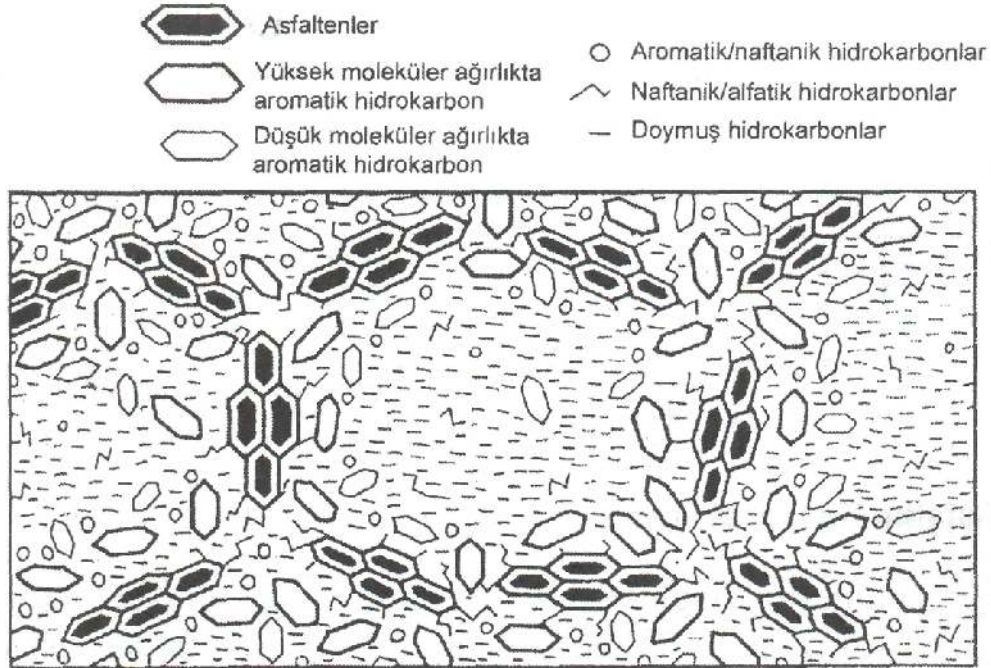
Bitümden ayrılan doymuş hidrokarbonların, reçinelerin, aromatiklerin ve asfalttenlerin yukarıda belirtilen şartlar altında birleştirilmeleri ile bitüm özelliklerinde bazı değişikliklerin meydana gelmesi, bitüm özelliklerinin ve reolojisinin sahip olunan kimyasal yapı ile ilişkili olduğunu ifade eder niteliktedir.

Bitüm, aromatikler ve doymuş hidrokarbonların içinde yayılı halde bulunan reçinelerle çevrili asfalttenlerden oluşmuş kollidal bir sistem olarak tarif edilebilmektedir [9]. Bu kolloidal yapının oluşumundaki kimyasal değişiklik bitümün reolojik özelliği olan viskozitesini (akıcılığını) etkilemektedir. Özellikleri bakımından bitümler ikiye ayrılabilir. Birinci gruba *sol* veya *çözetli* tipi bitüm denir. Bu grupta asfalttenler malten fazı içinde çok iyi bir biçimde dağıtılmıştır. İkinci grup ise *jel* tipi bitümlerdir. Bu grupta asfalttenler malten fazı içinde az olarak yayılmış olup daha çok kümelenmeye doğru giden bir yapı gösterirler. Jel tipi bitümlere örnek olarak okside bitümler gösterilebilir [2]. Bu tipte olan bazı bitümlerin jel özellikleri yeteri kadar ısıtıldıklarında kaybolabilmektedir. Jel özelliği, bitümde bulunan asfaltten içeriği ve mevcut olan asfalttenin sistem içinde yayılma derecesinin yanı sıra bitüm bünyesindeki doymuş hidrokarbon miktarından da etkilenmektedir. Çünkü doymuş parçalar, asfalttenlerin kümelenmelerine yol açmaktadır. Bu durum,

maltenlerin asfaltenleri çözme yeteneklerini azaltarak bitümün jel tipi dağılım gösterme özelliğini arttırmaktadır [6]. Şekil 2.4'te sol tipi bitümlerin, Şekil 2.5'te jel tipi bitümlerin yapısı görülmektedir.



Şekil 2.4. Sol tipi bitüm [2]



Şekil 2.5. Jel tipi bitüm [2]

Bitümü oluşturan bileşenlerin birbirlerine göre konsantrasyonları ve kolloidal özellikte olan bitüm yapısı içerisinde gösterdikleri dağılım ve yayılım, bitümün sahip olduğu fiziksel özellikleri etkilemektedir. Bununla beraber farklı kimyasal yapıya sahip bitümler benzer fiziksel özellikler sergileyebildiği gibi [6] aynı rafineride aynı ham petrolün işlenmesiyle elde edilen bitümler arasında davranış özelliklerinde farklılaşma görülebilmektedir [7].

Bitümler farklı kimyasal yapılara sahip olsalar da ve/veya farklı ham petrol ile farklı rafinerilerde farklı yöntemler kullanılarak üretilmiş olsalar da şartnamelerde belirtilen bazı özelliklere sahip olmaları gerekir ve yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı fiziksel özelliklerinin üretimlerinden önce kontrol altına alınması mümkün olamamaktadır. Bitümlerin fiziksel ve reolojik özellikleri yapı malzemesi olarak kullanıldığı yol kaplamalarının hizmet ömürleri süresince sağladıkları performansı etkilemektedir. Günümüzde çok çeşitli olan katkı maddelerinin bitüme belirli şartlar altında ve uygun miktarlarda eklenmesiyle bitüm özellikleri şartnamelerde belirtilen gereklilikleri sağlayabilmekte ve/veya bölgesel olarak ortaya çıkabilen özel durumlara karşı (tekerlek izi oluşumu, düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumu gibi) dirençleri arttırılabilmektedir.

2.2. Bitümün Reolojik Özellikleri

Mühendislikte kullanılan malzemeler, uygulanan yük (gerilme) ve bunun sonucunda malzemede oluşan deformasyon ilişkisi bakımından;

- Elastik malzemeler
- Viskoz malzemeler
- Viskoelastik malzemeler

olmak üzere üç gruba ayrılır. Elastik malzemelere yük uygulandığında deformasyon oluşur ve oluşan deformasyon miktarı uygulanan yük ile doğru

orantılı olarak değişir. Yüklemenin sona erdirilmesiyle malzemede oluşan deformasyon da ortadan kalkar. Çelik, bu tip malzemelere örnek olarak verilebilir [4, 7, 11].

Viskoz malzemelerde ise yüklemenin başlamasıyla deformasyon da başlar ve yükleme devam ettiği sürece yükün uygulama süresine bağlı olarak artar. Bu tür davranış özelliğine sahip malzemelerde uygulanan yük ne kadar büyük olursa oluşan deformasyon da o kadar fazlalaşır. Aynı zamanda yükleme süresinin uzaması da deformasyon miktarını arttırır. Uygulanan yükleme sona erdiğinde elastik malzemelerdeki davranışın aksine deformasyon ortadan kalkmaz [4, 7].

Viskoz malzemeler, uygulanan yüke karşılık oluşan deformasyona göre Newtonian malzeme ve Non-Newtonian malzeme olmak üzere ikiye ayrılır. Newtonian malzemelerde uygulanan yük ve buna bağlı olarak oluşan deformasyon arasındaki ilişki doğrusaldır. Bu tip malzemelerin viskozitesi sabit olup uygulanan yük miktarına göre değişmemektedir. Non-Newtonian malzemelerde ise yük ile deformasyon arasındaki ilişki doğrusal değildir ve viskozite, uygulanan yük miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [11].

Viskoelastik malzemeler ise uygulanan yükleme hızına bağlı olarak elastik veya viskoz veya elastik+viskoz davranış özelliklerini gösterirler.

Reoloji, malzemelerin deformasyon özelliklerini yükün miktarına ve yüklemenin süresine bağlı olarak inceler. Bitüm reolojik malzemedir. Bu yüzden gerilme-deformasyon ilişkisi yükün hem miktarına hem de uygulama süresine bağlıdır [4, 7, 11].

Bitümün gerilme-deformasyon ilişkisi çelik ve beton gibi inşaat mühendisliğinde sıkça kullanılan diğer malzemelere göre daha karmaşık yapıdadır. Bitüm, düşük sıcaklıklarda ve kısa süreli yüklemelerde hemen

hemen elastik-katı malzeme gibi davranırken yüksek sıcaklık ve uzun süreli yüklemelerde neredeyse viskoz-akışkan malzeme gibi davranış gösterir. Ara sıcaklıklarda ve yükleme sürelerinde ise davranış viskoelastik sınırlar içindedir [10].

Esnek üstyapılarda düşük hizmet sıcaklıklarında görülen çatlamlar önemli bir bozulma türünü oluşturmaktadır. Bu tür bozulmalar soğuk bölgelerdeki yol kaplamalarında sıkça görülür. Üstyapı imalatında kullanılan bitümün sahip olduğu davranış özellikleri meydana gelmeleri ile yakından ilgilidir. Eğer bitüm, düşük sıcaklıklarda yeteri kadar elastik özellik gösterebilirse yani yük uygulandığında hemen kopmak yerine yük ile birlikte deformasyon yapabilmesi durumunda düşük sıcaklıklarda görülen çatlamlar azalmaktadır.

2.3. Bitümlü Bağlayıcıların Sınıflandırılması

Üstyapı uygulamalarında kullanılan bitümlü bağlayıcılar kimyasal özelliklerinden ziyade fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılır. Mühendisler için bağlayıcının en önemli fiziksel özellikleri reolojik karakteristikleridir. Bitümlü bağlayıcının reolojik özellikleri hem deneysel hem de temel özelliklerle açıklanır. 1970'lere kadar tüm dünyada bitümlü bağlayıcılar deneysel özelliklerine göre sınıflanmaktaydı [9].

Bitümlü bağlayıcıları sınıflamak veya derecelendirmek için günümüzde üç önemli sistem mevcuttur. Bunlar [9];

- Penetrasyon sınıflandırması
- Viskozite sınıflandırması
- Performans sınıflandırması

olarak sıralanabilir. Sistemler arasında doğrudan bir ilişki bulunmasa da bitümlü bağlayıcı üç sisteme ait bütün kriterleri sağlayabilmelidir. Bağlayıcıyı

değerlendirmede kullanılabilecek yumuşama noktası, Fraass kırılma noktası ve duktilite gibi diğer fiziksel özellikler, yerel uygulamacılar tarafından bitümlü bağlayıcı şartnamelerine eklenebilir [9]. Ülkemizde karayolu üst yapılarında kullanılan sıvı asfaltlar ve asfalt emülsiyonları için en düşük duktilite miktarları; asfalt çimentolarının ve katranların farklı tiplerine göre sahip olmaları gereken yumuşama noktası değer aralıkları şartnamelerce belirlenmiştir [12-15]. Bu malzemeler üstyapı tabakalarında kullanılabilir özellikte olup genel olarak bitümlü bağlayıcı olarak isimlendirilebilirler.

Daha önce bahsedildiği üzere fiziksel ve kimyasal özellikleri birbirlerinden farklı olan çok sayıda bitümlü bağlayıcı bulunmaktadır. Farklı özelliklere sahip bu bağlayıcılar yukarıda belirtilen sistemlerden uygun olanı/olanları kullanarak sınıflandırılabilir. Örneğin asfalt çimentoları her üç sistem ile (penetrasyon, viskozite, performans) sınıflandırılabilirken sıvı asfaltlar (katbek ve emülsiyonlar) viskozite değerlerine göre sınıflanabilmektedir.

Bitümlü bağlayıcıların penetrasyon sınıflandırması en eski ve halen kullanılan sınıflandırma metodudur. Penetrasyon testi asfalt ve katranlar için kıvam ölçütü olarak geliştirilmiştir [9]. Test, standart penetrasyon iğnesinin belli sıcaklık ve yükleme koşullarında bağlayıcıya batma miktarının ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Test sonunda elde edilen batma değerlerinin artması bağlayıcıya ait kıvamliliğin azaldığının göstergesidir. Çizelge 2.3'te asfalt çimentolarına (bitüm) ait penetrasyon sınıflandırması verilmiştir.

Çizelge 2.3. Asfalt çimentolarına ait penetrasyon sınıflandırması [4]

Penetrasyon Sınıflandırması
40-50 Pen. AC
60-70 Pen. AC
85-100 Pen. AC
120-150 Pen. AC
200-300 Pen. AC

Bitümlü bağlayıcılar için yapılan penetrasyon sınıflandırması deneysel bir metottur ve bağlayıcının kullanım karakteristiği veya performans özellikleri hakkında gerçekçi bilgi vermez. Sadece belli bir sıcaklıkta hangi bağlayıcının daha yumuşak veya daha sert olduğu belirlenebilir [9].

Viskozite sınıflandırması, bitümlü bağlayıcının en azından kullanım karakteristiği hakkında bilgi veren temel derecelendirme sistemidir. Viskoziteye göre sınıflandırmada kullanılan standart dereceler AC-2,5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-30 ve AC-40'tır [9]. Ancak farklı kaynaklarda bulunan viskozite sınıflandırmalarında AC-30 derecelendirme aralığı kullanılmayabilmektedir [4]. Çizelge 2.4'te asfalt çimentoları (bitüm) için minimum penetrasyon değerleri ile birlikte standart viskozite sınıflandırması verilmiştir.

Çizelge 2.4. Asfalt çimentoları için standart viskozite sınıflandırması [9]

	Viskozite					
	AC-2,5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
60°C'deki Viskozite (poise)	250±50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
25°C'deki Penetrasyon (0,1 mm)	≥200	≥120	≥70	≥60	≥50	≥40

Viskozite sınıflandırma sisteminde, AC harf grubu ile asfalt çimentosu (Asphalt Cement) ifade edilmekte olup harf grubunu takip eden sayılarla da asfalt çimentoları farklı sınıflara ayrılmaktadır. Sınıflandırmada kullanılan sayılar asfalt çimentosunun 60°C'de poise biriminden sahip olduğu viskozitenin %1'ini ifade etmektedir.

Poise, dinamik viskozite birimi olup $1 \text{ poise} = \text{g} \cdot \text{s} / \text{cm}^2 = \text{g} / \text{cm} \cdot \text{s}$ 'dir. Dinamik viskozite için günümüzde Pa.s (paskal*saniye) kullanılmaktadır ve 1 Pa.s 10 poise'ye eşittir [4].

Sıvı asfaltların viskoziteleri; saybolt furol viskozitesi, saybolt universal viskozitesi ve kinematik viskozite olmak üzere üç farklı şekilde ölçülebilmekte ve kıvamlılıkları ölçülen viskozite değerleri ile belirlenmektedir. Saybolt furol viskozitesi, 60°C'deki sıvı asfaltın 3,149 mm çapındaki bir açıklıktan 60 ml'lik miktarda boşalması için gerekli sürenin saniye cinsinden değeridir. Saybolt universal viskozitesi ise saybolt furol viskozitesi ile benzer şekilde ölçülmekte olup zaman bakımından 10 katı fazlalıkta sonuç vermektedir; çünkü açıklık çapı daha azdır (1,765 mm) [4]. Kinematik viskozite değeri, belirli miktarda bağlayıcının belirli bir ısıdaki kılcal cam borudan akarak geçmesi için geçen sürenin saniye cinsinden değeri ve ölçümde kullanılan cihazın kalibrasyon sabitinin çarpılmasıyla elde edilmektedir [16].

Sıvı asfaltların (katbek ve emülsiyon) kıvamlılığının viskozite değerlerine göre sınıflandırılması Çizelge 2.5'te ve Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.5. Katbek asfaltların sınıflandırılması [4]

Katbek Asfalt	Kinematik Viskozite (60°C)	Saybolt Furol (3,149 mm, 60 ml, 60°C)
MC-30	30-60 cS	15-30 saniye
RC, MC, SC-70	70-140 cS	35-70 saniye
SC-250	250-500 cS	125-250 saniye
SC-800	800-1600 cS	400-800 saniye
SC-3000	3000-6000 cS	1500-3000 saniye

Çizelge 2.6. Emülsiyon asfaltların sınıflandırılması [4]

Emülsiyon asfalt	Saybolt Furol (25°C)	Saybolt Furol (50°C)
RS-1, MS-1, SS-1	20-100	-
RS-2	-	75-400
MS-2	min 100	-
CRS-1	-	20-100
CRS-2	-	100-400
CMS-2	-	50-450
CSS-1	20-100	-

RT-1 RT-12 arasında sınıflandırılan yol katranlarında RT-12'ye doğru viskozite giderek artmaktadır [4].

Bitümlü bağlayıcılar, yapay olarak yaşlandırıldıktan sonra sahip oldukları viskozite değerlerine göre de sınıflandırılabilir. Bu metot, viskozite sınıflandırma sisteminin bir alt kümesi olup ABD'nin bazı batı eyaletleri dışında yaygın olarak kullanılmamaktadır. Yapay olarak yaşlandırma, bağlayıcının yüksek sıcaklıkta belirli bir süre bekletilmesiyle gerçekleştirilmekte ve bu çeşit viskozite sınıflandırması kısaca AR olarak adlandırılmaktadır. AR harfleri ile yaşlandırılmış kalıntı (Aged Residue) ifade edilmektedir [9].

Tipik AR derecelendirmeleri AR-1000, AR-2000, AR-4000, AR-8000 ve AR-16000'den oluşmaktadır. AR harflerinin yanında bulunan sayılar bağlayıcıların 60°C'deki viskozite değerlerini göstermektedir [9]. Çizelge 2.7'de yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar için minimum penetrasyon değerleri ile birlikte standart AR viskozite sınıflandırması verilmiştir.

Çizelge 2.7. Yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar için standart AR viskozite sınıflandırması [9]

	Viskozite				
	AR-1000	AR-2000	AR-4000	AR-8000	AR-16000
60°C'deki Viskozite (poise)	1000±250	2000±500	4000±1000	8000±2000	16000±4000
25°C'deki Penetrasyon (0,1 mm)	≥65	≥40	≥25	≥20	≥20

Penetrasyon ve viskozite testleri bitümlü bağlayıcıları sınıflandırmada kullanılmaktadır. Asfalt çimentolarına uygulanan standart penetrasyon testi 25°C'de, sıvı asfaltlara uygulanan viskozite testi 60°C'de ve asfalt çimentolarına viskozite testinin uygulanmasını gerektiren durumlarda ise bağlayıcı 60°C'de katı halde olacağından dolayı test 135°C'de uygulanmaktadır. Bağlayıcılar bu sıcaklıklarda sahip oldukları değerlere bağlı olarak penetrasyon veya viskozite sistemine göre sınıflandırılmaktadır. Ancak bağlayıcıların kıvamı sıcaklığın değişmesiyle farklı şekilde değişebilmekte ve aynı sıcaklıkta aynı katılığa/akıcılığa sahip olan bağlayıcılar, sıcaklığın artması veya azalması durumunda farklı katılığa/akıcılığa sahip olabilmektedirler [17]. Ancak standart penetrasyon veya viskozite testleri belirli bir sıcaklıkta yapıldıklarından dolayı farklı sıcaklıklarda farklı davranışa sahip olan bağlayıcıların aynı grupta sınıflandırmaları mümkün olabilmektedir. Bu durum, bağlayıcıların sınıflandırılmasında kullanılan bu iki sistemin zayıf yönünü oluşturmaktadır.

Bitümün performans gösterdiği sıcaklık aralığı oldukça geniştir. Agregaya iletilen (sıcak karışım üretim tesisi) karıştırılma sıcaklığı 160°C seviyesindedir, yola serilme ve sıkıştırılma sıcaklıkları 100°C'nin üzerindedir. Üstyapının imalatından sonra hizmet verdiği sıcaklıklar bölgenin iklimsel özelliklerine bağlı olarak 0°C'nin oldukça altına düşebilmektedir. Bitümün

maruz kaldığı oldukça farklı sıcaklıklar, değerlendirmelerin daha geniş bir sıcaklık aralığında yapılması ve bağlayıcının farklı sıcaklıklardaki özelliklerine göre sınıflandırılmasının daha etkili olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu zorunluluklar kapsamında, bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki performanslarına göre sınıflandırılmalarına imkan veren PG sistemi geliştirilmiştir.

PG (Performance Grade) sınıflandırma sistemi bitüm sınıflandırmasında kullanılan diğer bir sistemdir. Bu sistem, 1987'de ABD Ulaştırma Departmanı'nca Stratejik Karayolu Araştırma Programı çerçevesinde (SHRP) hazırlanan performans derecelendirmeli bağlayıcı şartnamesi (Superpave) ile oluşturulmuştur. PG bağlayıcı şartnamesi, penetrasyon ve viskozite sınıflandırma sistemlerine göre fiziksel özellikleri ölçmek için kullanılan testlerin arazi performansı ile doğrudan ilişkili olması bakımından farklılık göstermektedir. PG sisteminde kullanılan testler, SHRP programı tarafından geliştirilen veya modifiye edilen teçhizatla yapılabilmektedir. PG bağlayıcı şartnamesinin esası; bitüme ait temel özelliklerin, üstyapı için kritik olan bozulma modlarının olduğu sıcaklıklarda ölçülmesidir. Tekerlek izinin, yorulma çatlaklarının ve düşük sıcaklıklarda oluşan çatlakların üstyapıda görülen üç kritik bozulma olduğu şartname tarafından belirtilmektedir [9].

PG bağlayıcı şartnamesinin önemli özelliği bitüme uygulanan testlerin, hizmet ömrü boyunca esnek üstyapıda oluşan üç kritik periyodu benzeştirecek şartlarda uygulanmasıdır. Orijinal bitüme uygulanan testler bağlayıcının nakliye, depolama ve uygulama (kullanım) karakteristiklerini ifade eder. İkinci periyot, bitüm-agrega karışım üretimi ve üstyapı inşaa sürecinde bitümün yaşlanması ile ilgilidir ve bu oluşum PG şartnamesinde bitümün ince film halinde yaşlandırılmasıyla benzeştirilir. Son periyot, bitümün üstyapının bir parçası olarak uzun süreli yaşlanma sürecini içerir. Bu periyot, PG şartnamesinde bağlayıcının basınçlı yaşlandırma kabı ile yaşlandırılmasıyla oluşturulur [9].

PG sınıflandırma sisteminde kullanılan test cihazları ve bu cihazların kullanım amaçları Çizelge 2.8’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.8. PG sınıflandırma sisteminde kullanılan test cihazları ve kullanım amaçları [17, 18]

Deney Aleti	Kullanım Amacı
Döner ince film etüvü (RTFO)	Bağlayıcının oksitlenmesini (yaşlanmasını) ya da sertleşmeyi temsil eder.
Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV)	
Dinamik kayma reometresi (DSR)	Orta ve yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı özelliklerini ölçer.
Dönel viskozimetre (RV)	Yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı özelliklerini ölçer.
Eğilme kırışi reometresi (BBR)	Düşük sıcaklıklarda bağlayıcı özelliğini ölçer.
Doğrudan çekme cihazı (DTT)	

Çizelge 2.8’de görülebileceği üzere yöntem kapsamında bitüme ait performans sınıflandırılması altı ana test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bunlar; dönel viskozimetre, döner ince film etüvü, basınçlı yaşlandırma kabı, dinamik kayma (kesme) reometresi, eğilme kırışi reometresi, doğrudan çekme test cihazlarıdır. Silindir ince film fırını ve basınç sertleşme kabı ile herhangi bir test uygulanmamakta, bitümün koşullandırılmasında ve yaşlandırılmasında kullanılmaktadır [9]. Dönel viskozimetre (Brookfield viskozimetresi) ile bitümün farklı sıcaklıklardaki kıvamı yani akıcılığı belirlenmektedir. Bu ölçümle, bitümün sıcak karışım tesisinde pompalanma ve işlenebilme özellikleri öğrenilebilmektedir. Tekerlek izi, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklar yüksek standartlı esnek üstyapılarda görülen önemli bozulma türleridir. Bitümün bu bozulma

türlerine karşı direnci dinamik kayma reometresi, eğilme kirişi reometresi ve doğrudan çekme cihazları kullanılarak değerlendirilmektedir. Dinamik kayma reometresi ile bitümün yüksek hizmet sıcaklıklarında tekerlek izi ve yorulma çatlaklarının oluşumuna karşı direnci (kompleks kayma modülünün ve faz açısının ölçülmesiyle), eğilme kirişi reometresi ve doğrudan çekme cihazıyla ise bağlayıcının düşük hizmet sıcaklıklarında çatlama oluşumuna karşı direnci (sünme rijitliğinin, sünme oranının ve uzama oranının ölçülmesiyle) belirlenmektedir. Bu ölçümler deneylerde kullanılan cihazlar tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmektedir [18].

PG şartnamesi kapsamında parlama noktası testi de bulunmaktadır. Bu test, PG şartnamesine dahil edilen ve güvenlikle ilgili olan ilave bir test olup bitümün performans bakımından değerlendirilmesinde kullanılmamaktadır. Şartnamede bağlayıcılar için güvenlik ve nakliye ile ilgili ihtiyaç duyulan en düşük parlama noktası değeri 230°C olarak belirlenmiştir [9].

PG sınıflandırma sisteminde bitümün arazi şartlarındaki performansıyla ilgili özellikleri ölçülmektedir. Bu yüzden, bağlayıcının belirli sıcaklıktaki katılığına veya akıcılığına dayanan penetrasyon ve viskozite sınıflandırmalarına göre daha gerçekçi bir sistem olarak öne çıkmaktadır. PG sistemiyle bitümün, şartnamede belirtilen yeterlilikleri sağlayabildiği sıcaklık aralığı belirlenmektedir. Böylece üstyapı hangi iklim şartlarında hizmet verecekse ona uygun bitüm kullanılabilme imkanı ortaya çıkmaktadır. İklim koşullarına uygun bitüm kullanımı, esnek üstyapılarda oluşan bozulmaların azalmasını sağlayarak üstyapının daha az bakım-onarım ile daha yüksek performans göstermesini sağlayabilecektir.

2.4. Bitümün Mühendislik Özellikleri

Yüksek standartlı esnek üstyapılarda bağlayıcı içeren tabakalar; aşınma tabakası, binder tabakası ve gerekli hallerde kullanılabilen bitümlü temel tabakasıdır. Her bir tabaka, uygun gradasyondaki agrega grubu ve

bağlayıcının uygun şartlarda karıştırılmasıyla elde edilen malzemenin yolda serilip sıkıştırılmasıyla inşaa edilmektedir. Bu tabakalarda kullanılan bağlayıcı malzeme için ABD kaynaklı yayınlarda asfalt çimentosu, İngiltere kaynaklı yayınlarda bitüm terimi kullanılmakta olup çalışma kapsamında bu malzeme bitüm adı altında anılmıştır.

Aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarının imalatında kullanılan malzemenin büyük miktarı agregadır. Ancak bitümün karışım içindeki rolü önemlidir. Esnek üstyapıların hizmet ömrü boyunca gösterdiği performans, bitümün sahip olduğu özelliklerle yakından ilgilidir. Bu yüzden yol kaplamalarında kullanılacak bitümün sağlaması gereken bazı şartlar bulunmaktadır. Bu alt bölümde aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarında bağlayıcı olarak kullanımı tercih edilen bitümün mühendislik özellikleri incelenecektir.

2.4.1. Bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığı

Bitümler, farklı sıcaklıklarda farklı akıcılığa (viskozluğa) sahiptir. Bu durum sıcaklığa karşı duyarlı olmalarından kaynaklanır. Bitümün sıcaklık duyarlılığının düşük olması istenir. Sıcaklık duyarlılığı düşük olan bitümler sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenir. Böylece yüksek hava sıcaklıklarında daha rijit ve düşük hava sıcaklıklarında ise daha az kırılğan davranış gösterebilirler. Aksi halde, esnek kaplamalar yüksek hava sıcaklıklarında deformasyon, düşük hava sıcaklıklarında ise çatlama eğilimindedirler. Üstyapıda tekerlek izi ve düşük sıcaklık çatlakları gibi bozulmalar bitümün değişik sıcaklıklarda sergilediği farklı davranış özelliklerinden kaynaklanmaktadır [4].

Bitümleri sınıflandırmada kullanılan penetrasyon değeri sıcaklıkla değişir. Sıcaklık arttıkça penetrasyon değeri de artar. Aynı zamanda penetrasyon viskozite ile ters orantılıdır. Yani sıcaklık arttıkça bitümün penetrasyonu artarken viskozitesi azalmaktadır.

Penetrasyon indeksi (PI), bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını belirlemek için kullanılabilir. Bitüme ait PI değeri arttıkça bağlayıcının sıcaklık duyarlılığının azaldığı ifade edilmektedir. Penetrasyon indeksi değerinin hesaplanmasında kullanılan farklı formüller mevcuttur. Bu formüller aşağıda verilmiştir [2, 4, 6];

$$A = \frac{\log(\text{Pen}T1) - \log(\text{Pen}T2)}{T1 - T2} \quad (2.1)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (2.2)$$

Eş. 2.1 ve Eş. 2.2'de görülen değişkenler;

T1 ve T2	Bitüme ait penetrasyon değerlerinin ölçüldüğü test sıcaklıkları
A	Penetrasyon Sıcaklık İndeksi
PI	Bitümün penetrasyon indeksi değeri

Bitüme ait penetrasyon indeksi değeri yukarıda verilen formül grubu ile hesaplanırken;

- Öncelikle T1 ve T2 sıcaklıklarında ölçülen penetrasyon değerleri kullanılarak bitüme ait penetrasyon sıcaklık indeksi değeri (A) Eş. 2.1 ile hesaplanır.
- Elde edilen A değerinin Eş. 2.2 içerisinde kullanılmasıyla bitümün penetrasyon indeksi değeri bulunur.

Bitüme ait A değeri, Eş. 2.1'in farklı bir uygulamasıyla da hesaplanabilmektedir. Şöyle ki;

- Eş. 2.1'de görülen T2 yerine bitümün yumuşama noktası sıcaklığı kullanılmaktadır.

- Bitümün yumuşama noktasında sahip olduğu penetrasyon değerinin 800 olduğu kabul edilmektedir.

Bu iki değişikliğin Eş. 2.1'e uygulanmasıyla A değeri Eş. 2.3'te görüldüğü gibi hesaplanabilmektedir.

$$A = \frac{\log(\text{Pen}T1) - \log(800)}{T1 - YN} \quad (2.3)$$

Burada;

T1 Bitüme ait penetrasyon değerinin ölçüldüğü test sıcaklığı

YN Bitüme ait yumuşama noktası sıcaklığı

Eş. 2.3 ile elde edilen A değerinin Eş. 2.2'de kullanılmasıyla bitüme ait penetrasyon indeksi değeri hesaplanabilmektedir.

Penetrasyon indeksini hesaplamak için kullanılan diğer bir formül Eş. 2.4'te görülmektedir. Bu formülde, bitümün yumuşama noktası sıcaklığı ve 25°C'deki penetrasyon değerleri kullanılmaktadır.

$$PI = \frac{1952 - 500\log(\text{Pen}25) - 20YN}{50\log(\text{Pen}25) - YN - 120} \quad (2.4)$$

Burada;

Pen25 Bitümün 25°C'de ölçülen penetrasyon değeri

YN Bitüme ait yumuşama noktası sıcaklığı

PI Bitümün penetrasyon indeksi değeri

Yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak bitümün penetrasyon indeksi değeri hesaplanabilmektedir. Elde edilen değer, yüksek penetrasyon indeksine

sahip bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığının daha az olduğu şeklinde yorumlanmaktadır.

2.4.2. Bitümün rijitlik modülü

Bitüme yük uygulandığında gösterdiği davranışı tanımlamak için rijitlik modülü kullanılabilir. Bitümün rijitlik modülü, uygulanan gerilme kuvveti ve bu kuvvetin oluşturduğu deformasyon miktarı ile Eş. 2.5 kullanılarak hesaplanabilir [4].

$$S(t, T) = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

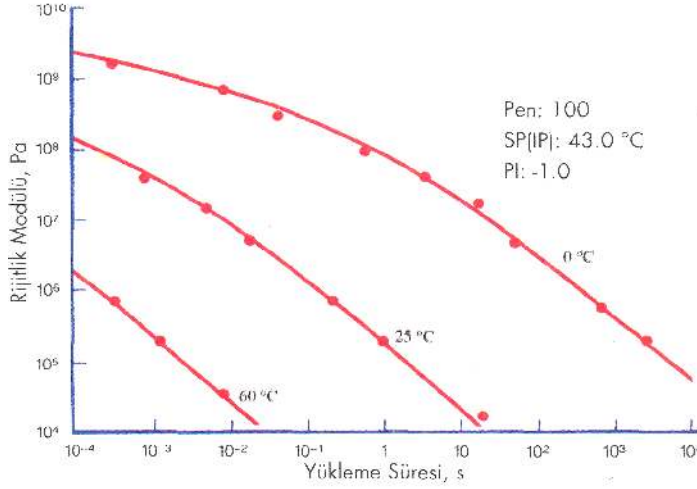
Burada;

t	Yükleme süresi
T	Yüklemenin uygulandığı sıcaklık
σ	Bitüme uygulanan gerilme kuvveti
ε	Bitüme uygulanan gerilme sonunda oluşan deformasyon miktarı

Bitümün rijitlik modülü yükün belirli sıcaklıkta ve sürede uygulanmasına bağlı olarak elde edilebilmektedir. Yükleme süresi ve sıcaklığı arttıkça rijitlik modülü azalır. Yükleme süresi ve sıcaklığının yanında bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığı da rijitlik modülü üzerinde etkilidir. Sıcaklık duyarlılığı azaldıkça rijitlik modülü de azalmaktadır [4].

Bitümler, yüksek sıcaklık ve uzun yükleme sürelerinde viskoz akışkan malzeme davranışı, düşük sıcaklık ve kısa yükleme sürelerinde elastik katı malzeme davranışı gösterirler. Yükleme süresi ve sıcaklığın ara değerlerinde ise davranışları viskoelastik özelliktedir [10].

Şekil 2.6'da penetrasyon derecesi 100, yumuşama noktası 43°C ve penetrasyon indeksi -1 olan bitümün değişik sıcaklıklardaki rijitlik modülü ile yükleme süresi arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.6. Sıcaklık ve yükleme süresinin bitüm rijitliğine etkisi [2]

Şekil 2.6'da görülebileceği üzere sıcaklık ve/veya yükleme süresi arttıkça rijitlik modülü azalmaktadır. 0,01 saniyelik yükleme süresi için bitümün sahip olduğu rijitlik modülü yaklaşık olarak 25°C'de $1 \cdot 10^7$ Pa, 60°C'de $4 \cdot 10^4$ Pa'dır. Yani 0,01 saniyelik yükleme süresinde 25°C'de elde edilen rijitlik modülü 60°C'de elde edilen rijitlik modülünün 250 katıdır. Rijitlik modülü, yükleme süresinin artmasıyla da azalmaktadır. Şekil 2.6'dan da görülebileceği üzere 0,01 saniyelik yükleme süresinde 0°C'deki rijitlik modülü yaklaşık $9 \cdot 10^8$ iken aynı sıcaklıkta 1 saniyelik yükleme süresinde bu değer yaklaşık $9 \cdot 10^7$ 'ye gerilemektedir.

Görüldüğü üzere sıcaklığın yüksek ve yükleme süresinin uzun olması durumunda (durağan veya hızın çok yavaş hızda olduğu trafik akımlarında) bitümün rijitlik modülü oldukça azalır. Bu durum, üstyapıda tekerlek izi oluşma ihtimalini arttırmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ise rijitlik arttığından uygun tasarım ve imalat durumunda tekerlek izi oluşmamaktadır [4]. Bitümün çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilmesiyle sıcaklık duyarlılığı

azaltılabilmekte ve buna bağılı olarak üstyapının hizmet verdiği yüksek hava sıcaklıklarında tekerlek izi oluşumuna karşı direnç arttırılabilmektedir.

2.4.3. Bitümün kohezyonu

Bitüm, kaplama tabakalarının imalatında kullanılan karışımlarda kohezyonu sağlar. Bitümlerin kohezyon özellikleri düktilite testi ile değerlendirilebilmektedir. Bu test, bitüm numunesinin 25°C'deki su banyosu içinde 50 mm/dakika hızla çekilmesi ve kopma anındaki uzama miktarının ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Bu testin daha düşük sıcaklıklarda uygulamaları da mevcuttur. Düşük sıcaklıklarda uygulanan testler sonunda elde edilen uzama miktarları ile bitümün bu sıcaklıklarda sahip olduğu sünek davranış özellikleri yorumlanabilmektedir. Bitüm, düşük sıcaklıklarda gevrek davranış gösterme eğilimindedir ve bu durum üstyapıda düşük sıcaklık çatlaklarının oluşmasına neden olmaktadır. Bitümün düşük sıcaklıklarda yeterince sünek davranış göstermesiyle bu tür çatlakların oluşumu azalabilmektedir [4].

2.4.4. Bitümün dayanıklılığı (durabilitesi)

Bitümün dayanıklılığı, sahip olduğu özellikleri zaman içinde devam ettirebilme yeteneği veya sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilebilir. Bitümün çeşitli nedenlerden dolayı sertleşmesine yaşlanma denir [4]. Bitümün yaşlanması birçok nedene bağılı olup bunlar aşağıda özetlenmiştir.

Oksitlenme

Bitüm yapısında bulunan karbonların havadaki ve az da olsa sudaki oksijenle etkileşmesi oksitlenmeyi meydana getirir. Oksitlenme, bitümün moleköl ağırlığını artırır. Bu durum bitümün viskozluğunun artmasına neden olarak sertleşmeyi oluşturmaktadır. Sıcaklık ve bu sıcaklığa maruz kalma süresi ile bitüm film kalınlığı oksitlenme miktarını etkiler. İnce bir bitüm film tabakasının yüksek sıcaklıkta uzun süre kalması büyük miktarda sertleşme yaratır.

Bitümde oluşan oksitlenmenin çoğu plentte agregaya ile karıştırılma ve yolda serilip sıkıştırılma anındaki yüksek sıcaklıklarda oksijen ile etkileşmesi sonucu meydana gelir ve bitümün hizmet ömrü içinde oluşan toplam oksitlenmenin büyük miktarını oluşturur [4]. Agregaya, plentteki karıştırma esnasında kalınlığı genellikle 5-15 mikron arasında değişen ince bir bitüm tabakasıyla kaplanır. Eğer bitüm ile kaplanmış her bir agregaya danesinin yüzeyi düz bir alana serilebilse 1 tonluk yoğun bitümlü makadamdaki bitüm yaklaşık olarak 10000 m²'lik alanı kapsayan bitüm tabakası üretebilmektedir. Yani, agregayla karıştırılması bitümü ince tabakalara dönüştürmektedir ve böylece oksitlenme ile birlikte uçucu madde kaybı için uygun koşullar oluşmaktadır. Bitüm sertleşmesinin büyük bir kısmı karıştırma sırasında ve daha az bir kısmı da sıcak depolama/taşıma sırasında olur [2].

Oksitlenmiş bitümün esnekliği azalırken kırılganlığı artmaktadır. Sertleşmeden başlıca oksitlenme sorumlu olmakla birlikte diğer unsurların etkisi daha düşüktür [4].

Uçucu madde kaybı

Bitümün bünyesinde bulunan uçucu maddelerin kaybı sertleşmeye neden olmaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere plentte oluşan koşullar uçucu madde kaybı için ideal ortam yaratmaktadır. Uçucu madde kaybıyla oluşan sertleşmenin bitüm cinsiyle ve penetrasyon derecesiyle değişebildiği ifade edilmektedir. Buna göre; penetrasyon dereceli bitümler içinde düşük penetrasyonlu bitümlerde yüksek penetrasyonlu bitümlere göre uçucu madde kaybı ile sertleşmenin daha az olduğu [4] ve bununla birlikte, penetrasyon dereceli bitümlerin yapısında bulunan uçucu maddelerin nispeten daha az olduğu ve bundan dolayı da uçucu madde kaybıyla oluşan sertleşme miktarının bu tür bitümlerde daha az olduğu belirtilmektedir [6]. Farklı kaynaklarda bu durumun okside bitümler için de geçerli olduğu ifade edilmektedir [2].

Polimerleşme

Bu tür sertleşme, bitümün hidrokarbon zincirinin zamanla büyümesinden kaynaklanmaktadır [4].

Parçalanma

Bitümdeki yağlı maddelerin veya asfaltinin agrega tarafından porozitesine de bağlı olarak yumuşama periyotları sırasında emilmesi (absorbe edilmesi) ile bitümde sertleşme meydana gelmektedir [4].

Çeşitli sebeplerle yaşlanan bitümün penetrasyon değerleri azalmakta, penetrasyon indeksi ve yumuşama noktası değerleri ise artmaktadır. Oluşan bu değişimle bitümün rijitliği artar ve kullanıldığı karışımın da rijitliğini artırarak üstyapının daha yüksek rijitliğe sahip olmasına sebep olur. Bu tür özelliğe sahip üstyapı ağır trafik yükleri altında daha kırılgan davranış gösterir. Oksitlenme ve uçucu madde kaybı ile oluşan sertleşme kimyasal yapıda olup geri dönüşümü mümkün değildir [4]. Bitümün fiziksel sertleşmesi ise ortam sıcaklığında kalması ve bitüm moleküllerinin yeniden yönlenebilmesi ile petrol mumlarının yavaş kristalleşmesi söz konusu olduğunda görülmektedir. Bu tür sertleşme etkisi, bitümün ısıtılmasıyla ortadan kaldırılabilmektedir [6].

Bitüm, yüksek sıcaklıkta ve kütle halinde büyük miktarlarda depolandığında oluşan sertleşme azdır. Bu durum, oksijene maruz kalan bitüm yüzeyinin toplam bitüm miktarı yanında oldukça küçük olmasından kaynaklanır. Ancak bitümün sirküle edildiği durumlarda sirkülasyon borusundan akan bitüm daha fazla yüzey alanı ile oksijene maruz kalacağından önemli bir sertleşme meydana gelebilmektedir [2].

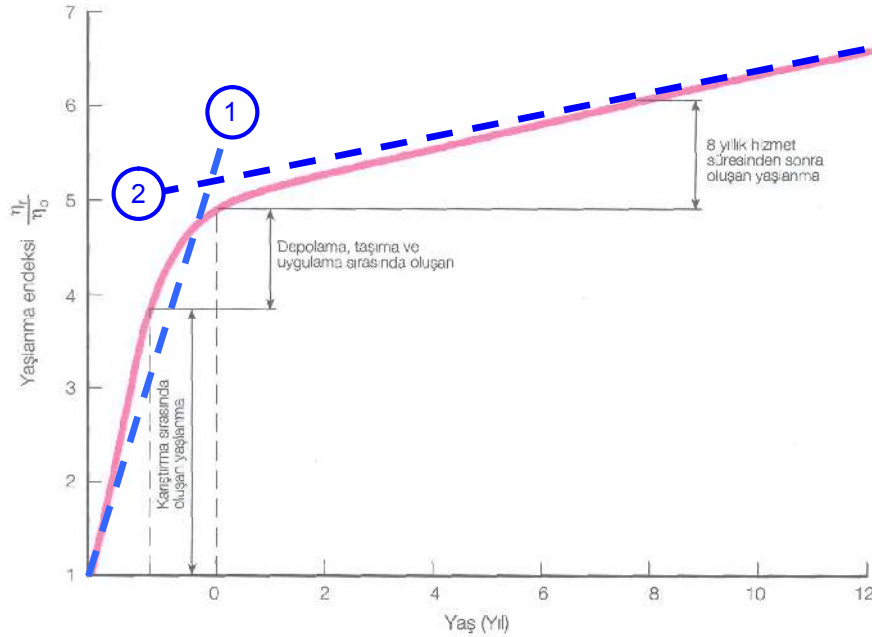
Sertleşmenin miktarı birçok unsura bağlıdır. Bunlar içerisinde; plentteki karıştırma ve sıcak tanklardaki bekletilme süreleri ve sıcaklıkları, karışımdaki

bitüm oranı ve bitüm film kalınlığı gibi nedenler en etkili olanlarıdır. Genel olarak bitümün sertleşmesi [4];

- Adezyon yeteneğinde azalma
- Suyun etkilerine karşı direncinde azalma
- Esnek davranış özelliklerindeki azalmaya bağlı olarak esnek kaplamalarda çatlak oluşumu

gibi istenmeyen sonuçlara sebep olmaktadır.

Bitümün sertleşmesinde yüksek sıcaklık oldukça etkili faktördür. Bitüm, yüksek sıcaklıklara taşıma, depolama, karışım ve yapım esnasında maruz kalır. Bu yüzden bu aşamalarda oluşan sertleşme miktarı oldukça fazladır. Yani bitümün sertleşmesi büyük ölçüde üstyapı hizmet vermeye başlamadan önce oluşmakta (kısa dönem yaşlanma) ve hizmet ömrü boyunca da belli ölçüde devam etmektedir (uzun dönem yaşlanma) [4]. Karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet sırasında bitümün yaşlanmasını gösteren grafik Şekil 2.7’de sunulmuştur.



Şekil 2.7. Karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet sırasında bitümün yaşlanması [2]

Şekil 2.7’de sunulan grafikte yaşlanma indeksinin zamana göre değişimi görülmektedir. Grafik, yatay eksenle zaman (yıl), dikey eksenle yaşlanma indeksi değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Yaşlanma indeksi; karıştırma, depolama, uygulama ve hizmet ömrü süreçlerinde bitümde oluşan yaşlanmanın belirlenebilmesi için kullanılan bir yaklaşımdır. İndeks; bitümün karışım sonrası, depolama sonrası ve hizmet ömrü içinde değişik zamanlarda belli şartlar altında sahip olduğu viskozluğun ölçülerek rafine edildiğinde (yani kullanılmadan önce) aynı şartlar altında sahip olduğu viskozluğa oranıyla elde edilmektedir. Bitüm yaşlandıkça viskozitesinde artma görülür. Buna bağlı olarak indeks değeri de artar. İndeks değerinin artması bitümde oluşan yaşlanmanın arttığını ifade eder. Şekilde 2.7’de görülen eğrisel grafik, eğimleri birbirinden farklı iki doğru parçasıyla ifade edilebilir. Daha dik eğime sahip 1. doğru parçası karıştırma, depolanma, taşıma ve uygulama süreçlerini içermektedir. Bu süreç içerisinde yaşlanma indeksinde hem daha hızlı hem de miktar olarak daha fazla bir artışın olduğu görülmektedir. Bu durum, bitümde oluşan yaşlanmanın büyük kısmının karıştırma, depolanma, taşıma ve uygulama sırasında oluştuğunu göstermektedir (kısa dönem yaşlanma). Yaşlanma indeksindeki artış hızının ve miktarının daha az olduğu ve 2. doğru parçasıyla ifade edilen süreç, üstyapının hizmet ömrü süresi içinde bitümde oluşan yaşlanmayı gösterir. Yaşlanma indeksindeki artış yıllar süren bu süreçte de devam etmektedir. Ancak grafikten de görüldüğü üzere oluşan artış miktarı daha azdır. Bu durum, bitümde oluşan yaşlanmanın büyük oranda üstyapının imalatından önceki süreçte oluştuğunu göstermektedir.

2.4.5. Bitümün adezyonu

Bitümün karışım içinde yerine getirdiği önemli görevlerden biri de sahip olduğu yapıştırıcı özellik sayesinde agregaları bir arada tutmaktır. Agregalar ile bitüm arasındaki bağ kuvveti arttıkça karışımın stabilitesi ve soyulma direnci artmaktadır. Soyulma, agregalar ile bitüm arasındaki bağın suyun zararlı

etkileriyle kopması olarak ifade edilebilir. Agreg-a-bitüm arasındaki bağ kuvveti (adezyon) arttıkça karışımda görülen soyulma miktarı azalmaktadır.

Karışımdaki agreg-a daneleri arasında bulunan bitümün bağ kuvveti esnek üstyapıların stabilitesini yakından etkilemektedir. Bu bağ kuvveti agreg-a danelerini saran bitüm filminin agregaya yapışma yeteneği olan adezyonuyla ilişkilidir. Bitümün adezyon yeteneği yüksek ise bitümlü karışımların kohezyonu yüksek olmakta ve buna bağlı olarak da karışım stabilitesi artmaktadır. Bitümün adezyonu ve kohezyonu ile bitümlü karışımının kohezyonu karıştırılmamalıdır. Bitümün adezyonu agregaya yapışabilme özelliğidir. Bitümün kohezyonu ise yük uygulandığında uzayabilme yeteneğidir [4]. Agregaya yapışma yeteneği yüksek olan bitüm kullanılarak imal edilen karışımların kohezyonu yüksek olmaktadır. Yani bitümün adezyon yeteneğinin yüksek olması bitümlü karışımların kohezyonunu arttırmaktadır.

Bitüm ile agreg-a arasında kurulan bağ kuvvetini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. İyi bir bağın kurulabilmesi için genel olarak agreganın kuru, uygun sıcaklıkta, yeterli miktarda absorpsiyon özelliğine sahip olması ve çok fazla toz bulundurmaması (temiz olması) gerekir. Bunun yanında bitümün karışım esnasında yeterli akıcılığa sahip olması da oldukça önemlidir. Bitümün yeterli akıcılığa sahip olmaması durumunda agregayı ıslatma yeteneğindeki azalmaya bağlı olarak agreg-a ile bitüm arasında oluşan adezyon da azalmaktadır [4, 6]. Bunlarla birlikte, agreg-a türünün de adezyon üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Kuvars ve granit gibi yüksek miktarda SiO_2 içeren agreg-a tiplerinin bitüm ile örtülmesi bazalt, diabloz gibi temel agregalara kıyasla daha zordur [2]. Aynı zamanda kuvars ve granit gibi agregalar suya daha yatkın olduklarından dolayı bu tür agregalarda görülen soyulma miktarı daha da artmaktadır [6].

Agreg-a ile bitüm arasındaki bağ kuvveti bitümün veya bitümlü karışımın değişik katkı maddeleriyle modifiye edilmesiyle artırılabilir. Modifikasyon, bağ kuvvetini yani adezyonu artırarak karışımın soyulmaya

karşı direncini iyileştirebildiği gibi aynı zamanda soyulma bakımından şartname kriterlerine uygun olmayan agregaların da kullanılabilmesi için imkan yaratabilmektedir.

Laboratuvar koşullarında agrega ile bitüm arasında oluşan adezyonun kalitesini belirlemek için çeşitli deneyler yapılabilmektedir. Kullanılan numunenin tipi, numunenin suda bekletildiği koşullar ve soyulma derecesinin değerlendirildiği yöntem bakımından farklılıklar gösteren birçok deney tekniği geliştirilmiştir. Deneyler, özetleri aşağıda verilen altı kategoriye ayrılabilir. Bunların ilk 5'inde bir agrega numunesi bitüm ile kaplanarak belirli şartlarda su veya çözelti içine konur. Belli bir sürenin sonunda bitümün agregadan soyulmasının derecesi ölçülür. 6. deney metodunda ise agreganın su ortamında bitüm ile kaplanması denir. Bu şartlar altında elde edilen bağlanmanın derecesi adezyon indeksi olarak kullanılır [2, 6, 11].

Statik soyulma deneyleri

Bu deney, agreganın bitümle kaplanması, suda bekletilmesi ve oluşan soyulma miktarının belirlemesi süreçlerinden oluşmaktadır. Belirli boyuta sahip agrega gerekli miktarda bitümle kaplanır ve kaplanan agrega 25°C'deki suda 48 saat bekletilir. 48 saatin sonunda soyulma görülen agrega yüzeyinin toplam yüzeye oranı görsel olarak belirlenir [2, 6, 11]. Agrega boyutunun, suda bekleme süresinin ve su sıcaklığının farklı olduğu uygulamaları da mevcuttur.

Dinamik soyulma deneyleri

Bu deney tipi statik soyulma deneyi ile benzer süreçlerden oluşmaktadır. Ancak burada numune sallama ya da yoğurma hareketi ile mekanik olarak çalkalanmaktadır. Soyulmanın derecesi görsel olarak veya orijinal

numuneden ayrılan soyulmuş agrega miktarının belirlenmesi ile yapılır [2, 6, 11].

Kimyasal soyulma deneyleri

Bu deney tipinde sodyum karbonat çözeltileri kullanılmaktadır. Deneyde, bitümle kaplı agrega farklı miktarda sodyum karbonat içeren çözeltilerde kaynatılır. Soyulmanın ilk olarak gözlemlendiği sodyum karbonat çözeltisinin konsantrasyonu yapışkanlık ölçüsü olarak değerlendirilir [2, 6, 11].

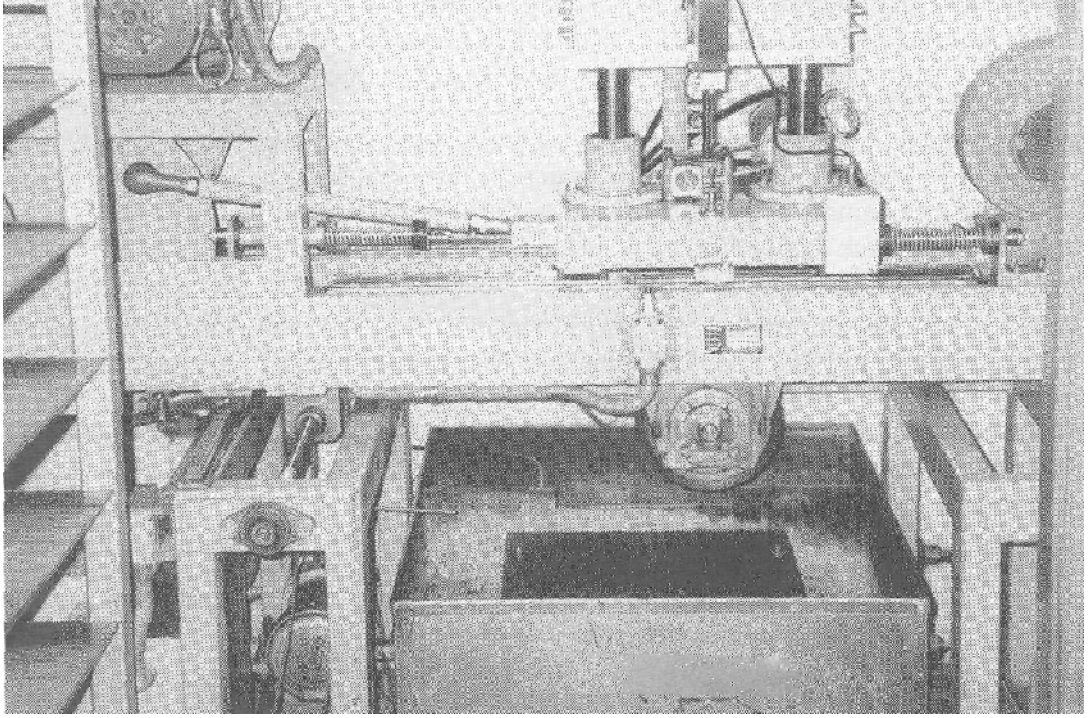
Mekaniksel soyulma deneyleri

Mekaniksel soyulma deneylerinde bitümlü karışım suda bekletildikten sonra mekanik özelliğindeki değişim çeşitli deney yöntemleri ile araştırılır. En bilinen mekanik özellik Marshall deneyi ile elde edilmektedir [2, 6, 11]. Marshall deneyi ile soyulmanın belirlenmesi için hazırlanan karışımların (Marshall briketlerinin) suda bekletilmeden önceki ve suda bekletildikten sonraki Marshall stabiliteleri ölçülür. İki değer oranı soyulma derecesini belirlemek için kullanılır.

Trafik simülasyonlu soyulma deneyleri

Bu deney türünün öncekilerden en önemli farkı soyulma üzerinde suyun etkisinin yanı sıra trafik etkisinin de incelenmesidir. Bu deney, üzerinden tekerleklerin geçtiği bir makinada veya trafik etkisinin karşılıklı hareket eden tekerleklerle sağlandığı makinalar üzerinde yapılır. Tekerlek, 30 lb/inç²'lik basınç kuvveti uygulayarak numune üzerinde dakikada 25 tur yapacak şekilde 11 inç uzunluğundaki bir şeridi çığner. Numune 5/4 inç derinliğinde, 12 inç boyunda ve 4 inç genişliğinde, metalden yapılmış delikli bir kalıp içerisinde bulunur ve su banyosu içerisinde yatay olarak durur. Su seviyesi, numunenin tam üst seviyesindedir ve su banyosunun sıcaklığı 40°C'dir. Bu deney ile soyulmanın derecelendirilmesi için kullanılan kriter, numunenin

mukavemetini kaybetmesine kadar geçen zamandır. Deney sürecinde, numunede oluşan tekerlek izi miktarındaki ani artışın başladığı nokta bozulma noktası olarak ifade edilir ve bu noktaya ulaşmak için geçen zaman da bozulma süresi olarak kabul edilir. Deneyde kullanılan cihaz Resim 2.1’de görülmektedir [2, 6, 11].



Resim 2.1. Trafik simulasyonlu soyulma deneylerinde kullanılan cihaz [9]

Resim 2.1’de görülen deney cihazı daha ziyade karışımda kalıcı deformasyon (tekerlek izi) oluşma potansiyelinin belirlenmesi için kullanılır. Ancak deney su ortamında gerçekleştirildiğinden dolayı karışımın suya karşı olan hassasiyetinin belirlenmesinde bir ölçüt olarak kullanılabilir [9].

Kaplama soyulma deneyleri

Bu deney tipinde, agrega ile bitüm arasındaki yapışmanın su ortamında gerçekleştirilmesine çalışılır. Deney, agregaların suya batırılmış bir tepside bulunan bitümün üzerine uygulanmasıyla yapılabilmektedir. Bu deney

yöntemi; ıslak şartlar altında kullanılacak agregalar ile bitüm arasındaki yapışmayı modifikasyonun ne derecede etkilediğini araştırmak için oldukça uygundur [6, 11].

3. BİTÜM MODİFİKASYONU

Esnek üstyapılar uygun bir tasarım ve kaliteli malzeme kullanımının yanı sıra yapım sürecinde gerekli şartlar sağlanarak inşaa edilmelidir. Aksi takdirde deformasyon, ayrışma, çatlama gibi üstyapı performansını azaltan bozulmalar hem daha erken hem de daha fazla miktarda oluşabilmekte ve bu durum üstyapının hizmet ömrünü azaltabilmektedir. Ancak uygun tasarım ve yapım koşullarında imal edilseler dahi trafik, iklim ve çevresel etkilerle zamanla üstyapılarda bazı bozulmalar oluşabilmektedir. Bunlar arasında tekerlek izi ve düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklar sıkça görülen önemli bozulmalardır. Esnek üstyapılarda oluşan bu iki bozulma türünde de, üstyapının maruz kaldığı hava sıcaklığındaki bitüm davranışı önemli rol oynamaktadır. Bu iki bozulmadan başka, hava sıcaklığından ziyade daha çok yüksek trafik tekerrüründen kaynaklanan yorulma çatlakları da esnek üstyapılarda sıkça görülebilmektedir.

Günümüzde gerek Avrupa ve ABD'deki gerekse ülkemizde karayollarının oldukça yüksek orandaki bölümü esnek üstyapı tipinde inşaa edilmiştir. Bu yüzden, esnek üstyapılarda oluşan bozulmalar ve oluşumlarının önlenmesi veya azaltılması önemli bir ulaşım problemi olarak karşımızda durmaktadır. Üstyapıda oluşan bazı bozulmalar tasarım ve yapım şartlarının iyileştirilmesiyle önlenabilir niteliktedir. Ancak yukarıda da belirtildiği üzere sıkça görülen bazıları mevcut malzeme (agrega ve bitüm), tasarım ve yapım teknikleriyle önlenememektedir.

Üstyapıda oluşan bozulmaların iyileştirilip esnek üstyapıların performansının artırılması, çözümü birçok araştırmacı tarafından aranan önemli bir problemdir. Bu amaç doğrultusunda bitümün çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilmesi gün geçtikçe önem ve hız kazanmaktadır. Bu bölümde 2001-2008 yılları arasında Türkiye, bazı Avrupa ülkeleri ve Japonya'daki bitüm ve modifiye bitüm tüketimleri karşılaştırılmış, bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri ve bu maddelerin bitümde meydana getirdikleri

değişimlerden bahsedilmiş ve modifiye bitümler üzerine gerçekleştirilen bu çalışmayla ilgili literatür araştırmaları sunulmuştur.

3.1. 2001 - 2008 Yılları Arasında Ükelere Göre Karayollarında Bitüm Tüketimi

Bitüm, sahip olduğu bağlayıcılık özelliği sebebiyle daha ziyade yol yapımında tüketilmektedir. Çizelge 3.1’de 2001-2008 yılları arasında Türkiye’deki, bazı Avrupa ülkelerindeki ve Japonya’daki karayollarında tüketilen bitüm miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Karayollarında tüketilen bitüm miktarı (milyon ton) [19-26]

Ülke	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Türkiye	1,03	1,15	1,2	1,33	1,45	1,56	1,88	2,02
Avusturya		0,5	0,6	0,6	0,6	0,55	0,5	0,48
Belçika	0,22	0,21	0,225	0,227	0,24	0,22	0,2	0,21
Çek Cum.	0,24	0,21	0,34	0,321	0,32	0,45	0,47	0,5
Danimarka	0,15	0,15	0,15	0,18	0,16	0,17	0,17	0,16
Finlandiya	0,25	0,28	0,305	0,306	0,32	0,29	0,3	0,3
Fransa	3,11	1,31	2,9	3	2,9	3	3,52	3,38
Almanya	2,573	2,15	2,24	2,05	2,42	2,41	2,15	2,15
Büyük Britanya	1,9	1,98	2	1,75	1,67	1,5	1,48	1,46
Yunanistan	0,4		0,45	0,45		0,4	0,4	0,3
Macaristan	0,148	0,182	0,15	0,16	0,21	0,23	0,2	0,14
İrlanda	0,25	0,25	0,26	0,265	0,27	0,27	0,26	0,19
İtalya	1,95	1,95	2,08	2,3	1,97	1,9	1,7	1,6
Hollanda	0,35	0,26	0,3	0,35		0,37	0,35	
Norveç	0,24	0,23	0,228	0,264	0,28	0,29	3,2	3,2
Polonya	0,65	0,57	0,636	0,67	0,86	1,45		1,28
Slovenya	0,066	0,068	0,08	0,08	0,08	0,1	0,1	0,11

Çizelge 3.1. (Devam) Karayollarında tüketilen bitüm miktarı (milyon ton)
[19-26]

Ülke	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
İspanya				1,75	1,87	1,6	2,15	1,89
İsveç	0,368	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
İsviçre	0,27	0,29	0,26	0,27	0,24	0,27	0,26	0,27
Japonya	3,404	3,18	2,81		2,67	2,59	2,36	2,01

Çizelge 3.1 incelendiğinde; Türkiye'nin 2001-2008 yılları arasında karayollarında tükettiği bitüm miktarının sürekli artış gösterdiği, 2001 yılında tüketilen miktar yaklaşık 1 milyon ton iken 2008'de bu değerin yaklaşık 2 milyon ton olduğu görülmektedir. Türkiye ve Norveç özellikle son yıllardaki tüketimleriyle çizelgedeki 21 ülke içinde Fransa'dan sonra Almanya ve Japonya'yla birlikte karayollarında en çok bitüm tüketen ülkeler arasındadır. Bu durum, bitümün ülkemizde yoğun olarak kullanıldığını göstermektedir.

Çizelge 3.2'de bir önceki çizelgede bulunan ülkelerin bitümü hangi oranda modifiye ederek kullandıkları sunulmuştur.

Çizelge 3.2 Karayollarında tüketilen bitümdeki modifikasyon oranı (%) [19-26]

Ülke	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Türkiye	0,4	1,3	0,5	1,4	0,8	2,2	1,3	1,4
Avusturya		26	50	50	60	50	20	20
Belçika	18	20	23	21	23	20	19	24
Çek Cum.	17,5	15,4	17,8	19	19	19	20	20
Danimarka	5	5	5	5	5	5	5	5
Finlandiya	1	1	1	5	2	1	0,5	0
Fransa	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Almanya	13,7	14	13	16,8	22,7	23	22,5	22,5
Büyük Britanya	5	6	6	6,5	7	7	7	7
Yunanistan	0,1		2	0,1		5	6	6

Çizelge 3.2. (Devam) Karayollarında tüketilen bitümdeki modifikasyon oranı (%) [19-26]

Ülke	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Macaristan	10,3	17,6	10,3	9,7	30,6	32,3	25	38,7
İrlanda	10	10	11	10,5	10	10,2	10,8	11,2
İtalya	7,4	7,4	7,7	7,4	8,7	11	13,6	15,5
Hollanda	6,7	10		8	3	7	7	
Norveç	3	1	0	0	1	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Polonya	6	3	2	2	12	15		21
Slovenya	9	8	12,5	15	18	12	15	22
İspanya				5,7	8,5	12,9	13,9	12,4
İsveç	2	2	2	2	2	2	3	4
İsviçre	7	7	7	7	9	10	10	11
Japonya		14	17,2	16,8	16,9	14,6	17	18,6

Çizelge 3.2’de incelenen ülkeler arasında karayollarında tüketilen bitümdeki modifikasyon oranının %60’a kadar ulaştığı görülmektedir. Bu değer 2005 yılında Avusturya’ya aittir ve miktar olarak Avusturya’da kullanılan yıllık toplam 600000 ton bitümün 360000 tonunun modifiye bitümler tarafından oluşturulduğunu göstermektedir. Avusturya’da diğer yıllarda da modifikasyona önem verildiği bu ülke için çizelgede görülen yüksek değerlerden anlaşılabilmektedir.

Bitüm tüketiminde önde gelen ülkelerdeki modifiye bitüm kullanımları aşağıda özetlenmiştir.

Almanya’da modifiye bitüme olan ilginin gittikçe arttığı ve son yıllarda tüketilen toplam miktar içindeki payının %20’yi geçtiği görülmektedir. 2008 yılı için kullanılan %22,5 oranındaki modifiye bitüm, 2150000 tonluk bitüm tüketiminin 483750 tonluk miktarını oluşturmaktadır. Bu değer çizelgedeki ülkelerin birçoğunun yıllık toplam tüketiminden daha fazladır. Almanya’da

2006 yılında tüketilen toplam bitümün %23'lük kısmını oluşturan 554300 tonluk modifiye bitüm miktarı, Çizelge 3.2 kapsamında incelenen ülkeler ve yıllar içinde yıllık bazda tüketilen en fazla modifiye bitüm miktarıdır.

Tüketimin fazla olduğu diğer bir ülke olan Japonya'da modifiye bitüm kullanımı %20 seviyesine yaklaşmıştır. Son yıllarda bu ülkede tüketilen bitümün her yıl 400000-500000 tonunu modifiye bitümler oluşturmaktadır.

Polonya ve Norveç'in son yıllarda karayolunda tükettikleri bitüm miktarı oldukça artmıştır. Norveç'te modifiye bitüm tüketimi oldukça düşük seviyelerde olup son yıllarda yol inşaatında modifiye bitüm neredeyse tüketilmemektedir. Polonya'da ise 2005 yılıyla birlikte modifiye bitümün yol inşaatlarında kullanımı artmış ve 2008 yılına gelindiğinde oran %21'e ulaşarak bu yıl için toplamda 268800 tonluk modifiye bitüm tüketimine ulaşılmıştır.

Bitümün Fransa'da yıllık tüketim miktarı 3 milyon ton seviyesindedir. Çizelge 3.2'de bunun ne kadarının modifiye bitüm şeklinde tüketildiğine dair net bilgi bulunmamakla birlikte bu oranın %10'dan az olduğu anlaşılmaktadır.

Büyük Britanya'daki yol inşaatlarında son yıllarda yıllık 1-2 milyon ton arasında bitüm tüketilmiştir. Bunun her yıl yaklaşık 100000 tonu modifiye bitüm şeklinde harcanmakta ve bu değer Büyük Britanya'daki toplam bitüm tüketiminin %5-7'sini oluşturmaktadır.

İspanya'da son yıllardaki bitüm tüketimi 1,5 milyon tonun üzerindedir. Bu ülkede karayolu inşaatlarında modifiye bitüm kullanımı giderek artmış ve yıllık 300000 ton seviyesine yaklaşmıştır.

Yıllık tüketimin yaklaşık 2 milyon ton olduğu İtalya'da özellikle 2005 ve sonrasındaki artışlarla modifiye bitüm tüketim oranı %15'i geçmiş ve miktar olarak yıllık 250000 tona ulaşmıştır.

Bitüm tüketiminin daha az olduğu ülkelerdeki modifiye bitüm kullanımları aşağıda özetlenmiştir.

Macaristan'da modifikasyona olan ilginin nispeten fazla olduğu görülmektedir. Yıllık 150-200 bin ton civarında bitüm tüketimi olan Macaristan'da modifiye bitüm kullanımı özellikle 2005 yılında hızlıca artmış ve 2008'e gelindiğinde toplam bitüm tüketimi içinde modifiye bitüm oranı %38,7 olmuştur. Bu değer, Macaristan'da 2008 yılında tüketilen toplam 140000 tonluk bitümün 54180 tonunun modifiye edilerek kullanıldığını göstermektedir. Belçika ve Çek Cumhuriyeti'nde modifiye bitüm tüketimi %20 seviyelerindedir. Slovenya'da da modifiye bitüm tüketimi 2008 yılı itibarıyla %22'ye ulaşmıştır. İrlanda ve İsviçre'de karayollarında her yıl tüketilen bitüm miktarı yaklaşık olarak 250000 tondur. Her iki ülkede de tüketilen toplam miktar içindeki modifiye bitüm oranı %10 seviyesindedir. Bu oran, yıllık 20000-30000 ton modifiye bitüm kullanımını işaret etmektedir. Bazı yıllara ait verileri eksik olsa da Hollanda'nın yıllık bitüm tüketiminin 300000-350000 ton civarında olduğu ve yıllara göre oranlar değişse de her yıl bu miktarın 20000-30000 tonunun modifiye edilerek kullanıldığı söylenebilir niteliktedir. Danimarka, Finlandiya, Yunanistan ve İsveç'in karayollarında yıllık olarak tükettiği bitüm miktarı 500000 ton veya daha azdır ve bu ülkelerde tüketilen modifiye bitümün toplam miktara oranı en fazla %5 ile Danimarka'ya aittir.

Ülkemiz, yıllık 2 milyon tonu geçen kullanım miktarı ile bitümün en çok tüketildiği ülkeler arasında yer almaktadır. 2007 ve 2008 yıllarında Norveç'teki bitüm tüketiminde görülen büyük artış değerlendirme dışında tutulduğunda; bitümün çokça tüketildiği Almanya, Büyük Britanya, İtalya, Japonya gibi ülkeler arasında toplam miktar içinde modifiye bitüm tüketiminin en düşük olduğu ülke yaklaşık %7 ile Büyük Britanya'dır ve bu değer bu ülke için yıllık yaklaşık 100000 ton modifiye bitüm tüketimine karşılık gelmektedir. Ülkemizde ise modifiye bitüm tüketim oranı ve bu orana ait trend her yıl değişkenlik göstererek %1-2 civarında seyretmiştir. Çizelgedeki değerler miktar olarak incelendiğinde ise modifiye bitümün ülkemizde en yüksek

34320 tonla 2006'da, en düşük ise 4326 tonla 2001'de kullanıldığı anlaşılmaktadır. Yol inşaatında bitümü en çok tüketen ülkeler arasında yıllık ortalama 1,72 milyon ton tüketime sahip Büyük Britanya, 1,45 milyon ton tüketime sahip olan ülkemizin hemen üzerinde yer almaktadır. İki ülkenin tükettiği yıllık ortalama modifiye bitüm miktarları incelendiğinde ise Büyük Britanya'nın 109406,3 tonluk ortalama tüketimi ülkemizin sahip olduğu ortalama 17817 tonluk tüketimin 6,14 katı olarak karşımıza çıkmaktadır. 2001-2008 yılları arasında 17817 tonluk yıllık ortalama modifiye bitüm tüketim değeriyle Türkiye, yıllık toplam bitüm tüketimi 300000 tondan daha az olan İsviçre, Belçika, Macaristan ve İrlanda'dan sonra gelmektedir.

Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'deki veriler ve yukarıda yapılan değerlendirmeler ışığında; özellikle karayollarında kullandığı bitüm miktarı fazla olan ülkelere göre, ülkemizdeki modifiye bitüm uygulamalarının daha az tercih edildiği anlaşılmaktadır.

3.2. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddeleri ve Modifiye Bitümlerin Esnek Üstyapılarda Sağladığı Faydalar

Günümüzde bitüm modifikasyonunda kullanılan çok sayıda katkı maddesi bulunmaktadır ve birçok araştırmacı kullanılabilecek yeni katkı maddeleriyle ilgili çalışmalar yapmaktadır. Katkı maddelerinin üstyapı imalatında kullanılabilir olması için bitüm performansını artırmasının yanında bazı özelliklere sahip olması önem taşımaktadır. Bunlar [6];

- Kolayca temin edilebilir olması,
- Bitümle karıştırma sıcaklıklarında özelliklerini kaybetmemesi,
- Bitüm ile karışabilir olması,
- Değişik uygulama sıcaklıklarında bitümü fazla viskoz veya çok rijit veya kırılğan hale getirmemesi,

- Değişik hizmet sıcaklıklarında ihtiyaç duyulan davranış özelliğine katkı yapabilmesi,
- Sağlayacağı fayda ile karşılaştırıldığında kullanımının ekonomik olması

olarak sayılabilir. Aynı zamanda katkı maddelerinin bitüm ile karıştırılmasından sonra elde edilen modifiye bitümlerin [4];

- Depolama, uygulama ve hizmet ömrü boyunca modifikasyon ile kazandıkları özelliklerini aynen korumaları ve değişime uğramamaları,
- Mevcut ekipman ile kullanılabilir olmaları

modifikasyonun amacı kapsamında önem arz eden diğer hususlardır.

Esnek üstyapılardaki kaplama tabakaları bitümlü sıcak karışımlar kullanılarak imal edilmektedir. Bu tabakalar, üstyapıyı oluşturan diğer tabakalara göre daha üstte bulunduklarından dolayı trafik, iklim ve çevrenin olumsuz etkilerine daha çok maruz kalmaktadırlar. Bu tabakaların dış etkilere karşı daha dirençli olmaları durumunda üstyapının bakım/onarım ihtiyacı azalmakta ve hizmet ömrü veya hizmet ömrü içinde sağladığı hizmet seviyesi artabilmektedir. İmal edildikleri karışım özelliklerinin katkı maddeleri kullanılarak iyileştirilmesiyle kaplama tabakalarının daha dirençli olmaları sağlanabilir. Bu durum, modifiye bitüm kullanılarak hazırlanan agrega-bitüm karışımıyla sağlanabildiği gibi katkı maddesinin plentte agrega-bitüm karışımına katılmasıyla da oluşturulabilir. Ancak karışımın modifiye edilmesine kıyasla bitümün doğrudan modifiye edilmesi ile daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir [27].

Bitüm ve agrega-bitüm karışımlarının modifiye edilmesine duyulan ilginin artmasında etkili olan başka hususlar ise şöyle sıralanabilir [2];

- Ham petrol ve bitüm fiyatlarında artış tehlikesi

- Yüksek maliyetlerin daha ince kaplama inşaatı eğilimini doğurması, bu durumun hizmet ömürlerinde azalmalar meydana getirmesi
- Trafik yüklerinde önemli artışlar oluşması
- Kaynak sıkıntıları sebebiyle gerekli onarımların zamanında yapılamaması durumunun sıkça oluşması
- Yakıt dökülmeleri gibi özel durumlara karşı dayanımın artırılmasına gereksinim olması
- Kimi endüstriyel atıkların ortadan kaldırılabilmesi ya da başka bir yere nakledilmesi konusunda oluşan çevreci ve ekonomik baskılar sonucu bu atıkların bitüm katkı maddesi olarak kullanılması düşüncesine neden olması
- İnşaat ekipmanlarındaki gelişmenin katkı maddeleri kullanma olanağını sağlayabilecek düzeye ulaşması

Yukarıdaki inceleme, değerlendirme ve tecrübeye dayalı olan hususlar değerlendirildiğinde modifikasyon işlemiyle üstyapının;

- Hizmet ömrünün artabileceği
- Bakım/onarım ihtiyacının azalabileceği
- Dayanıklılığının artabileceği

yorumlanabilmektedir.

Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri (modifiyer) gerek cins ve miktar gerekse uygulandığı bitüm yapısına bağlı olarak farklı sonuçlar yaratmaktadır. Belli bir katkı maddesinin aynı bitüme farklı oranlarda eklenmesiyle bitüm özelliklerinde farklı değişimler oluşabilmektedir. Bu yüzden bitüm modifikasyonunda kullanılacak katkı maddesi miktarının belirlenmesi önemlidir. Bunun yanı sıra her bir farklı katkı maddesinin bitüm özelliklerinde farklı değişimler oluşturabilmesinden ötürü kullanılacak katkı maddesi cinsinin belirlenmesi de önemli bir husustur. Modifikasyonda

kullanılan katkı maddesinin miktarı ve cinsi değıştikçe bitüm özellikleri de farklı bir şekilde değışmektedir. Bunlardan başka, bitüm ile katkı maddesinin karışım prosesi de modifikasyon sonucunu yakından etkiler. Karıştırma süresi, karıştırma sıcaklığı ve karıştırmada kullanılan cihaz grubu, homojen bir katkı maddesi-bitüm karışımının elde edilebilmesinde önemi büyüktür. Karışım prosesi, modifiye edilen bitümün özelliklerine önemli ölçüde etki eden husus olup prosesteki değışmeler ile farklı modifikasyon sonuçları elde edilebilmektedir [4, 7].

Bitüm ve/veya bitümlü sıcak karışımlar çok farklı tür ve yapıya sahip değışik katkı maddeleriyle modifiye edilebilmektedir. Günümüzde bitüm modifikasyonunda kullanıldığı bilinen bazı katkı maddesi tipleri ve bitüm kıvamında meydana getirdiğı değışiklikler Çizelge 3.3'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Bitüm modifikasyonunda kullanılan bazı katkı maddeleri [2]

Tip	Modifiyer (Katkı Maddesi)	Modifiyerlerin Bitüm Kıvamında Meydana Getirdiğı Değışim
1. Dolgu Maddeleri	- Mineral dolgular; Taş tozu Kireç Portland çimentosu Uçucu kül - Karbon siyahı - Kükürt	Sertleştirme
2. Extender	- Kükürt - Lignin (Odun özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal lateks (Kauçuk ağacı özsuyu) b. Yapay lateks c. Blok Kopolimer d. İşlenmiş kauçuk	- Doğal kauçuk - Stiren butadien veya SBR - Stiren-butadien Stiren veya SBS - Dönüştürülmüş kauçuk	-
4. Plastik	- Polietilen - Polipropilen - Bi-vinil-asetat, EVA - Polivinil klorür, PVC	Sertleştirme

Çizelge 3.3. (Devam) Bitüm modifikasyonunda kullanılan bazı katkı maddeleri [2]

Tip	Modifiyer (Katkı Maddesi)	Modifiyerlerin Bitüm Kıvamında Meydana Getirdiği Değişim
5. Bileşim	3 ve 4'deki polimerlerin karışımı	-
6. Fiber	- Doğal: Asbest, Taş yünü - Yapay: Polipropilen, Polyester, 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

Bitümün çeşitli katkı maddeleri ile modifikasyonu, bitümün ve bu bitüm ile imal edilen karışımların farklı özelliklerinde farklı değişimler oluşturmaktadır. Manganez bileşikler modifiyer olarak kullanılması ile karışımın mukavemeti artmakta ve sıcaklığa olan duyarlılığı iyileşebilmektedir. Termoplastik polimerlerin (polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistiren, EVA, ...vb.) modifiyer olarak kullanımı ile bitümün penetrasyonu azalmakta, yumuşama noktası artmakta ve karışımın stabilitesi ile deformasyon direnci artmaktadır. Termoplastik kauçukların (doğal kauçuk, SBS, SIS, SEBS) kullanımı ile karışımın deformasyon ve yorulma direnci artırılabilir. Termoset polimer ile modifikasyon, reçine ve sertleştirici olmak üzere iki farklı sıvı bileşiğin bitüme katılması suretiyle gerçekleştirilmektedir. Bu tip modifiye bitümler deformasyona karşı daha dirençlidir. Ayrıca agrega ve bitüm arasındaki adezyon daha fazla olduğundan karışımın soyulma direnci de daha yüksektir [4, 7]. Agrega karışımındaki filler malzemesi yerine az miktarda (karışımındaki agrega ağırlığının %1-2'si kadar) sönmüş kireç veya

çimento eklendiğinde agrega-bitüm arasındaki adezyon iyileşmekte ve buna bağlı olarak karışımın soyulma hassasiyeti azalabilmektedir [10, 28]. Aminler, agrega-bitüm arasındaki adezyonu arttırmaya yönelik olarak kullanılan diğer bir katkı türünü oluşturmaktadır. Katyonik yapıdadırlar ve agrega yüzeyine doğru çekilirler. Bu sayede agrega ile bitüm arasında iyonik bağlı köprü oluşur [6]. Bitümün katran ile modifiye edilmesi araçlardan kaplama üzerine sızan yakıt ve yağa karşı direncini arttırmaktadır. %5-10 oranında gilsonit modifikasyonu, trafiğin yoğun olduğu kaplamalarda oluşan kalıcı deformasyonu azaltabilmektedir. %20'ye kadar karbon siyahının eklenmesi ile bitümün durabilitesi iyileştirmekte, tekerlek izi ve deformasyonun başlangıç oluşumu azalmaktadır. Kükürt modifikasyonu ile Marshall stabilitesinde % 50'ye kadar artış, yorulma direncinde iyileşme ve yakıt dökülmelerine karşı direnç sağlanabilmektedir. Bunlardan başka, agrega-bitüm karışımlarını modifiye etmek için kullanılabilen polipropilen veya polyester fiberler mevcuttur. Bu tür modifikasyonla tekerlek izine, deformasyona ve yansıma çatlağına karşı direnç artırılabilir [8]. Ayrıca, bitümlü karışımlarda depolama sırasında sertleşmeyi, nakliye sırasında segregasyonu ve serilme sırasında yırtılmayı önlemek için silikon uygulamaları bulunmaktadır. Silikon, aynı zamanda, bitümün sıcak olarak depolanması durumunda köpük oluşumunu engellemek için de kullanılabilir [5].

Bitümün modifiye edilmesine giderek artan ilgiye paralel olarak modifikasyonda kullanılabilen katkı maddelerindeki çeşitlilik sürekli artmaktadır. Başka bir deyişle, Çizelge 3.3'te sunulan ve yukarıda bahsedilenlerin dışında farklı katkı maddelerinin mevcut olması kuvvetle muhtemeldir. Kullanılan her bir katkı maddesi ile bitüm ve karışım özellikleri üzerinde farklı iyileşmeler oluşabilmektedir. Bitüm modifikasyonu ile ilgili yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar, esnek üstyapılarda görülen bozulmaların/kusurların uygun katkı maddesi (modifiyer) kullanımıyla önlenmesinin veya iyileştirilmesinin/geciktirilmesinin mümkün olabileceğini göstermektedir. Bitüm veya karışımlarda kullanılabilecek katkı maddelerinin

gün geçtikçe daha çok çeşitlilik arz etmesi esnek üstyapılarda görülen bozulmaların daha da azaltılabileceğine dair umut vermektedir.

3.3. Literatür Araştırması

Bu alt bölümde modifiye bitümler ile ilgili yapılan araştırmalar incelenmiştir. Çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilen bitümlerin ve modifiye bitüm kullanılan karışımların özelliklerinde meydana gelen değişimler aşağıda özetlenmiştir.

Zhang ve Yu tarafından yapılan çalışmada bitümün fiziksel özellikleri, dinamik reolojik özellikleri, yüksek sıcaklıkta depolanma kararlılığı, morfolojisi ve içyapısı üzerinde polifosforik asit (PPA), Stiren-Bütadien-Kauçuk (SBR) ve Sülfürün etkisi araştırılmıştır. Bitümün SBR, PPA ve sülfür ile modifikasyon işlemi; katkısız bitümün ısıtılarak akıcı hale getirilmesi, 120°C-130°C'ye ulaşıldığında SBR ve sülfür eklenip 40-50 dakika karıştırılması, akabinde PPA eklenip 160°C-170°C'ye kadar ısıtılması ve bu sıcaklıkta 5000 devir/dakika hızla 40 dakika karıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma bulgularında; SBR modifikasyonlu bitümün yüksek sıcaklıkta depolanma kararlılığının PPA ve sülfür eklenmesiyle önemli ölçüde iyileştiği, PPA modifikasyonlu bitüme SBR eklenmesiyle tekerlek izi direnci üzerinde uygun olmayan etkilerle birlikte düşük sıcaklıktaki fiziksel özelliklerinin iyileştiği, PPA/SBR modifikasyonlu bitüme sülfür eklenmesiyle reolojik özelliklerinin ve adezyonun iyileştiği belirtilerek optimal oranda PPA, SBR ve sülfürün bitümün özelliklerini iyileştirebileceği ifade edilmiştir [29].

Shahabadi ve ark. tarafından yapılan çalışmada bitüm modifikasyonunda bentonit (BT) kili ve araştırmacılarca organik olarak modifiye edilmiş bentonit kili (OBT) kullanılmıştır. Modifiye bitümlerin yumuşama noktaları, viskoziteleri ve düktiliteleri kullanılan kil içeriği ve tipine göre ölçülmüştür. DSR test sonuçları modifiye bitümlerin daha yüksek tekerlek izi direncine sahip olduklarını göstermiş ve yaşlandırılmış numunelere uygulanan BBR test

sonuçlarına göre BT veya OBT modifikasyonunun bitümün düşük sıcaklıktaki reolojik özelliklerini ve çatlama direncini önemli ölçüde iyileştirdiği belirtilmiştir [30].

Görkem ve Şengöz tarafından yapılan çalışmada yol kaplamasında beklenenden daha önce oluşan bozulmaların ana sebeplerinden birinin bitümlü karışım tabakalarında sudan (rutubet) dolayı oluşan hasarlar olduğu belirtilerek agrega tipi, bitüm, karışım tasarımı ve inşası, trafik seviyesi, çevre ve bitüme katılan katkı maddesi özellikleri, agrega veya bitüm-agrega karışımı gibi birçok değişkenin bitümlü karışım tabakalarında suyun meydana getirdiği hasar miktarını etkilediği ifade edilmiştir. Çalışma; farklı agrega tipleri içeren (kireçtaşı ve bazalt-kireçtaşı karışımı) bitümlü sıcak karışımların soyulma potansiyeli ve su (rutubet) hassasiyeti özellikleri üzerinde sönmüş kireç, SBS (Kraton D-1101) ve EVA (Evatane 2805) modifiyerli bitümün oluşturduğu etkinin belirlenmesini amaçlamıştır. Test numunelerinin soyulma potansiyeli ve su hassasiyet özellikleri sırasıyla stereo mikroskop ile görüntüleme, Nicholson soyulma testi ve Modifiye Lottman testleriyle değerlendirilmiştir. Test sonuçlarına göre, sönmüş kireç eklenmesi ve polimer modifikasyonunun bitümlü karışımların suyun zararlı etkilerine karşı direncini arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca SBS modifikasyonlu bitümle hazırlanan numunelerin EVA modifikasyonlu bitümle hazırlanan numunelere göre sudan kaynaklanan hasarlara karşı daha dirençli oldukları bulunmuştur [28].

Al-Hadidy ve Tan tarafından yapılan çalışmada taş mastik karışımlarda (SMA) katkı maddesi olarak nişasta (ST) ve SBS'nin uygulanabilirliği incelenmiştir. Bitüm ağırlığının %5'i oranında ST ve SBS 70/100 penetrasyon dereceli bitüm ile karıştırılmıştır. SBS ile modifikasyon işlemi 170°C'de 2 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. ST ile modifikasyonda en iyi sonuçların karıştırma sıcaklığı 135°C-142°C'nin üzerindeyken elde edildiği belirtilmiştir. Orijinal ve modifiye bitümler fizikokimyasal testlere tabii tutulmuştur. Orijinal ve modifiye SMA karışımlarına Marshall stabilitesi, çekme dayanımı, çekme dayanımı oranı ve esneklik modülünü içeren performans testleri uygulanmıştır. ST ve

SBS eklenmesiyle Marshall stabilitesinde, çekme dayanımı oranında ve esneklik modülünde artış meydana gelmiştir. Kaplamanın hizmet ömründeki iyileşme veya aynı hizmet ömrü için SMA veya temel tabaka kalınlıklarında modifikasyona bağlı azalmayı tahmin etmek için mekanik-ampirik tasarım yaklaşımı kullanılmıştır. Yapılan testlere ait sonuçlara göre, bitüme ST veya SBS eklenmesiyle su (rutubet) hasarının ve sıcaklık hassasiyetinin azaltılabileceği belirtilmiştir [31].

Liu ve ark. tarafından yapılan çalışmada bitüm, iki farklı partikül boyutuna sahip dört tip kırıntı formlu kauçuk ile modifiye edilmiş ve bitüm davranışında meydana gelen değişimleri değerlendirmek için temel kriter olarak yumuşama noktası, düşük sıcaklıkta duktilite ve penetrasyon indeksi seçilmiştir. Çalışma kapsamında bitüm modifikasyonu için kullanılan kauçuklar; atık araç lastiklerinden elde edilen ezilmiş kauçuk (TR, tread rubber), ağır taşıt lastiği (HT, heavy truck), kamyonet lastiği (ST, small truck) ve tarımsal amaçlı araç lastiğinden elde edilmiş (AT, agriculture tire) ve bitüm ile modifikasyon işlemleri $180\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de 30 dakika süreyle karıştırılmalarıyla gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analizler ışığında bitüm davranışında en çok etkiye sahip olan faktörün bitüme katılan kauçuk miktarının olduğu belirtilmiş ve kauçuk miktarı arttıkça yumuşama noktasının ve penetrasyon indeksinin arttığı, düşük sıcaklıktaki duktilitenin azaldığı ifade edilmiştir. DSR ve BBR test sonuçlarına göre bitüm ağırlığının %20'si oranında TR kauçukla modifiye edilen bitümün daha iyi performansla sahip olduğu; ancak maliyet de göz önüne alındığında %15 HT kauçuk ile modifikasyonun daha uygun olduğu belirtilmiştir. Ayrıca kauçuk modifikasyonlu bitümlerin yumuşama noktaları aynı olsa da tekerlek izi faktörlerinin dikkate değer biçimde farklı olabileceği görülmüştür [32].

Çubuk ve ark. tarafından yapılan çalışmada bitümün epoksi reçinesi ile modifikasyonu araştırılmıştır. Çalışmada 50/70 penetrasyon dereceli bitüme değişik miktarlarda epoksi reçinesi katılarak bitüm viskozitesinin katkı maddesi konsantrasyonu ve sıcaklığa bağlı değişimi incelenmiştir. Bitümün epoksi reçinesi ile modifikasyon işlemi 150°C 'de 1 saat süreyle

karıştırılmalarını takiben elde edilen bitüm-epoksi karışımının 150°C'deki etüvde 1 saat süreyle bekletilmesinden oluşmaktadır. Epoksi reçinesinin bitümde oluşturduğu değişimler viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, DSR, DSC, RTFOT, PAV, BBR ve yüzey gerilmesi testleri ile; orijinal bitüm-agrega ve modifiye bitüm-agrega karışımlarının adezyon ve stabilitesi Nicholson soyulma ve Marshall testleriyle değerlendirilmiştir. Bitüm modifikasyonunun Marshall stabilitesinde %15'e varan artışlar sağladığı gözlenmiştir. Çalışmada, katkı maddesi için optimum dozajın %2 olduğu belirtilerek bitüme epoksi reçinesi eklenmesiyle tekerlek izinde, kumada, soyulmada ve çatlamada fark edilebilir bir azalmanın elde edilebileceği ifade edilmiştir [33].

Chen ve Xu tarafından yapılan çalışmada bitüm modifikasyonunda beş farklı tip fiber (2 polyester fiber, 1 poliakrilonitril fiber, 1 lignin fiber ve 1 asbest fiber) kullanılmış ve yapılan testlerin sonuçlarına göre fiber modifikasyonu ile bitümün tekerlek izi ve akmaya karşı direnci ile dinamik kesme modülünün önemli ölçüde iyileşebildiği belirtilmiştir [34].

Haddadi ve ark. tarafından yapılan çalışmada bitümlü karışım performansı üzerinde EVA (Etilen Vinil Asetat) modifikasyonu ve modifikasyon prosesinin etkileri araştırılmıştır. Değişik EVA konsantrasyonları (bitüm ağırlığının %3'ü, %5'i ve %7'si) ya 80/100 penetrasyon dereceli bitüme (modifikasyon 4 saat süreyle 180°C'de gerçekleştirilmiştir) ya da bitümlü sıcak karışım imalat sürecinde agrega-bitüm karışımına ilave edilmiştir. Yumuşama noktası, penetrasyon ve Frass kırılma sıcaklığı testleriyle EVA modifikasyonunun bitümlerin rijitliklerinde ve termal dirençlerinde artma meydana getirdiği görülmüştür. Saf bitüm-agrega karışımı, modifiye bitüm-agrega karışımı ve saf bitüm-agrega-EVA'nın aynı anda karışımı olmak üzere üç tipte imal edilen bitümlü sıcak karışımla hazırlanan numunelere Marshall testi uygulanmış ve EVA modifikasyonu ile stabilite değerlerinde önemli artışların meydana geldiği görülmüştür. Çalışma kapsamında incelenen EVA konsantrasyonları

içinde bitüme %5 oranında EVA katıldığında daha yüksek rijitlik ve kalıcı deformasyon direnci elde edildiği belirtilmiştir [35].

Şengöz ve Işıkyakar tarafından yapılan çalışmada 50/70 penetrasyon dereceli bitüme SBS (Stiren–Bütadien–Stiren) ve EVA (Etilen Vinil Asetat) polimerlerinin değişik oranlarda katılmasıyla bitümde meydana gelen değişimler geleneksel ve ampirik test metodları ve mikroskop ile büyütülmüş görüntüleme kullanılarak incelenmiş, aynı zamanda SBS ve EVA modifikasyonlu bitümle imal edilen sıcak karışım özellikleri analiz edilmiş ve katkı maddesi içermeyen bitümlü sıcak karışım özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Bitümün SBS ve EVA polimerleriyle modifikasyon işlemi 185°C’de 2 saat süreyle karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre modifiye bitümlerin morfolojisi ve özellikleri ile birlikte polimer modifiyeli bitüm içeren sıcak karışımların mekaniksel özelliklerinin polimer cinsi ve miktarına bağlı olduğu, düşük miktarda polimer içeriklerinde numunelerde sürekli bitüm fazında yayılmış olarak polimer parçacıkları ihtiva edilirken yüksek miktarda polimer içeriklerinde sürekli polimer fazının gözlemlendiği belirtilmiştir. Polimer modifikasyonunun penetrasyon, yumuşama noktası, sıcaklık hassasiyeti gibi bitümün geleneksel özelliklerini iyileştirdiği ayrıca SBS modifikasyonlu bitümle imal edilen sıcak karışımların mekaniksel özelliklerinde (örn. Marshall stabilitesi) polimer içeriği çoğaldıkça artış meydana geldiği ifade edilmiştir [36].

Jun ve ark. tarafından yapılan çalışmada bitüm, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve GMA (Glisidil metakrilat) aşılınmış LDPE ile modifiye edilmiş ve modifikasyonda polimer içeriği değiştirildiğinde modifiye bitümün yumuşama noktası, düşük sıcaklıkta duktilite, penetrasyon indeksi ve yüksek sıcaklıkta depolanma kararlılığı gibi özelliklerinin değiştiği belirtilmiştir. Belirtilen katkı maddeleri ağırlıkça %3, %4, %5, %6 oranlarında ilave edilmiş ve modifikasyon işlemi 170°C’de gerçekleştirilmiştir. DSR (Dinamik Kesme Reometre) ve BBR (Eğilme Kirişi Reometre) test sonuçlarına göre GMA aşılı LDPE ile modifiye edilmiş bitümün LDPE ile modifiye edilmiş bitüme göre

yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direnci, yorulma ve düşük sıcaklıkta çatlama direnci bakımından daha üstün performans gösterdiği ifade edilmiştir. Aynı testler ışığında, modifiyesiz bitümün tekerlek izi direncinin modifikasyon ile (LDPE ile veya GMA aşıllı LDPE ile) arttığı; ancak LDPE modifikasyonunun bitümün düşük sıcaklıkta çatlama karşı direncinde azalma oluşturduğu görülmüştür [37].

Cao tarafından yapılan çalışmada bitümlü karışımların özelliklerini geliştirmek ve atık araç lastiği kirliliğini en aza indirmek için araç lastiklerinin yeniden işlenip kullanılabilir hale getirilmesiyle elde edilen kauçukla modifiye edilmiş bitümlü karışımların özellikleri laboratuvar ortamında araştırılmıştır. Kauçuk, öncelikle agrega karışımına eklenmiş ve elde edilen agrega-kauçuk karışımı daha sonra bitüm ile karıştırılmıştır. Çalışmada üç farklı oranda kauçuk içeren (toplam karışım ağırlığının %1, %2 ve %3'ü) üç tip bitümlü karışım ve kauçuk içermeyen kontrol karışımı testlere tabii tutulmuştur. Tekerlek izi testleri (60°C'de), İndirekt Çekme testleri (-10°C'de) ve varyans analiz sonuçlarına göre, bitümlü karışımlara atık araç lastiklerinden elde edilen kauçuk eklenmesinin karışımların mühendislik özelliklerini iyileştirebileceği ve kauçuk miktarının yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyon direnci ve düşük sıcaklıkta çatlama direnci üzerinde önemli etkisinin olduğu belirtilmiştir [27].

Lee ve ark. tarafından yapılan çalışmada bitüm modifiyeri olarak kırıntı formulu kauçuk parçacıkları kullanılmış ve bu şekilde bitümün doğasında var olan sıcaklık hassasiyetinin azaltılarak bitüm özelliklerinin geliştirilmesi tasarlanmıştır. Modifikasyon işlemi 177°C'de 30 dakika süresince dakikada 700 devir yapan mikser ile gerçekleştirilmiş ve bu şekilde elde edilen kırıntı formulu kauçuk modifikasyonlu bitümlerde viskozite artışı görülmüştür. Çalışmada 24 farklı modifiye bitüm (3 farklı bitüm kaynağı + 2 farklı modifiye bitüm üretim metodu + 4 farklı kauçuk oranı: %5, %10, %15, %20) üretilmiş ve hızlandırılmış yaşlanma prosesiyle yapay olarak yaşlandırılmıştır. Kauçuk parçacıklarıyla modifiye edilmiş bitümlerin değerlendirilmesi; yüksek sıcaklıkta viskozite, yüksek ve ara sıcaklıklarda performans özellikleri, düşük

sıcaklıkta çatlama özellikleriyle gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarının, bitüme daha yüksek oranda kauçuk eklendiğinde daha yüksek viskozite, daha iyi tekerlek izi direnci ve daha az düşük sıcaklık çatlağı oluşum ihtimali olduğunu ortaya koyduğu belirtilmiştir [38].

Tayfur ve ark. tarafından yapılan çalışmada modifiyesiz ve beş farklı katkı maddesiyle modifiye edilmiş (Amorf polialfaolefin, selüloz fiber, poliolefin, bitümlü selüloz, fiber ve SBS) bitümlü karışımlarda kalıcı deformasyon (tekerlek izi) direnci araştırılmıştır. Farklı yükleme şartları ve sıcaklıklarında indirek çekme dayanımı, indirek çekme, statik ve tekrarlı sünme ve LCPC tekerlek izi testleri uygulanmış ve araştırma LCPC tekerlek izi ile diğer mekanik testler arasındaki etkileşimi karşılaştırmaya odaklanmıştır. LCPC tekerlek izi ve tekrarlı sünme test sonuçlarına göre incelenen bitümlü karışımlar içinde SBS içerenlerin tekerlek izine karşı en dayanıklı karışımlar olduğu, ayrıca modifiyesiz karışımlara göre tüm modifiyeli karışımların kalıcı deformasyona karşı daha dirençli oldukları belirtilmiştir. Bununla beraber, modifiyesiz karışımlar statik sünme testinde daha iyi sonuçlar gösterse de bu durumun yükün statik davranışı ve bitüm reolojisinin modifiyerlerle değişmesinden kaynaklandığının düşünüldüğü ifade edilmiştir [39].

Edwards ve ark. tarafından iki farklı yayınlarda bildirilen çalışmada üç farklı tipteki (farklı kimyasal kompozisyonlara sahip) 160/220 penetrasyon dereceli bitüm polifosforik asit ve ticari olarak satın alınabilen üç farklı balmumu (vaks) ile modifiye edilmiştir. Modifikasyonun bitümde oluşturduğu değişimler DSR, BBR, DSC, FD gibi değişik laboratuvar cihazları ile uygulanan testler ve penetrasyon, yumuşama noktası ve Frass kırılma noktası gibi geleneksel bitüm testleriyle değerlendirilmiştir. Yayınların ilkinde bitümlü sıcak karışımla imal edilen kaplamalarda düşük sıcaklığın oluşturduğu etkiler, ikincisinde ise aynı tür kaplamaların orta ve yüksek hizmet sıcaklıklarında tekerlek izi performansı incelenmiştir. İki yayında belirtilen test sonuçlarına göre, özellikle vaks içermeyen bitüme polietilen vaks veya polifosforik asit eklenmesinin bitümün reolojik davranışı üzerinde orta ve yüksek sıcaklıklarda önemli pozitif

etkiler, düşük sıcaklıklarda ise bazı pozitif etkiler oluşturduğu belirtilmiştir [40, 41].

Aksoy ve ark. tarafından yapılan çalışmada bitümlü karışımlarda sudan (rutubet) dolayı oluşan hasar üzerinde dört farklı katkı maddesinin (Wetfix I, Lilamin VP 75P, Chemcrete, Kauçuk) etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 60/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmış ve karışımların mekanik özellikleri Marshall, İndirek çekme ve Lottman testleriyle değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan test sonuçlarına göre kullanılan katkı maddelerinin soyulma direncinde önemli artışlar sağladığı, katkı maddelerinin bitüme eklenmesiyle Marshall stabilite ve indirek çekme dayanım değerlerinde artış görüldüğü ve yine katkı maddeleriyle bitümlü karışımlarda sudan dolayı oluşan hasar seviyesinin azaldığı belirtilmiştir [42].

Abo-Qudais ve Al-Shweily tarafından yapılan çalışmada ortam koşullarına bağlı oluşan hasarların (soyulmanın) bitümlü sıcak karışımların sünme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında iki farklı bitüm (60/70 penetrasyonlu ve 80/100 penetrasyonlu), üç farklı agrega gradasyonu ve iki farklı soyulma önleyici katkı maddesi (kireçtaşı tozu ve kalsiyum stearat hidroksit) kullanılmıştır. Katkı maddelerinin test numunelerine eklenme sürecinde kireçtaşı tozu öncelikle agrega karışımına, kalsiyum stearat hidroksit ise öncelikle bitüme ilave edilmiştir. Çalışma bulgularında, katkı maddelerinin sünme davranışı ve soyulmayı azaltmada önemli etki gösterdikleri belirlenmiştir. Aynı zamanda kullanılan katkı maddeleri içinde kalsiyum stearat hidroksit içeren karışımlarda kireçtaşı tozu içerenlere göre daha az soyulma ve sünme deformasyonu olduğu görülmüştür [43].

Gonzalez ve ark. tarafından yapılan çalışmada 60/70 penetrasyon dereceli bitümün EVA ile modifikasyonuyla viskoelastik özelliklerinde iyileşme olduğu, düşük sıcaklıklarda çatlama ve yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi riskinin azaldığı belirtilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan 60/70 penetrasyonlu bitümün modifikasyonunda ağırlıkça %1 ve %3 oranlarında EVA kullanılmış

ve modifikasyon işlemi 180°C'de 6 saat süreyle dakikada 1800 dönüş yapan mekanik karıştırıcıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde bitümün %1 oranında EVA ile modifiye edilmesiyle elde edilen bitümün performansının iyileştiği ifade edilmiştir [44].

Gürü tarafından yapılan çalışmada manganabietat bileşiğinin bitümün adezyon yeteneği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırma 4 farklı bitüm ve 6 farklı agrega (4'ü kireçtaşı, 2'si bazalt türü agrega) ile gerçekleştirilmiştir. Orijinal ve farklı oranlarda katkı maddesi içeren modifiye bitümlere penetrasyon, viskozite, duktilite ve yumuşama noktası testleri uygulanmıştır. Nicholson soyulma testi, İndirekt çekme dayanımı ve Marshall testleriyle de modifikasyonun karışım özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Test sonuçlarına göre her iki türde (kireçtaşı ve bazalt) agrega kullanımında da katkı maddesi ile soyulma direncinin artırıldığı belirtilmiştir [45].

Navarro ve ark. tarafından kauçuk modifikasyonlu bitümün doğrusal viskoelastik özellikleri incelenmiş ve modifikasyonla elde edilen viskoelastik davranış katkısız ve SBS katkılı bitümlerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada katkısız bitüm, beş adet kauçuk katkılı ve üç adet SBS katkılı bitüm incelenmiştir. Bitümün modifikasyon işlemi 1,5 saat süreyle 180°C'de gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda kauçuk katkılı bitümlerin katkısız bitüme göre daha yüksek viskoziteye sahip olduğu, bu yüzden tekerlek izi ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı daha yüksek direnç göstermelerinin umulması gerektiği belirtilmiştir [46].

Metcalf ve ark. tarafından yapılan çalışmada atık EPDM'nin (Etilen Propilen Diene Monomer) bitümde modifiyer olarak kullanılma potansiyeli araştırılmış ve bu amaçla EPDM modifikasyonlu (modifikasyon 175°C'de gerçekleştirilmiştir) bitümle imal edilen bitümlü sıcak karışımların mühendislik özellikleri ve su (rutubet) hassasiyeti değerlendirilmiştir. Yapılan testlerin

sonuçlarına göre atık EPDM'nin bitüm modifiyeri olma potansiyelinin bulunduğu belirtilmiştir [47].

4. ESNEK ÜSTYAPILAR

Karayolu ulaşımında esnek üstyapıların kullanımı ülkemizde ve dünyada oldukça yaygındır. Değişik trafik hacimlerine ve kompozisyonlarına yeterli seviyede hizmet verebilecek birçok esnek üstyapı uygulaması mevcuttur. Esnek üstyapılar, genel olarak, düşük standartlı ve yüksek standartlı olmak üzere iki tipte inşaa edilmektedirler. Trafik hacminin düşük olduğu ve ağır taşıtların bulunmadığı veya çok az bulunduğu kesimlerde gerek yapım kolaylığı gerekse ilk yatırım maliyetinin nispeten az olmasından dolayı düşük standartlı esnek üstyapılar tercih edilmektedir. Trafik hacminin artması ve bu hacim içindeki ağır taşıt oranının belli seviyelere ulaşması durumunda ise yüksek standartlı esnek üstyapıların tercih edilmesi kaçınılmaz olmaktadır. Bu bölümde esnek üstyapı tipleri (düşük ve yüksek standartlı), yüksek standartlı esnek üstyapı imalatında kullanılan bitümlü sıcak karışımlara ait özellikler ve yüksek standartlı esnek üstyapılarda çeşitli nedenlerle oluşan bozulmalar incelenecektir.

4.1. Düşük Standartlı Esnek Üstyapılar

Kaynaklar sınırsız değildir ve bu durum üstyapı inşaatı için de geçerlidir. Yani herhangi bir yol kesiminde inşaa edilecek üstyapı tipinin seçilmesinde o kesimi kullanacak trafik kompozisyonunun ihtiyaçları ile birlikte bütçe, personel, malzeme ve ekipmandaki sınırlılıklar da etkili olabilmektedir. Düşük standartlı esnek üstyapılar trafik hacminin nispeten düşük olduğu yollarda kaynak kullanımı bakımından daha ekonomik çözümler sağlayabilmektedir.

Düşük standartlı esnek üstyapılar; sathi kaplamalar (tek tabakalı, çift tabakalı), makadam temeller (penetrasyon makadam, bitümlü makadam, suyla kaynatılmış makadam) ve koruyucu satıh tabakaları (çok farklı türde uygulamaları mevcuttur) olmak üzere farklı özelliklere sahip değişik tiplerde inşaa edilebilmektedirler [4].

Suyla kaynatılmış makadam temel haricinde yukarıda belirtilen düşük standartlı esnek üstyapılar belirli fiziksel özelliklere ve gradasyona sahip agrega grubu ve bitümün değişik şartlarda karıştırıldıktan sonra yolda sıkıştırılmalarıyla elde edilmektedir.

Ülkemizde sathi kaplamaların dışında kalan düşük standartlı esnek üstyapıların kullanımı yaygın olmamakla birlikte birçok çeşidi olan koruyucu satıh tabakaları daha çok esnek üstyapıların onarım işlerinde kullanılmaktadır [4].

KGM'nin sorumluluğunda bulunan karayolu ağı içinde sathi kaplama uygulaması önemli bir yer tutar. KGM'nin 2010 yılı itibarıyla sorumluluğundaki 64255 km'lik yol ağının 49782 km'lik bölümünü oluşturmaktadır. Düşük standartlı esnek üstyapı olan sathi kapmalar, devlet ve il yollarında yoğun olarak kullanılmakta olup otoyollarda ise kullanılmamaktadır.

Sathi kaplamaların inşaatı oldukça basittir. Bir temel tabakası üzerine bitüm uygulanmasından sonra belirli gradasyona sahip agrega grubunun serilip sıkıştırılmasıyla elde edilirler. Tek katlı veya çift katlı olarak yapılabilirler.

Sathi kaplamalar kolayca inşaa edilerek üstyapı üzerinde koruyucu bir yüzey oluştururlar ve kullanımları sürecinde üstyapıya ve sürücülere önemli özellikler sağlarlar. Bunlar [4];

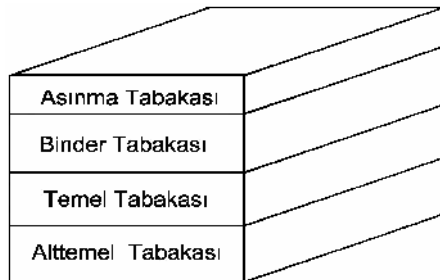
- Kaplamayla tekerlek arasında oluşan sürtünmenin fazla olmasından dolayı kaymaya karşı daha dirençli yüzeyler oluşturmaları,
- Temel tabakasını trafiğin bozucu etkilerinden korumaları,
- Üstyapı üzerinde su geçirmeyen bir yüzey oluşturarak temel tabakasının stabilitesini arttırmaları,
- Düzgün yüzeyler halinde olmaları sürüş konforunun artırılmasını sağlamaları

olarak belirtilebilir. Ancak bunların yanında bitümlü sıcak karışımlarla hazırlanan yüksek standartlı esnek üstyapılara göre aşağıda belirtilen dezavantajları bulunmaktadır [4];

- Tekerlek gürültüsü yüksektir. Bu durum sürüş konforunu azaltır.
- Yüzeyde sürtünme kuvvetinin yüksek olması taşıt işletme giderlerini artırır.
- Sökülme daha fazla oluşmaktadır. Sökülen agregaların sıçraması araçlara hasar vermekle birlikte trafik güvenliğini de olumsuz etkilemektedir.
- Bakım-onarım ihtiyaçlarının daha fazla olması rutin bakım-onarım masraflarını yükseltmektedir.
- Kaplamanın yenilenme periyotları kısadır.
- Taşıma gücü yoktur. Bu yüzden ağır taşıt trafiği yüksek olan yollarda çok çabuk bozulmaktadırlar.

4.2. Yüksek Standartlı Esnek Üstyapılar

Yüksek standartlı esnek üstyapılar; belli özelliklere sahip bir taban zemini üzerine sırasıyla alttemel, temel ve kaplama tabakalarının inşaa edilmesiyle yapılan çok tabakalı yapılardır. Her bir tabaka değişik özellikte olup farklı boyut dağılımına sahip agrega grubunun bitümlü veya bitümsüz olarak yola serilip sıkıştırılmasıyla imal edilir. Yüksek standartlı esnek üstyapılara ait tipik bir enkesit Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Yüksek standartlı esnek üstyapılara ait tipik enkesit

Alttemel tabakası bitüm kullanılmadan imal edilir. Bu tabaka, agreganın optimum su içeriğinde karıştırılıp yolda serilip sıkıştırılmasıyla yapılmaktadır. Alt temel tabakasında diğer tabakalara göre daha büyük boyutlu agregalar kullanılır.

Temel tabakası; granüler temel tabakası, plent-miks temel tabakası ve çimento bağlayıcılı temel tabakası olmak üzere üç farklı tipte yapılabilmektedir. Granüler temel tabakası ve plent-miks temel tabakasında bağlayıcı malzeme kullanılmaz. Bu üç tipten başka, kaplama tabakalarının hemen altında kullanılan ve agregalar ve bitümün plentte karıştırılması ve yolda serilip sıkıştırılmasıyla elde edilen bitümlü temel tabakası uygulamaları da mevcuttur. Yüksek standartlı esnek üstyapıda temel tabakası olarak bu tabaka tiplerinden biri veya gerekli hallerde birden fazlası bir arada kullanılabilmektedir.

Alttemel ve temel tabakaları, genel olarak, belirli fiziksel özelliklere ve boyut dağılımına sahip agregalar grubunun yolda veya plentte, bitümsüz veya bitümlü olarak karıştırılıp yola serilip sıkıştırılmasıyla imal edilmektedir. Ana işlevleri [4];

- Kaplamadan intikal eden yükleri zemine yaymak
- Donun zararlı etkilerini önlemek
- Drenaj
- Kapsama inşaatı için düzgün platform oluşturmak
- Uzun dönemli oturmalarda esnek bir yapı oluşturmak

olarak sayılabilir.

Aşınma tabakası ve binder tabakası yüksek standartlı esnek üstyapıların kaplama tabakalarını oluşturur. Aşınma tabakası üstyapının en üstündeki tabaka olup binder tabakası onun altında yer alır. Bu tabakalar, plentte

yüksek sıcaklıkta hazırlanan agrega-bitüm karışımlarının (bitümlü sıcak karışımlar) uygun şartlarda yola serilip sıkıştırılmasıyla hazırlanırlar. Üstyapıda bulundukları konumdan dolayı trafiğin, iklimin ve çevrenin etkilerine daha çok maruz kalırlar. Bu yüzden temel ve alt temel tabakalarına göre daha üstün özelliklere sahip olarak imal edilmektedirler.

4.3. Bitümlü Sıcak Karışımlar

Bitümlü sıcak karışımlar, belirli bir gradasyona sahip agrega ile uygun miktarda bitümün plentte yüksek sıcaklıkta karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarının imalatında bitümlü sıcak karışımlar kullanılır. Bu tabakaların hizmet süresi boyunca sağlayacakları performans büyük oranda bitümlü sıcak karışımların sahip olduğu özelliklerle ilişkilidir. Bu bölümde bitümlü sıcak karışımların özellikleri ana hatlarıyla incelenecektir.

4.3.1. Stabilite

Üstyapılar, araçların ağırlıkları ve hızlarına bağlı olarak değişik büyüklükte ve etkiye süreleri farklı olan çeşitli yüklemelere maruz kalmaktadırlar. Stabilite, bitümlü sıcak karışımlardan imal edilen yol kaplamalarının trafik yüklemesi altında oluşacak deformasyonlara karşı koyma yeteneği olarak tarif edilebilmektedir. Bitümlü sıcak karışımın stabilitesinin düşük olması kaplamada oluşabilecek deformasyon miktarının artmasına neden olmaktadır. Stabilitenin artmasıyla deformasyon miktarı azalır; ancak stabilitenin çok yüksek olması da arzu edilen bir durum değildir. Çünkü stabilitenin çok yüksek olduğu durumlarda kaplamanın yükleme etkilerine karşı yeterince esnek davranış sergileyememesi çatlamaların oluşmasına sebep olabilmektedir [4, 48].

Bitümlü sıcak karışımların stabilitesine etki eden hususlardan biri olan karışımın kayma mukavemeti Eş. 4.1'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (4.1)$$

Burada;

- τ Bitümlü sıcak karışımın kayma mukavemeti
- c Kohezyon
- ϕ İçsel sürtünme açısı

Eş. 4.1’de kullanılan içsel sürtünme açısı agrega daneleri arasındaki sürtünmeden ve kilitlenmeden kaynaklanır. Kohezyon ise agrega ile bitüm arasındaki adezyon kuvvetinin büyüklüğüyle ilgilidir. Yani, karışım içerisinde içsel sürtünmeyi agrega, kohezyonu ise bitüm sağlamaktadır [4].

Bitümlü sıcak karışımların stabilitesine etki eden diğer bir husus sıcaklıktır. Bu husus bitümlü sıcak karışımın maruz kaldığı iki ayrı sıcaklık bakımından incelenebilir. Birincisi, agrega ile bitümün plantteki karıştırma sıcaklığıdır. Bu sıcaklık arttıkça bitümün viskozluğu azalır ve agregayı daha kolay sarar. Aynı zamanda viskozluğu azalan bitümün agrega yapısında bulunan boşluklara daha fazla penetre etmesiyle agreganın bitüm absorpsiyonu artacağından adezyon da artar. Bunlara bağlı olarak daha yüksek stabilite elde edilebilir. Ancak artan karıştırma sıcaklığı ile bitümde istenmeyen durum olan yaşlanmanın da artacağı ve yaşlanan bitümün özelliklerinin kötüleşeceği unutulmamalıdır. Üstyapının hizmet verdiği süreçte maruz kaldığı sıcaklık ise değerlendirilmesi gereken diğer bir durumdur. İklimsel koşullara bağlı olarak üstyapının hizmet verdiği sıcaklık yükseldikçe karışımda bulunan bitümün viskozluğu azalacak ve buna bağlı olarak karışımın deformasyon direnci de azalacaktır. Yüksek hava sıcaklığı, üstyapıda tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonların oluşumunda oldukça önemli bir faktördür. Düşük hizmet sıcaklıklarında ise bitümün viskozluğu artacak yani fiziksel olarak sertleşecektir. Böylece stabilite artacak ve buna bağlı olarak kaplama kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olacaktır. Ancak yüksek hizmet

sıcaklıklarında olduğu gibi düşük hizmet sıcaklıklarında da sorunlar oluşabilmektedir. Bitümde düşük sıcaklıkların yol açtığı aşırı sertleşme, trafik yükleri sebebiyle kaplamanın yeteri kadar esnek davranış sergilemesini engelleyebilmekte ve bu durum kaplamada çatlaklar oluşmasına neden olabilmektedir.

4.3.2. Rijitlik

Bitümlü sıcak karışımların rijitliği, belli bir yükleme altında oluşan deformasyon ile ilgilidir. Rijitliği yüksek olan karışımların yük uygulandığında göstereceği deformasyon miktarı, aynı şartlar altında yüklenen daha düşük rijitliğe sahip karışımlara göre daha azdır.

Bitümlü sıcak karışımların rijitliği sabit olmayıp başlıca yükleme süresi ve yükleme sıcaklığından etkilenir. Yükleme süresi ve sıcaklığı arttıkça karışımın rijitliği azalmaktadır.

Bitümlü karışımlarda iki farklı rijitlik mevcuttur. Bunlar, düşük sıcaklıklar ve kısa yükleme süreleri altında elastik rijitlik ve yüksek sıcaklıklar ile uzun yükleme süreleri koşullarındaki viskoz rijitliktir. Elastik rijitlik, üstyapının tasarım aşamasında kritik şekil değiştirme değerlerinin hesaplanmasında kullanılırken viskoz rijitlik malzemenin deformasyon direncinin (özellikle kalıcı deformasyona karşı) ölçülmesinde kullanılmaktadır [6].

Üstyapıda oluşan tekerlek izi derinliği ile bitümlü karışımın rijitliği ters orantılı olup aralarındaki ilişki Shell üstyapı tasarım kitapçığında Eş. 4.2'de görüldüğü gibi belirtilmiştir [6];

$$\text{Tekerlek izi derinliği} = C_m \cdot x \cdot h \cdot \frac{\sigma_{ort}}{S_{kar}} \quad (4.2)$$

Burada;

C_m ampirik korelasyon katsayısı

h tabaka kalınlığı

σ_{ort} ortalama gerilme kuvveti

S_{kar} bitümlü karışımın rijitliği

Üstyapıda oluşan tekerlek izi derinliği, Eş. 4.2'nin üstyapıda bulunan tüm tabakalara ayrı ayrı uygulanıp elde edilen miktarların toplanması suretiyle hesaplanmaktadır.

Eş. 4.2'den anlaşılabileceği üzere karışımın rijitliği arttıkça üstyapıda oluşan tekerlek izi derinliği azalmakta yani üstyapının tekerlek izi oluşumuna karşı direnci artmaktadır.

4.3.3. Durabilite (Dayanıklılık)

Esnek üstyapıların kaplama tabakaları bitümlü sıcak karışımlarla imal edilmektedir. Bitümlü sıcak karışım, sahip olduğu başlangıç stabilitesini zaman içinde de koruması durumunda üstyapı; trafik, iklim ve çevresel etkilere karşı yeterli direnci sağlayabilir. Kısaca; bitümlü sıcak karışımların durabilitesi, sahip oldukları stabiliteyi hizmet ömrü boyunca devam ettirebilme yeteneği olarak tarif edilebilir. Bitümlü sıcak karışımların yeterli durabiliteye sahip olabilmesi için aşağıdaki hususlara yeterli derecede dikkat edilmesi gerekir;

- Agrega ve bitüm en az şartnamelerce belirtilen fiziksel özelliklere sahip olmalıdır.
- Agreganın kuru olmasına ve yüzeyinde toz bulunmamasına dikkat edilerek bitüm ile yeterli adezyonu sağlanmalıdır. Adezyonun iyileştirilmesiyle karışımın soyulma direnci de arttırılmış olmaktadır.

- Agrega ile bitümün plentteki karışımları uygun oranlarda ve uygun sıcaklıkta yapılmalıdır.
- Karışımın yolda serme ve sıkıştırma sıcaklıklarına gerekli itina gösterilip yeterli sıkışma sağlanmalıdır.

Yukarıda belirtilenler ışığında; kaliteli malzeme kullanımının, uygun tasarım ve uygun imalatın (plentte ve yolda) yüksek durabilite elde edebilmek için gerekli olduğu anlaşılmaktadır.

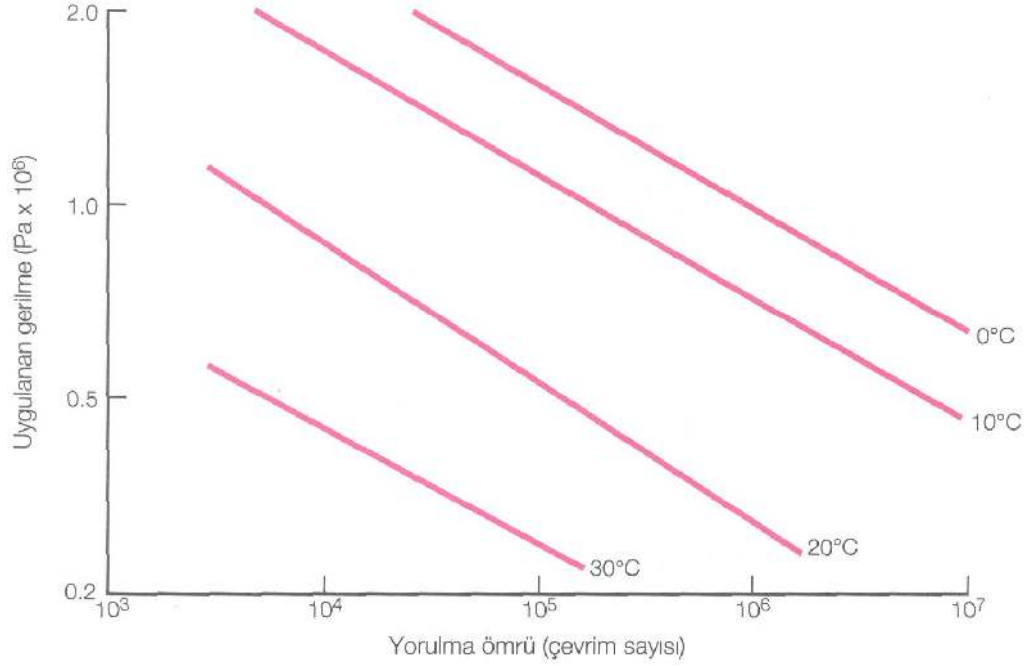
4.3.4. Yorulma mukavemeti

Bitümlü sıcak karışımların yorulma mukavemeti, çeşitli yüklemeler etkisindeki üstyapının, çatlamayıp, kalıcı olmayan deformasyon oluşturabilme yeteneği olarak tanımlanabilir [4].

Yorulma çatlağı esnek üstyapılarda sıkça görülen bir bozulma türüdür. Üstyapıyı kullanan araçların ağırlıklarından kaynaklanan yüklerin yeter sayıda tekerrür etmesinden sonra meydana gelmektedir.

Şekil 4.2’de aynı özelliklere sahip karışımlara sabit gerilme kuvveti uygulanarak farklı sıcaklıklarda yorulma ömürlerinde meydana gelen değişimler görülmektedir.

Bitüm içeren tabakalar trafik yükleri altında sürekli olarak esnerler. Karışımın rijitliği ve üstyapı tabakalarının kalınlığı, esnemedi dolay oluşan şekil değiştirmelerin büyüklüğünü etkiler [6]. Şekil 4.2 incelendiğinde aynı özelliklere sahip karışımlara 0°C, 10°C, 20°C ve 30°C’de sabit gerilme kuvveti uygulandığında yorulma ömürlerinin (uygulanan yükün tekrar sayısı) sıcaklığın azalmasıyla arttığı görülmektedir. Sıcaklıktaki azalma ile bitümlü karışımın hem rijitliği hem de yorulma ömrü yani yorulma mukavemeti artmaktadır.



Şekil 4.2. Bitümlü karışımlarda yük ve yorulma ömrü arasındaki sıcaklığa bağlı ilişki [6]

Bitümlü sıcak karışımların yukarıda belirtilen özelliklerinden başka zemin, temel ve alttemel tabakalarında oluşan çökmelere uyum göstererek kaplamada bu yüzden oluşacak çatlamların azalmasını sağlayan esneklik (fleksibilite) özelliği, hava ve suyun kaplama içine girmesinin/içinden geçmesinin ölçüsü olan geçirimsizlik özelliği, kaplamanın yüzey pürüzlülüğüyle ilişkili olan kayma direnci özelliği ve karışımın yola serilmesi ve sıkıştırılmasındaki kolaylığın göstergesi olan işlenebilirlik özelliği de mevcuttur.

Bitümlü sıcak karışımlara ait yukarıda açıklanan tüm bu özelliklerin aynı anda sağlanması mümkün değildir. Belirtilen özellikleri, kaplamanın kullanım amacı doğrultusunda optimum düzeyde sağlayan bitümlü sıcak karışımların kaplama tabakalarında kullanılmasıyla üstyapının hizmet ömrü boyunca göstereceği performansın artırılabilmesi mümkündür.

4.4. Esnek Üstyapılarda Meydana Gelen Bozulmalar

Esnek üstyapılar için tasarım-imalat-malzeme kalitesi oldukça önemlidir ve üstyapının performansı bu hususlarda sağlanan yeterlilik dereceleri ile yakından ilişkilidir. Başka bir deyişle; üstyapı, hizmet vereceği şartlara göre tasarlanmalı, imalat aşamasında (plentte ve yolda) gerekli şartlar sağlanmalı ve kullanılan malzeme yeterli özelliklere sahip olmalıdır. Aksi halde hizmete açıldıktan kısa bir süre sonra trafik, iklim ve çevresel etkiler neticesinde üstyapılarda bazı bozulmalar oluşabilmektedir.

Hizmete açıldıktan sonra esnek üstyapılarda meydana gelen bozulmaların deformasyonlar, ayrışmalar ve çatlaklar olmak üzere üç grupta toplanması mümkündür. Deformasyonlar, üstyapıda farklı şekil ve boyutlarda oluşabilen kalıcı şekil değiştirmelerdir. Tekerlek izleri, üniform olmayan yüzey bozuklukları, bölgesel çökmeler (oturma), ondülasyonlar (dalgalanmalar veya yığılmalar), kabarmalar ve lastik deseni esnek üstyapılarda görülen deformasyon tipi kusurlardandır. Ayrışmalar, çeşitli etkiler sebebiyle aşınma tabakasındaki agrega danelerinin kopmasıyla oluşur. Çukurlar, sökülmeler (parça veya tabaka halinde) ve kaygan yüzeyler bu tip kusurlardandır. Çatlaklar, kaplamalarda trafik, çevre ve iklim etkileriyle oluşmaktadır ve çeşitli şekillerde, genişlikte ve derinlikte olabilmektedir. Çatlaklar genel olarak; stabilite çatlakları, yorulma çatlakları ve yansıma çatlakları olarak sınıflandırılır. Esnek kaplamalarda görülen timsah sırtı çatlaklar (yorulma ve stabilite tipi çatlaklar), kenar çatlakları, ek yerleri (derz) çatlakları, kayma (ötelenme) çatlakları, büzülme çatlakları, enine çatlaklar, yansıma çatlakları bu tip kusurları oluşturmaktadır. Bunlarla birlikte, düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklar esnek kaplamalarda görülen bir diğer çatlama tipi bozulmadır. Bu tip bozulmanın oluşmasında bölgenin iklimsel yapısı oldukça önemli olup düşük hava sıcaklıklarında kaplamalarda meydana gelen büzülmelerden kaynaklanmaktadır [4]. Üstyapıda, belirtilen bu bozulmalardan herhangi birinin veya bir kaçının olduğu belirlendikten sonra mümkün olduğu kadar kısa sürede bozulmayı meydana getiren sebebin/sebeplerin ortadan

kaldırılması ve meydana gelen bozulmanın/bozulmaların onarılması gerekir. Aksi halde trafik, iklim ve çevresel etkilerle oluşan bozulmalar daha da artarak ve başka tür bozulmaların oluşmasına sebep olarak üstyapının kullanılamaz hale gelmesine yol açabilmektedirler.

Tekerlek izi ve düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklar, esnek üstyapılarda görülen önemli bozulmalar arasındadır. Bu iki bozulmanın oluşumunda da sıcaklık faktörünün önemli etkisi bulunmaktadır. Tekerlek izi daha ziyade hava sıcaklığının yüksek olduğu bölgelerde ve ağır taşıt trafiğinin hakim olduğu yol kesimlerinde görülen bir bozulma türüdür. Üstyapıda kullanılan bitümün yüksek hizmet sıcaklıklarındaki davranış özellikleri tekerlek izi oluşumlarında oldukça etkilidir. Ayrıca, tasarım ve yapım aşamalarındaki hatalar da tekerlek izine yol açabilmektedir. Tasarım ve yapım hatalarının ortadan kaldırılması durumunda dahi yüksek hava sıcaklığı sebebiyle karışım stabilitesi azalmakta ve ağır taşıt trafiğinden kaynaklanan yüklemenin de etkisiyle malzemenin yer değiştirmesi şeklinde oluşan tekerlek izleri esnek üstyapılarda sıkça görülebilmektedir.

Resim 4.1’de tekerlek izi oluşmuş bir üstyapı kesimi görülmektedir. Üstyapıda tekerlek izi oluşumu sürüş konforunu ve emniyetini olumsuz yönde etkileyen bir bozulmadır.



Resim 4.1. Esnek üstyapıda oluşan tekerlek izi bozulması

Esnek üstyapılarda görülen diğer bir önemli bozulma türü düşük sıcaklıklarda oluşan çatlamlardır. Görsel olarak Resim 4.2’de sunulan bozulma, üstyapının hizmet verdiği düşük hava sıcaklıklarında (düşük hizmet sıcaklıkları) bitümün gösterdiği davranışla yakından ilgilidir. Bu tür bozulma, kaplama yüzeyi boyunca uzanan enine çatlaklar şeklindedir. Bitümün düşük hizmet sıcaklıklarında yeterince sünek davranış sergileyebilmesi durumunda bu tür bozulmanın oluşumu azalabilmektedir.



Resim 4.2. Esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda oluşan çatlamlar

Yukarıda belirtilen her iki bozulma türünde de karışımda kullanılan bitümün iklimsel etkiler altında gösterdiği davranış etkili olmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında çeşitli katkı maddeleri ile modifiye edilerek bitümün belirtilen bozulmalara karşı dirençli hale getirilmesine ve bu suretle esnek üstyapı performansının geliştirilmesine çalışılmıştır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yüksek standartlı esnek üstyapılar, ülke ekonomisi bakımından yüksek öneme sahip ve asli amacı iki önemli nokta arasındaki erişimin sağlanması olan yol kesimlerinde sahip oldukları özellikler ve sağladıkları imalat ve kullanım avantajlarına bağlı olarak tercih edilirler. Ülkemizde mevcut otoyolların tamamında ve trafik hacminin yoğun olduğu devlet yollarında yüksek standartlı esnek üstyapılar kullanılmaktadır. Bu tür üstyapılar, uygun kalitedeki malzeme ile belirli tasarım ve yapım şartları altında inşaa edilmelidirler. Aksi halde Bölüm 4.4'te belirtilen bozulmalar oluşabilmektedir. Ancak belirtilen hususlarda yeterli hassasiyet sağlansa dahi bu üstyapı türünde bazı bozulmaların oluşumu engellenememektedir. Bunlar arasında tekerlek izleri ve düşük hava sıcaklıklarında oluşan çatlaklar oldukça önemli bozulmalardır.

Tekerlek izleri, araç tekerleklerinin üstyapıya temas ettiği noktalardaki deformasyonlardır. Yeterli malzeme-tasarım-imalat kalitesine sahip yol kesimlerinde dahi yüksek hava sıcaklıklarında ağır araç trafiği etkisinde oluşabilirler. Üstyapıda tekerlek izi oluşumu bitümün yüksek sıcaklıklarda sergilediği özelliklerle ilişkilidir.

Düşük hava sıcaklıklarında oluşan çatlaklar ise büzülme sebebiyle kaplama yüzeyinde oluşurlar ve iklimsel etkilerle kaplama altına doğru ilerlerler. Bu tür bozulmaların oluşumu, bitümün soğuk havalarda sahip olduğu davranış özelliklerine bağlıdır.

Görüldüğü üzere her iki tür bozulma türünde de bitümün farklı sıcaklıklarda sergilediği davranış özellikleri tek veya en önemli faktörlerden birini oluşturmaktadır. Bitüm özellikleri farklı sıcaklıklara göre geliştirilebildiği takdirde esnek üstyapılarda bu iki bozulmanın oluşumu azaltılabilecektir.

Ülkemizde yüksek standartlı esnek üstyapıların yanı sıra sathi kaplama uygulamaları da dikkat çekmektedir. Bu tür kaplamalarda agrega ile bitüm arasındaki bağ kuvvetinin yetersizliğinden kaynaklanan sökülme sıkça oluşan bir bozulmadır. Bu bozulma, bitümün agrega ile bağ yapma yeteneği olan adezyon özelliğinin artırılmasıyla iyileştirilebilir özelliktedir.

Özellikleri geliştirilen bitüm kullanımı ile esnek üstyapıların bakım-onarım ihtiyacı ve maliyeti azaltılabilir ve daha uzun ömürlü olması sağlanabilir. Bu sebeple modifiye bitümler ile ilgili birçok çalışma mevcuttur ve gün geçtikçe bu konudaki araştırmalar artmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek standartlı esnek üstyapılarda meydana gelen tekerlek izi ve düşük sıcaklık çatlaklarının iyileştirilmesi ve bu suretle üstyapı performansının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, laboratuvar ortamında tarafımızca sentezlenen farklı katkı maddeleri kullanılarak bitüm modifiye edilmiştir. Modifikasyon işlemi ile bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan bitüm özelliklerinin iyileştirilmesine çalışılmıştır. Modifikasyon ile gerek bitümde gerekse bitüm-agrega karışımlarında meydana gelen değişimleri belirleyip değerlendirebilmek için çeşitli testler uygulanmıştır. Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzemeler, katkı maddelerinin sentezlenme işlemi, sentezlenen katkı maddeleri ile modifiye bitüm üretimi, orijinal ve modifiye bitümlere uygulanan testler, bu testlerle ilgili genel bilgiler ve testlerin uygulama yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

5.1. Malzeme

Çalışmada kullanılan malzeme üç grupta toplanmaktadır. Bunlar; bitüm, katkı maddeleri üretiminde kullanılan malzemeler ve agregadır.

Bitüm, 50/70 penetrasyon derecesine sahiptir. Karayolları Genel Müdürlüğü'ne bağlı şantiyeden temin edilmiştir. Çalışma kapsamındaki tüm modifikasyon uygulamalarında aynı bitüm kullanılmıştır.

Bitümlü karışımlar bazalt türü agregaya kullanılarak hazırlanmıştır. Agregaya, Sakarya'ya bağlı İkizce köyü Gençosman Taş ocağından temin edilmiştir. Agregaya ait kimyasal özellikler Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan bazalt türü agreganın kimyasal özellikleri

SiO ₂	1,6
Al ₂ O ₃	0,85
Fe ₂ O ₃	0,57
MnO	0,03
MgO	21,5
CaO	29,67
Na ₂ O	0,1
K ₂ O	0,25
CO ₂	45,45
Cl	0,006
SO ₄	0,002

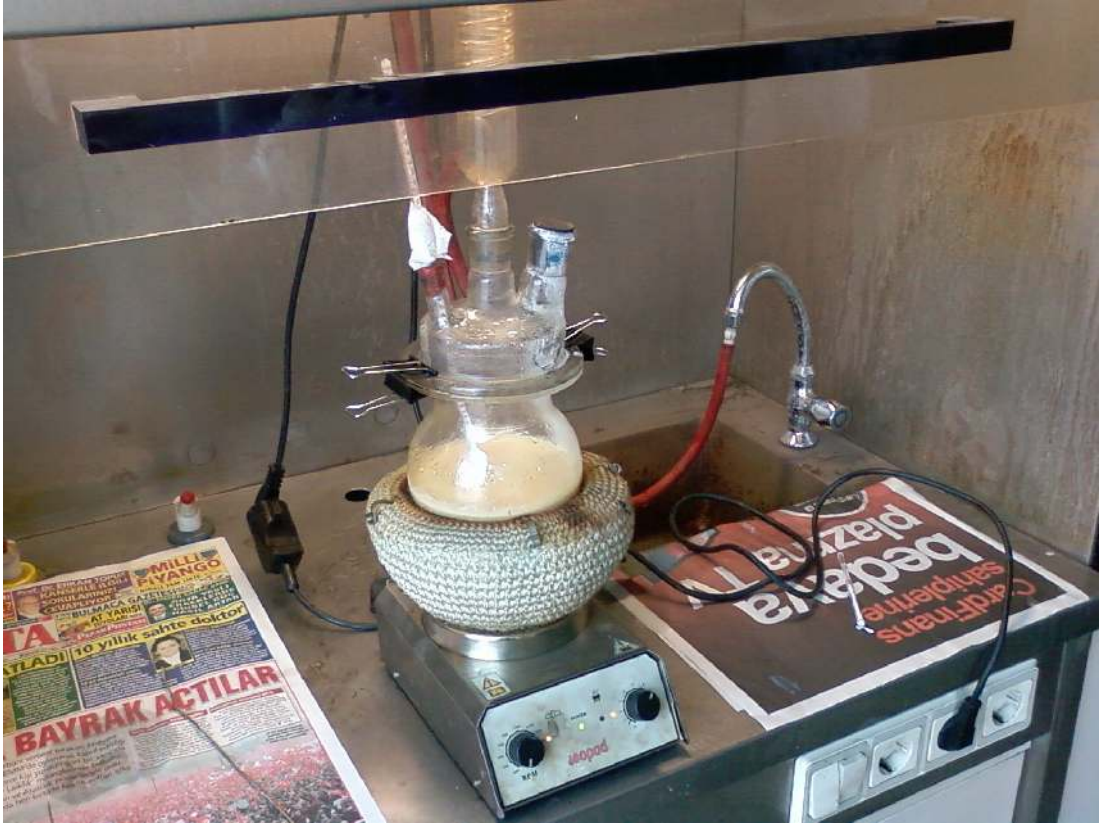
Çalışma kapsamında bitüm modifikasyonunda toplam 9 farklı katkı maddesi kullanılmıştır. Bitüm, bu katkı maddelerinin her biri ile ayrı ayrı modifiye edilmiş ve özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Çalışma, 1 adet orijinal bitüm ve 9 adet modifiye bitüm olmak üzere toplam 10 farklı bitüm tipi ile gerçekleştirilmiştir.

5.2. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddelerinin Sentezi

Bitüm modifikasyonunda 9 farklı katkı maddesi kullanılmıştır. Bunlardan 6 tanesi organik esaslı metal bileşiği, 3 tanesi ise etilen glikol esaslı polibor bileşiği olup her biri laboratuvar ortamında tarafımızca sentezlenmiştir. Her bir organik esaslı metal bileşiğinin sentezi, benzer yöntem ve aynı sentez parametreleri ile aşağıda belirtilen işlemler yapılarak gerçekleştirilmiştir;

- Belli miktarda metal oksit (sentezlenen katkı maddesine göre; MgO , $B(OH)_3$, MnO_2 , ZnO , CaO veya $ZnPO_4$) ve yağ (spindle oil) beher içerisinde karıştırıldı.
- Belli miktarlarda yağ ve reçine reaktöre konuldu ve belli bir hızda ısıtıldı. Karışımın homojenliğinin sağlanabilmesi için ısıtma işlemi devam ederken aynı zamanda manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı.
- Reaktör içindeki karışımın sıcaklığı belli bir seviyeye ulaştığında beher içerisinde hazırlanmış olan metal oksit-yağ karışımı reaktör içindeki yağ-reçine karışımına kademeli olarak eklenerek reaksiyona girmesi sağlandı.
- Katkı maddesinin sentezi için gerekli sıcaklığa ulaşıldıktan sonra manyetik karıştırıcı ile karıştırma işlemine belli bir süre daha devam edildi. Bu sürenin ardından ısı kapatıldı ve karışım soğuyana kadar karıştırma işlemine devam edildi.
- Soğuyan katkı maddesi bir gün süre ile bekletildi ve homojenliğin sağlanması için yeterli miktarda etil alkol ilave edildi. Daha sonra elde edilen katkı maddesinin ağırlığı ve hacmi ölçülerek modifiye bitüm üretiminde kullanılmak üzere camdan yapılmış kap içerisine konuldu.
- Sentezlenen tüm organik esaslı metal bileşiklerinde sıcaklık etkisiyle reaktör içerisinde bulunan karışımın oluşabilecek malzeme kaybını engellemek için geri soğutucu kullanıldı. Bu sistem, içinden su geçirilerek yoğunlaştırma ile geri kazanımı sağlamaktadır.
- Sentezlenen bazı metal bileşiklerinde reaksiyonu hızlandırmak amacıyla belli miktarda sülfürik asit kullanılmıştır.

Resim 5.1’de organik esaslı çinko bileşiği sentezlenirken görülmektedir. Diğer metal bileşiklerinin sentezi de Resim 5.1’de görülen cihaz grubu ile gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.1. Organik esaslı çinko bileşiği sentezi

Etilen glikol esaslı polibor bileşiği sentezinde karışıma belli miktarda borik asit ilavesi yapılmıştır. Bu suretle, etilen glikol ve borik asit reaksiyona girerek polimerleşme meydana gelmiştir. Kullanılan etilen glikol türüne bağlı olarak sentezlenen farklı malzemeler tarafımızca *polibor bileşiği* olarak isimlendirilmiştir.

Etilen glikol esaslı polibor bileşiklerinin sentezi aşağıda belirtilen işlemler yapılarak gerçekleştirilmiştir;

- Belli miktarda etilen glikol (sentezlenen katkı maddesine göre; trietilen glikol, dietilen glikol veya monoetilen glikol) behere konuldu ve ısıtılmaya başlandı.
- Behere belli miktarda sülfürik asit ilave edildi ve manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı.

- Belli bir sıcaklığa ulaşıldıktan sonra karışıma ağırlıkça %60 oranında borik asit kademeli olarak ilave edildi, bu sırada karıştırma ve ısıtma işlemlerine de devam edildi.
- Katkı maddesinin sentezi için uygun sıcaklığa erişildikten sonra karıştırma işlemine belli bir süre daha devam edildi. Süre sonunda katkı maddesinin ortam sıcaklığına kadar soğuması beklendi ve modifiye bitüm üretiminde kullanılmak üzere camdan yapılmış kap içerisine konuldu.

Resim 5.2’de trietilen glikol esaslı polibor bileşiği sentezlenirken görülmektedir. Diğer polibor bileşiklerinin sentezinde de benzer cihazlar kullanılmıştır.



Resim 5.2. Trietilen glikol esaslı polibor bileşiği sentezi

5.3. Modifiye Bitüm Üretim Prosesi

Laboratuvarda sentezlenen katkı maddeleri, bu katkı maddelerinin türleri, bitümle karıştırıldıkları sıcaklıklar ve karıştırılma süreleri Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

Çizelge 5.2 Katkı maddelerine göre modifiye bitüm imalat şartları

Katkı Maddesinin Adı	Katkı Maddesinin Türü	Bitümle Karıştırılma Süresi	Bitümle Karıştırılma Sıcaklığı
Organik esaslı magnezyum bileşiği (OEMAGB)	Organik Esaslı Metal Bileşiği	10 dakika	140°C
Organik esaslı borik asit Bileşiği (OEBAB)			
Organik esaslı çinko bileşiği (OEÇB)			
Organik esaslı mangan bileşiği (OEMANB)			
Organik esaslı kalsiyum bileşiği (OEKB)			
Organik esaslı çinko fosfat bileşiği (OEÇFB)			
Trietilen glikol esaslı polibor bileşiği (TEGPB)	Etilen Glikol Esaslı Polibor Bileşiği	5 dakika	110°C
Dietilen glikol esaslı polibor bileşiği (DEGPB)			
Monoetilen glikol esaslı polibor bileşiği (MEGPB)			

Çizelge 5.2’de de görüldüğü üzere çalışmada 9 farklı katkı maddesi kullanılmıştır. Bu katkı maddeleri organik esaslı metal bileşikleri ve etilen glikol esaslı polibor bileşikleri olmak üzere iki ana grupta (türde) toplanmaktadır. Modifikasyon işlemi aynı grupta bulunan (aynı tür olan) her bir katkı maddesiyle aynı şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Organik esaslı metal bileşikleri bitüme ağırlıkça %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında ilave edilmiştir. Organik esaslı metal bileşikleri ile bitüm modifikasyonu aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir;

- Orijinal bitüm metal kap içerisinde 140°C'ye ısıtıldı.
- Yeterli miktarda katkı maddesi (organik esaslı metal bileşiği) bitüme ilave edildi.
- Organik esaslı metal bileşiği ile bitüm 140°C'deki yağ banyosunda 1300 devir/dakika hızla çalışan çift kollu mekanik karıştırıcı ile 10 dakika karıştırıldı.
- Hazırlanan modifiye bitüm oda sıcaklığında soğutulduktan sonra metal kabın ağzı kapatıldı.

Etilen glikol esaslı polibor bileşikler ise bitüme ağırlıkça %1, %2, %3 ve %5 oranlarında ilave edilmiştir. Etilen glikol esaslı polibor bileşikler ile bitüm modifikasyonu aşağıdaki adımlardan oluşmuştur;

- Orijinal bitüm metal kap içerisinde 110°C'ye ısıtıldı.
- Yeterli miktarda katkı maddesi (etilen glikol esaslı polibor bileşiği) bitüme ilave edildi.
- Etilen glikol esaslı polibor bileşiği ile bitüm 110°C'deki yağ banyosunda 1300 devir/dakika hızla çalışan çift kollu mekanik karıştırıcı ile 5 dakika karıştırıldı.
- Hazırlanan modifiye bitüm oda sıcaklığında soğutulduktan sonra metal kabın ağzı kapatıldı.

Modifiye bitümler çalışma kapsamında gerçekleştirilen her bir deney için ayrı ayrı hazırlanmıştır. Her bir modifiye bitüm imal edildikten 2 gün sonra deneysel uygulamalara tabii tutulmuştur. 2 günlük süre, modifikasyon sonrasındaki kür süresi olarak belirlenmiştir.

140°C/110°C ve 10 dakika/5 dakika karıştırma sıcaklıkları ve süreleriyle elde edilen modifiye bitümler bu türde uygulamalar içeren literatür çalışmalarına göre oldukça avantajlıdır. Literatürde kullanılan ve genellikle ticari olan çeşitli katkı maddeleri ile bitümün modifikasyonu çok yüksek sıcaklıklarda (200°C

civarında) ve uzun karıştırma süreleriyle (literatürde 6 saate varan karıştırma süreleri mevcuttur) gerçekleştirilmektedir [28-33, 35-38, 40-42, 44, 46, 47, 49]. Bölüm 2.4.4'te bahsedildiği üzere bitümdeki yaşlanma büyük oranda maruz kaldığı yüksek sıcaklıktan dolayı oluşur. Modifikasyon süreci içinde, yüksek karıştırma sıcaklıkları ve uzun karıştırma süreleri bitümün yaşlanmasına sebep olacaktır. Yani modifikasyon ile bitüm özellikleri arttırılmaya çalışılırken üretim koşulları ile bitümün yaşlanmasına yol açılabilmektedir. Bu yüzden modifikasyon işleminin mümkün olan en düşük sıcaklıkta ve en kısa karıştırma süresinde gerçekleştirilmesi oldukça önemli bir husustur. Mevcut çalışmalarla kıyaslandığında, tarafımızca sentezlenen katkı maddeleri ile imal edilen modifiye bitümlerin bu bakımdan oldukça avantajlı oldukları görülmektedir.

5.4. Bitümlere Uygulanan Deneyler

Orijinal ve modifiye bitümlere aşağıda belirtilen laboratuvar deneyleri uygulanmıştır;

- Viskozite testleri
- Yumuşama noktası testleri
- Düktilite testleri
- Marshall testleri
- Soyulma testleri
- DSR (Dinamik Kesme Reometre-Superpave Deneyi)
- BBR (Eğilme Kirişi Reometre-Superpave Deneyi)

Orijinal ve modifiye bitümlere yukarıda belirtilen testler uygulanarak modifikasyonun bitüm özelliklerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

Bu deneylerin yanı sıra Marshall testindeki hesaplamalarda kullanılmak üzere agreganın ve orijinal bitümün özgül ağırlıkları EK-1'de belirtildiği şekilde deneysel olarak elde edilmiştir.

Bu alt bölümde testler ile ilgili genel bilgiler verilmiş, uygulama amaçlarından bahsedilmiş ve çalışma kapsamındaki uygulama parametreleri ve yöntemleri belirtilmiştir. Test sonuçları ise sonraki bölümde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

5.4.1. Viskozite testleri

Viskozite, daha önce de belirtildiği üzere bitümlerin sınıflandırılmasında kullanılan önemli bir kriterdir. Viskozite testi, bitümün değişik sıcaklıklarda sahip olduğu akıcılık özelliklerini gösteren temel testtir. Bilindiği üzere bitümlü sıcak karışımlarda bulunan bitümün agrega ile karıştırılma ve yola serilip sıkıştırılma esnalarında belirli kıvamlılıkta (akıcılıkta) olması gerekir. Aksi halde hem agrega ile yeterli derecede bağlanamaz (eksik adezyon kuvveti) hem de karışım yola serildikten sonra yeterli oranda sıkıştırılamaz. Karışım imalatı ve üstyapı inşaatı sırasında bitümün uygun akıcılıkta olmaması üstyapının trafiğe açılmasından sonra kısa süre içinde bozulmasına sebep olur. Bununla beraber, bitümün yeterli akıcılıkta olmasını sağlayan sıcaklık faktörü aynı zamanda bitümün yaşlanmasına sebep olan önemli etkidir. Bitümün özelliklerini kaybetmesine yol açan yaşlanma, büyük oranda maruz kalınan yüksek sıcaklıklardan kaynaklanmaktadır. Bu yüzden bitümün üstyapı inşaatının farklı aşamalarında sahip olması gereken akıcılık özelliklerine dikkat edilmesi oldukça önemli bir husustur.

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında öncelikle katkı maddelerinin bitümün kıvam özelliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kıvam, bitümün önemli bir davranış özelliğidir. Bu amaçla orijinal ve modifiye bitümlere viskozite testleri uygulanmıştır. Viskozite ölçümleri, SHRP tarafından geliştirilen Superpave bağlayıcı şartnamesi kapsamında viskozite ölçümünde kullanılan cihazla aynı özellikte olan Brookfield DV III Ultra marka programlanabilen viskozimetre ile

gerçekleştirilmiştir. Cihaza ait fotoğraflar EK-2’de sunulmuştur. Bitüm, viskozite ölçümü için numune kabına konarak cihazın termoseline yerleştirilir. Termosel cihazın sıcaklık hücresi olup istenilen sıcaklığa ayarlanabilir özelliktedir. Bitümün deney sıcaklığına erişimi ve bu sıcaklıkta sabitlenmesi sağlandıktan sonra viskozite ölçümü yapılır. Ölçüm, bitüm içine batırılmış silindirik çubuğun (spindle) kendi eksenini etrafında dönme hareketine karşı bitümün gösterdiği direnç ile ölçülmektedir. Silindirik çubuğun dönme hızı (dakikadaki devir sayısı) ile cihazın ölçüm kapasitesi ve hassasiyeti değiştirilebilmektedir. Cihaz, farklı birimlerde sonuç verebilme özelliğindedir. Yapılan çalışma kapsamında viskozite değerleri mPa.s (mili paskal*saniye) cinsinden ölçülmüştür.

Bitümün plentteki pratik maksimum sıcaklığının 160°C olduğu ifade edilmektedir [4]. 50°C’nin altındaki sıcaklıklarda ise bitüm akıcılığını büyük oranda kaybetmekte ve viskozite ölçüm cihazında bulunan silindirik çubuğun (spindle) bitümün içine batırılması problem oluşturmaktadır. Bu yüzden viskozite ölçümleri 50°C ile 160°C arasında ve aşağıda belirtilen koşullarda gerçekleştirilmiştir;

- Orijinal bitümün viskozite ölçümleri 50°C ile 160°C arasında 10°C sıcaklık farkları ile gerçekleştirilmiştir.
- Organik esaslı metal bileşikler ile modifiye edilen bitümlerin tümünde viskozite ölçümleri 90°C ile 160°C arasında 10°C sıcaklık farkları ile gerçekleştirilmiştir.
- MEGPB ve DEGPB ile modifiye edilen bitümlerin tümünde viskozite ölçümleri 50°C ile 90°C arasında 10°C sıcaklık farkları ile gerçekleştirilmiştir.
- TEGPB ile modifiye edilen bitümlerin tümünde viskozite ölçümleri 50°C ile 160°C arasında 10°C sıcaklık farkları ile gerçekleştirilmiştir.

Görüldüğü üzere katkı maddelerinin bitümde oluşturduğu etki organik esaslı metal bileşikleri için 90°C-160°C arasında, etilen glikol esaslı polibor bileşikleri için daha ziyade 50°C-90°C arasında incelenmiştir.

Viskozite ölçümlerinde DV III Ultra marka programlanabilen viskozimetre kullanılmıştır. Bu cihaz ile ölçümler bitümün içine silindirik bir çubuğun batırılıp kendi eksenini etrafında sabit bir hızda döndürülmesiyle gerçekleştirilmektedir. Çubuğun dönüş hızı dakikada 1-250 devir arasında seçilebilmektedir. Seçilen bu dönüş hızına bağlı olarak cihazın ölçüm sınırları değişmektedir. Numune sertleştikçe daha düşük, numune yumuşadıkça ise daha yüksek dönüş hızlarının seçilmesi zorunlu olmaktadır. Numuneye ait viskozite değeri silindirik çubuğun numune içindeki dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile elde edilmektedir. DV III Ultra marka programlanabilen viskozimetre ile viskozite ölçümü, değer olarak sıfırdan başlayıp giderek yavaşlayan bir hızla ve seçilen dönüş hızına bağlı artış miktarlarıyla numuneye ait viskozite değerine kadar devam etmektedir. Dönüş hızı ve artış miktarı ters orantılı olup çarpımları 1000 etmektedir. Yani düşük dönüş hızlarında büyük miktarda artışlarla, yüksek dönüş hızlarında ise küçük miktarda artışlarla numuneye ait viskozite değerine ulaşılmaktadır. Örneğin çubuk için dönüş hızı 10 devir/dakika seçildiğinde ölçüm 100 mPa.s'lik artışlarla gerçekleşmektedir. Eğer ölçüm yapılan sıcaklıkta numuneye ait viskozite değeri 60 mPa.s veya 140 mPa.s gibi artış miktarına göre düşük değerlerde ise cihaz, numuneye ait viskozite değerini atlayacaktır. Böyle bir durumda ölçüm kararsız bir hal almakta ve sonucun belirlenmesi tahminlere bağlı olmaktadır. Silindirik çubuk için yüksek dönüş hızları seçildiğinde ise artış miktarları azalmaktadır. Ancak böyle bir seçim ile cihazın ölçüm kapasitesi de azalmaktadır. Böylece numunenin düşük sıcaklıklarda sahip olduğu yüksek viskozite değerleri ölçülemez hale dönüşebilmektedir.

Viskozite ölçümünde kullanılan cihaz özelliklerine bağlı olarak ölçümlerde silindirik çubuk için farklı dönüş hızları seçilmiştir. Şöyle ki;

- 50°C ile 160°C arasında yapılan ölçümler 50°C-90°C ve 90°C-160°C olmak üzere iki gruba ayrılmıştır.
- 90°C-160°C arasında bitüme ait nispeten düşük viskozite değerleri mevcut olduğundan daha hassas ölçümlerin yapılması gerekli olmuştur. Bu sebeple, 90°C-160°C arasındaki ölçümlerde silindirik çubuk için dönüş hızı olarak 150 devir/dakika seçilmiştir. Seçilen bu dönüş hızına bağlı olarak ölçüm, 6-7 mPa.s'lik artışlarla gerçekleşmiştir. Ölçüme, artışların sona erdiği değere kadar yani viskozite değeri sabitlenene kadar devam edilmiştir. Daha fazla artmanın oluşmadığı nihai ölçüm değeri bitümün o sıcaklıktaki viskozitesi olarak belirlenmiştir.
- 50°C-90°C arasında ise bitümün viskozitesi oldukça arttığından cihaza ait ölçüm kapasitesinin de arttırılabilmesi için silindirik çubuk için daha düşük dönüş hızlarının seçilmesi zorunlu olmuştur. Ölçümlere 4 dakika boyunca devam edilmiş ve bitüme ait viskozite değeri 1'er dakika aralıklarla okunan değerlerin ortalaması alınmak suretiyle elde edilmiştir. 50°C-90°C arasındaki viskozite ölçümleri için kullanılan silindirik çubuk hızları ve ölçüm tekniği aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

50°C-90°C arasındaki viskozite ölçümlerinde silindirik çubuk için her bir farklı ölçüm sıcaklığında ölçüm alınabilen 5 farklı kademede dönüş hızı belirlenmiştir. Bu hızlar belirlenirken üç husus göz önünde bulundurulmuş ve dönüş hızları bu hususlar doğrultusunda belirlenmiştir. Buna göre;

- 50°C-90°C aralığındaki deney sıcaklıklarının tümünde ölçüm alınabilen ortak bir dönüş hızı araştırılmış ve bu değer 1 devir/dakika (rpm) olarak tespit edilmiştir.
- Her bir deney sıcaklığı için ölçüm alınabilen en yüksek dönüş hızları deneyde kullanılacak dönüş hızı olarak belirlenmiştir.
- Silindirik çubuk için yukarıda açıklandığı şekilde tespit edilen iki dönüş hızından sonra kalan 3 dönüş hızı, ölçüm alınabilen alt ve üst sınırlar arasında olacak ve bu aralığı birbirine yakın parçalara bölecek ve aynı

zamanda diğer ölçüm sıcaklıklarıyla mümkün olduğunca ortak dönüş hızı içerecek şekilde belirlenmiştir.

Yukarıda belirtilen hususlara göre 50°C-90°C aralığındaki farklı deney sıcaklıklarında silindirik çubuk için kullanılan dönüş hızları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. 50°C-90°C aralığındaki viskozite ölçümlerinde kullanılan silindirik çubuk dönüş hızları

Sıcaklık (°C)	Dönüş hızı (devir/dakika)				
50	0,5	1*	0,75		
60	1*	3	5**	6	
70	1*	5**	10	15	25 [®]
80	1*	5**	25 [®]	50	75 [©]
90	1*	5**	25 [®]	75 [©]	150

Çizelge 5.3'te görüldüğü üzere 50°C ve 60°C'lerde ölçüm alınabilen üst sınırlar diğer sıcaklıklara göre düşüktür. Bu sebepten dolayı belirtilen sıcaklıklarda silindirik çubuk için 5 farklı dönüş hızı yerine Çizelge 5.3'te verilmiş olan değerler kullanılmıştır.

Viskozite ölçümlerinde 3 dakikalık süre içinde 1'er dakika aralıklarla toplam 3 adet değer cihaz vasıtasıyla okunacağı ve malzemeye ait viskozite değerinin bu üç değer aritmetik ortalaması şeklinde hesaplanacağı belirtilmektedir [50]. Buna göre 50°C-90°C arasında yapılan viskozite ölçümlerinde ölçüm sıcaklığına ait her bir dönüş hızı için -bazı özel durumlar dışında- her biri 1'er dakika aralıklarla okunan toplam 4 adet viskozite değerinin ortalamasından oluşan 3 adet ölçüm yapılmış (yani viskozite ölçümü 4 dakikaya uzatılmış) ve 3 ölçümün ortalamasıyla ölçüm yapılan sıcaklıktaki dönüş hızına ait viskozite değeri elde edilmiştir. Ölçüm sıcaklığına ait nihai viskozite değeri ise o sıcaklıkta belirlenen tüm dönüş

hızlarında elde edilen ortalama viskozite değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Örneğin bitümün 50°C'deki viskozitesi belirlenirken silindirik çubuk için üç farklı dönüş hızı kullanılmaktadır (0,5 rpm, 1 rpm ve 0,75 rpm). 0,5 rpm dönüş hızıyla 4'er dakikadan oluşan 3 adet ölçüm yapıp bu değerlerin aritmetik ortalamasıyla 0,5 rpm'deki ortalama viskozite elde edilmiştir. 50°C'deki diğer dönüş hızları olarak belirlenmiş olan 1 rpm ve 0,75 rpm'de ortalama viskozite değerleri benzer şekilde elde edildikten sonra 50°C için nihai viskozite değeri 0,5 rpm, 1 rpm ve 0,75 rpm'deki ortalama viskozite değerlerinin aritmetik ortalaması hesaplanarak belirlenmiştir. Ölçümlerin standarttan (ASTM D 4402-02) farklı olarak 4'er dakika olarak yapılması ise viskozite ölçümlerindeki hassasiyeti artırma ve 3. dakikadan sonra herhangi bir değişimin olup olmadığını kontrol amaçlıdır.

Bitüme ilave edilen katkı maddesi miktarı oldukça önemlidir ve modifikasyon sonuçlarını yakından etkiler. Katkı maddelerinin her biri için bitüme ilave edileceği optimum miktarın belirlenmesinde viskozite test sonuçları dikkate alınmıştır. Optimum katkı miktarının belirlenmesinde kullanılan temel yaklaşım, bitüm davranışında en büyük değişimi yaratan en düşük dozda katkı maddesi miktarının araştırılması olarak belirlenmiştir. Katkı maddelerinin bitüme optimum ilave miktarları belirlendikten sonra bu oranlarda hazırlanan modifiye bitümler ile orijinal bitüm özellikleri diğer testler kapsamında incelenip kıyaslanmıştır.

5.4.2. Marshall testleri

Marshall yöntemi bitümlü sıcak karışımların tasarımında yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem ile bitümlü sıcak karışımların en uygun bitüm içeriğinde imal edilmeleri ve bu sayede daha üstün özelliklere sahip olmaları sağlanabilir. Bu yöntemde, agrega grubuna farklı oranlarda bitüm ilave edilir ve karıştırılır ve hazırlanan karışımlar numune kalıplarına koyularak sıkıştırılır. Kalıplar silindirik şekildedir. Belli bir kür süresini takiben, elde edilen silindirik numunelerin (Marshall briketleri) yükseklikleri ölçülür ve farklı

ortam ve koşullarda ağırlıkları tartılır (havada, suda ve suya doygun halde). Tartım sonuçları ve diğler veriler ile yoğunluk ve hacim hesaplamaları yapılır. Daha sonra belirli şartlar altında y¼kleme yapılarak numunelerin maksimum stabiliteleri ve buna karşılık numunelerde oluşan akma miktarları ölç¼l¼r. Akma, y¼kleme uygulanan numunede d¼řey y¼nde oluşan deformasyon olarak tanımlanmaktadır.

Bu metot ile *tasarım (design)*, temel olarak, hesaplama, ölçme ve değerlendirme aşamalarından oluşur. Tasarımda, farklı miktarlarda bit¼m içeren karışımlarla hazırlanan numunelerin (briketlerin) sıkıştırıldıktan sonraki yoğunluk ve hacim oranları hesaplanır. Daha sonra bu numunelere (briketlere) y¼kleme uygulayarak stabilite ve akma değerleri ölç¼l¼r. B¼ylece farklı bit¼m içeliklerine göre yoğunluk, hacim oranları, stabilite ve akma değerleri elde edilir. Bu verilerle hazırlanan çeşitli grafikler değerlendirilerek, tasarım yapılan agrega tipi ve gradasyonu ile bit¼m cinsi için en uygun (optimum) bit¼m içeliği belirlenir.

Bu yöntemde agrega ve bit¼mden oluşan karışımlar farklı miktarlarda bit¼m içerecek şekilde hazırlanmaktadır. Optimum bit¼m miktarı ise bu karışımlardan elde edilen değerlere göre hesaplanmaktadır. Bu y¼zden Marshall tasarımına (Marshall design) başlamadan önce karışımlarda kullanılacak bit¼m miktarlarının belirlenmesi önemlidir. Bu hususta karışım için öncelikle ön optimum bit¼m oranı belirlenmektedir. Diğer bit¼m oranları ise bu değerin 0,5 ve 1 birim altında ve üstünde olacak şekilde seçilmektedir. Ön optimum bit¼m oranı tecrübelere bağlı olarak ve/veya bazı ampirik metotlar kullanılarak belirlenebilmektedir [4]. Karışımda kullanılacak optimum bit¼m miktarını agreganın tür¼, gradasyonu ve absorpsiyon özelliği etkiler. Agrega karışımında bulunan kaba agrega oranı azaldıkça, agrega absorpsiyonu arttıkça agrega-bit¼m karışımları için optimum bit¼m miktarı artış gösterir.

Agrega ve bitümün öncelikle laboratuvar ortamında tasarlanmalarıyla aşağıdaki hususlar belirlenerek karışımın uygun özelliklerde olması sağlanabilir ve/veya ilgili şartnamelere uygunluğu değerlendirilebilir [48];

- Karışımında kullanılan agrega gradasyonu ve tipi ile bitüm cinsine göre uygun (optimum) bitüm miktarının belirlenmesi,
- Karışım stabilitesinin yeterlilik kontrolü yapılabilmesi,
- Karışımın yolda sıkıştırıldığında şartnamelerce belirlenen düzeyde boşluğa sahip olmasının sağlanması,
- Yeterli işlenebilirlikte, ekonomik bir karışım elde edilmesi.

Yöntemde 2,5 inç yüksekliğinde ve 4 inç çapında silindirik deney numuneleri (Marshall briketleri) kullanılır ve her bir farklı bitüm içeriği için en az 3 briket hazırlanır. Briket hazırlanırken, agrega ve bitüm uygun sıcaklıkta karıştırılır ve kalıplara dökülerek sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi, 18 inç yükseklikten serbest düşen 4,536 kg ağırlıktaki tokmak darbeleri ile gerçekleştirilir. Darbe sayısı; tabaka cinsi (aşınma, binder veya bitümlü temel), trafik kompozisyonu ve miktarı ve yol kesimine göre değişebilmektedir. Sıkıştırılma sonrası 2,5 inçten farklı yüksekliğe sahip briketler için stabilite ölçümleri, briketlerin yüksekliklerine veya hacimlerine bağlı olan uygun faktörlerle çarpımları suretiyle düzeltilir. Briket yüksekliğine bağlı düzeltme faktörleri EK-3'te ve briket hacmine bağlı düzeltme faktörleri EK-4'te verilmiştir.

Çalışmada agrega gradasyonu olarak Yollar Fenni Şartnamesinde Tip 2 adı altında verilen gradasyonun ortalama değerleri kullanılmıştır. Tip 2, yüksek standartlı esnek üstyapıların en üstünde bulunan aşınma tabakasında kullanılmak üzere belirlenmiş bir gradasyon tipidir. Tip 2'ye ait gradasyon değerleri ve çalışmada agrega gradasyonu olarak kullanılan Tip 2 şartname ortalama değerleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Tip 2 gradasyon dağılımı ve tasarımda kullanılan şartname ortalama değerleri

Elekten Geçen Malzeme Miktarı (%)		
Elek Boyutu	Tip 2 Gradasyon Değerleri	Tip 2 Şartname Ortalama Değerleri
19 mm (3/4")	100	100
12,5 mm (1/2")	77-100	88,5
9,5 mm (3/8")	66-84	75
4,75 mm (#4)	46-66	56
2,00 mm (#10)	30-50	40
0,425 mm (#40)	12-28	20
0,180 mm (#80)	7-18	12,5
0,075 mm (#200)	4-10	7

Her bir briket, Çizelge 5.4'te "Tip 2 şartname ortalama değerleri" adı altında verilen gradasyon özelliğine sahip bazalt türü agregadan 1100 g kullanılarak hazırlanmıştır. 4 numaralı elek üzerinde kalan agregaya kaba agrega, 200 numaralı elekten geçen agregaya filler, 4 ile 200 no.'lu elekler arasında kalan agregaya da ince agrega denilmektedir. Buna göre Marshall testinde kullanılan her bir briket 484 g kaba agrega, 539 g ince agrega ve 77 g filler içerecek şekilde hazırlanmıştır.

Marshall tasarımında yoğunluk ve hacim oranları ile ilgili hesaplamalar bulunmaktadır. Bu hesaplamalar için bitüme ve agregaya ait özgül ağırlık değerleri gerektiğinden tasarımdan önce bu değerler deneysel olarak elde edilmiştir.

Marshall tasarımı, çalışmada kullanılan bazalt türü agrega ve 50/70 penetrasyon dereceli orijinal bitüm (modifiyesiz) ile gerçekleştirilmiştir. Agregaya için Çizelge 5.4'te görülen gradasyon değerleri kullanılmıştır. Ön optimum bitüm miktarı tecrübeler ve literatürde benzer malzemeli

çalışmalara göre %4,5 olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak tasarım, %3,5; %4; %4,5; %5; %5,5 oranlarında bitüm içeriklerinde ve her bir bitüm içeriğinde toplam 3 adet briket hazırlanarak yapılmıştır. Hazırlanan briketlerin sıkıştırılmış yüksekliklerinin 2,5 inç (63,5 mm) olması istenir. Eğer herhangi bir briketi ait yükseklik 2,5 inçten farklı ise bu briketi ait düzeltilmiş stabilite değeri, deneyde elde edilen briketi ait stabilite ölçüm değeri ile aynı briketin yüksekliğine (veya hacmine) bağlı olarak belirlenen düzeltme faktörüyle çarpılarak elde edilir. Yapılan çalışmada yüksekliğe bağlı katsayılar kullanılmıştır. Hacme bağlı katsayılar kullanıldığında ise sadece düzeltilmiş stabilite değerlerinde küçük değişimler oluşmakta ancak sonuçta elde edilen optimum bitüm oranı değişkenlik göstermemektedir. Tüm briketler için gerekli hesaplamalar ve ölçümler yapıldıktan sonra elde edilen değerlerden Yoğunluk (D_p)~bitüm içeriği(%), Stabilite~bitüm içeriği(%), boşluk oranı (V_h)~bitüm içeriği(%) ve bitümle dolu boşluk oranı (V_f)~bitüm içeriği(%) grafikleri çizilmiştir. Maksimum yoğunluğa, maksimum stabiliteye, şartname boşluk yüzdesi ortalamasına ve şartname bitümle dolu boşluk yüzdesi ortalamasına karşılık gelen bitüm miktarlarının aritmetik ortalaması ile karışımında kullanılacak optimum bitüm içeriği hesaplanmıştır. Hazırlanan briketlerin özelliklerine göre şartname boşluk yüzdesi ortalaması ve şartname bitümle dolu boşluk yüzdesi ortalaması sırasıyla %4 ve %80'dir.

Daha önce de belirtildiği üzere karışım stabilitesinin yeterli düzeyde yüksek olmadığı durumlarda üstyapıda görülen bozulmalar artmaktadır. Marshall tasarımında numunelerin stabilite değerleri de ölçülmektedir. Marshall yöntemindeki bu ölçüm, çalışmada kullanılan katkı maddelerinin karışım stabilitesini ne şekilde etkilediğini belirlemek üzere kullanılmıştır. Oluşan etkinin daha iyi değerlendirilebilmesi için tüm briketlerde aynı oranda bitüm kullanılmıştır. Bu türlü yaklaşım literatürde de tercih edilebilmektedir [49]. Orijinal bitüm ile gerçekleştirilen Marshall tasarımında elde edilen optimum bitüm oranı, orijinal ve modifiye bitüm ile hazırlanan tüm briketlerde ortak bitüm oranı olarak kullanılmıştır. Orijinal bitüm ile yapılan Marshall tasarımında olduğu gibi, katkı maddelerinin karışım özellikleri üzerinde

etkisini belirlemek üzere orijinal ve modifiye bitüm kullanılarak imal edilen briketlerin öncelikle boyut ve ağırlık ölçümleri yapılarak yoğunluk ve hacim oranı hesaplamaları yapılmıştır. Daha sonra her bir briketin dayanım gösterebildiği maksimum yük miktarı (stabilite) ve bu yük miktarında brikette meydana gelen akma (düşey deformasyon) değerleri ölçülmüştür.

Çalışmada kullanılan katkı maddesi sayısının fazlalığından dolayı modifiye bitümler 3'erli gruplar halinde hazırlanarak Marshall deneyine tabii tutulmak üzere briket imalatında kullanılmıştır. Her bir grupta birlikte aynı zamanda orijinal bitüm kullanarak da briketler hazırlanmıştır. Karşılaştırmalar birlikte imal edilen ve daha sonra aynı günde yükleme uygulanan briketler arasında gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde farklı günlerde laboratuvar ve ölçüm koşullarında oluşabilecek değişkenliğin deney sonuçlarına etkisinin ortadan kaldırılması amaçlanmıştır.

Viskozite test sonuçlarına göre her bir katkı maddesi için belirlenen optimum miktarlar, bu test grubu çerçevesinde kullanılan modifiye bitümlerdeki katkı maddesi miktarları olarak belirlenmiştir. EK-5'te test kapsamında imal edilen Marshall briketlerine ait fotoğraflar sunulmuştur.

5.4.3. Yumuşama noktası testleri

Çalışma kapsamında incelenen bitümlerin yumuşama noktaları halka ve bilya metodu ile belirlenmiştir. Bu metod kapsamında bitüm akıcı hale getirilerek pirinçten yapılmış halka içerisine halka üst yüzeyini aşacak şekilde doldurulmuş ve oda sıcaklığında 1 saat soğuması için bekletilmiştir. 1 saatin sonunda ısıtılmış spatula yardımıyla halka yüzeyinin üzerinde kalan kısım kesilerek alınmıştır. Cam behere 5°C'lik su koyup halka, bilya ve ölçüm düzeneği 15 dakika su içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra bilya halkanın üzerine oturtulup su sıcaklığı dakikada 5°C artacak hızda ısıtılmıştır. Artan sıcaklık ve bilya ağırlığının etkisiyle bitümün düzeneğin alt tarafında bulunan metal yüzeye temas ettiği anda termometreden okunan sıcaklık yumuşama

noktası olarak ölçülmüştür. Bu deney, orijinal bitüme ve çalışmada kullanılan farklı katkı maddelerini optimum oranda içeren modifiye bitümlere uygulanmıştır. EK-6'da yumuşama noktası ölçümlerine ait fotoğraflar sunulmuştur.

5.4.4. Düktilite testleri

Düktilite testi, bitümlerin düşük sıcaklıklarda sünek davranış gösterebilme yeteneklerini değerlendirebilmek için gerçekleştirilmiştir. Deney, standart olarak 25°C'de uygulanır. Ancak literatürde daha düşük sıcaklıklarda yapılan uygulamaları da bulunmaktadır [29, 32, 51-53]. Bu çalışmadaki düktilite testleri 15°C'de gerçekleştirilmiştir. Deneyde, her bir bitüm ısıtılmak suretiyle akıcı hale getirilerek düktilite kalıbına kalıp üst seviyesini aşacak şekilde dökülmüştür. Soğuması için oda sıcaklığında 30 dakika ve ardından da 15°C'lik su banyosunda 30 dakika bekletilmiştir. Su banyosundan çıkarıldıktan sonra ısıtılmış spatula ile numunenin kalıp üst seviyesini aşan kısmı kesilmiştir. Kalıp ile numune aynı seviyeye getirildikten sonra 15°C'lik su banyosunda 90 dakika daha bekletilerek deney sıcaklığına ulaşması sağlanmıştır. Bu süreç sonunda kalıp, içinde 15°C'de su bulunan düktilite cihazına yerleştirilerek deneye başlanmıştır. Deneyde, kalıbın bir ucu cihaz içindeki yerine sabitlenmiş diğer ucu ise 5 cm/dakika hızla çekilmiştir. Bu koşullarda bitüm uzamış ve koptuğu andaki uzama miktarı bitümün düktilite değeri olarak ölçülmüştür. Bu deney, orijinal bitüme ve çalışmada kullanılan farklı katkı maddelerini optimum oranda içeren modifiye bitümlere uygulanmıştır. EK-6'da düktilite ölçümlerine ait fotoğraflar görülmektedir.

5.4.5. Soyulma testleri

Bitümlü karışımların soyulma dirençleri laboratuvar ortamında değişik test metotlarıyla değerlendirilebilmektedir. Bu metotlara Bölüm 2.4.5'te değinilmişti. Metotlarda göze çarpan en büyük fark deney numunelerinin sıkışma koşullarıdır. Soyulma testleri sıkıştırılmış veya serbest halde bulunan

bitümlü karışımlara uygulanabilmektedir. Çalışma kapsamında soyulma direnci, sıkıştırılmamış bitümlü karışımlar kullanılarak statik tipte deney metodu ile test edilmiştir. Bu metotlar içinde Nicholson yöntemi sıkça kullanılmaktadır.

Nicholson yönteminde, belli miktarda ve boyuttaki agregaya yıkanır ve 110°C'lik etüvde kurutulur. Agregaya, yıkanarak yüzeyinde bulunan tozlardan arındırılırken kurutularak bitümle uygun şekilde bağ yapabilmesi için gerekli şart sağlanır. Daha sonra agregaya ve bitüm 110°C'de ısıtılır ve belli miktarda agregaya ve agregaya ağırlığının %5'i oranında bitüm beher içinde 110°C'de karıştırılır. Beherdeki karışım 60°C'deki etüvde 24 saat bekletilerek kür edilir ve kür süresinden sonra karışım petri kabına aktarılır. Petri kabı su ile doldurulup üzeri cam kapakla örtülür ve 24 saat 60°C'deki etüvde bekletilir. 24 saatin sonunda karışım sudan çıkartılıp agregaya danelerinde oluşan soyulma miktarı görsel olarak incelenir. Soyulmamış toplam agregaya yüzey alanının karışımdaki toplam agregaya yüzey alanına oranı karışımın soyulma direnci olarak değerlendirilir [2, 11].

Soyulma testleri aşağıda belirlenen şartlar altında gerçekleştirilmiştir;

- Soyulma testi için hazırlanan bitümlü karışımlarda (3/8")'lik elekten geçip 4 no.'lu elekte kalan boyuta sahip bazalt türü agregaya kullanılmıştır.
- Her bir deney numunesindeki agregaya iyice yıkanmış ve sonrasında 110°C'deki etüvde yeterli süre bekletilerek kuruması sağlanmıştır.
- Soyulma testleri 110°C'lik karıştırma sıcaklığında hazırlanan numunelere uygulanmıştır. Agregaya ve bitüm karıştırılmadan önce bu sıcaklıkta yeteri kadar ısıtılmıştır.
- Agregaya ile bitümün homojen olarak karıştırılmasına gerekli itina gösterilmiştir.

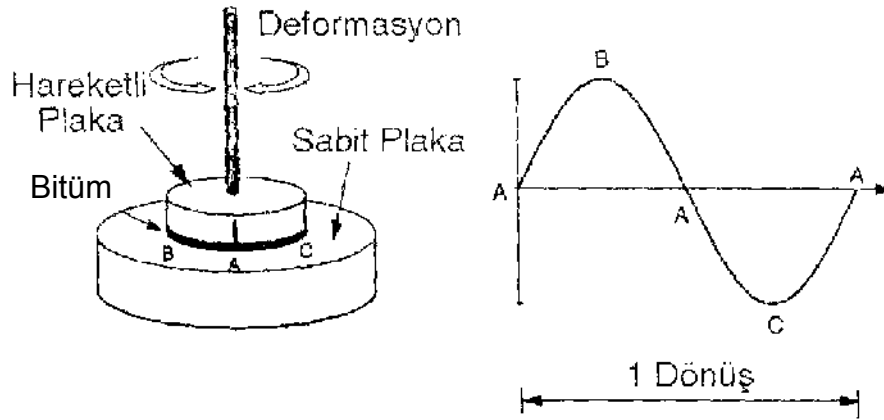
- Her bir karışımda 100 g bazalt türü agrega ile 5 g bitüm kullanılmıştır. Bu oran, orijinal bitüm ve optimum miktarda katkı maddesi içeren tüm modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda aynı şekilde kullanılmıştır.
- Hazırlanan her bir karışım suda bekletilmek üzere iki farklı petri kabına aktarılmış ve böylece deney sonucunun değerlendirilebileceği iki adet numune oluşmuştur. Böylece, deney sonuçlarındaki güvenilirlik artırılmıştır.
- Marshall testinde olduğu gibi modifiye bitümler 3'erli gruplar halinde teste tabii tutularak karışımlarda meydana gelen soyulma miktarları belirlenmiştir. Değerlendirmenin daha sağlıklı yapılabilmesi için her bir 3'erli gruba beraber aynı zamanda orijinal bitüm de teste tabii tutulmuştur. Değerlendirme, 3 modifiye bitüm ve orijinal bitüm içeren her bir münferit 4'lü grup arasında yapılmıştır.
- Hazırlanan numuneler önceden 60°C'ye ayarlanmış etüvde 24 saat süreyle suda bekletilmiştir.
- Numunelerde oluşan soyulma görsel olarak incelenmiştir. Deney sonuçları soyulma direnci ve soyulma oranı cinsinden ifade edilmiştir. Soyulma direnci, her bir numunedeki soyulma oluşmayan toplam agrega yüzey alanının numunede bulunan toplam agrega yüzey alanına oranlanmasıyla elde edilmiştir. Bu değeri %100'e tamamlayan değer ise karışımda meydana gelen soyulma oranı olarak ifade edilmiştir.

5.4.6. DSR (Dynamic Shear Rheometer) testleri

DSR testi, ABD'de Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) kapsamında hazırlanan şartnamede yer alır. Bu test ile bitümün orta ve yüksek sıcaklıklardaki özellikleri belirlenir. Test, dinamik kesme (kayma) reometresi (DSR) olarak adlandırılan cihaz ile gerçekleştirilir ve dinamik kesme deneyi olarak anılır. Bitümün tekerlek izi ve yorulma çatlaklarına karşı dirençleri bu test sonuçlarına göre ayrı ayrı kıyaslanabilmektedir.

DSR ile bitümün orta ve yüksek sıcaklıklardaki kompleks kesme modülü (G^*) ve faz açısı (δ) ölçülür. Bu ölçüm sonuçları ile deney sıcaklığına bağlı olarak bitümün hem viskoz hem de elastik davranışı değerlendirilebilir.

DSR testinde bitüm birbirine paralel iki plaka arasına yerleştirilir. Alttaki plaka sabit, üstteki ise hareketlidir. Deney düzeneği Şekil 5.1'de görülmektedir. Üstteki plaka A noktasından B'ye, B'den tekrar A'ya, A'dan C'ye ve C'den tekrar A noktasına hareket eder. Bu harekete salınım (veya devir) denir ve deney süresince bu salınım hareketi devam eder.



Şekil 5.1. DSR testi deney düzeneği [4]

Dinamik kesme reometreleri gerilme kontrollü ve deplasman kontrollü olmak üzere iki farklı tipte olabilmektedir. Gerilme kontrollü reometrelerde üstteki plakanın hareketi deney süresince sabit bir burulma kuvveti ile gerçekleşir. Buna göre her salınımda yer değiştirme farklı olabilir. Deplasman kontrollü reometrelerde ise sabit bir deplasman gerçekleştirilir ve bunu sağlayacak kuvvet her salınımda değişebilir. Superpave bağlayıcı şartnamesi kapsamında gerilme kontrollü reometre kullanılır ancak deplasman kontrollü reometreler de bu testte kullanılabilecek özelliktedirler [18].

DSR ölçümleri ile elde edilen G^* ve δ bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı direncini belirlemek üzere $G^*/\sin\delta$ şeklinde kullanılır. $G^*/\sin\delta$ bitümün

tekerlek izi direnç parametresidir. Bu değerin daha yüksek olması bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı daha dirençli olduğunu gösterir.

5.4.7. BBR (Bending Beam Rheometer) testleri

BBR testi, DSR testi gibi, ABD’de Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) kapsamında hazırlanan şartnamede yer alır. Bu test ile bitümün düşük sıcaklıklardaki özellikleri incelenir. Test, eğilme kirişi reometresi (BBR) olarak adlandırılan cihaz ile gerçekleştirilir.

BBR testi ile bitümün belli bir sıcaklıkta sabit yük altında sünme veya defleksiyon özellikleri belirlenir. Yükleme, sıcaklık azaldıkça kaplamanın maruz kaldığı termal gerilmeleri temsil eder [18]. Deney numunesi dikdörtgen kesitli kiriş şeklindedir. Numuneye tam orta noktasından 980 mN’lik sabit bir tekil kuvvet uygulanır. Deney süresi 4 dakikadır.

BBR testinde 4 dakikalık deney süresi boyunca yüklemeden dolayı numunenin orta noktasında oluşan defleksiyon ölçülür ve yazılım ile sünme rijitliği (S) ve sünme oranı (m) 8., 15., 30., 60., 120., ve 240. saniyelerde otomatik olarak hesaplanır. PG bağlayıcı şartnamesine göre S maksimum 300 MPa ve 60. saniyedeki m minimum 0,3 olması gerekir [9, 37].

Sünme rijitliği (S), numunenin sünme yüklerine karşı gösterdiği dirençtir ve aşağıdaki formül ile tespit edilir [4, 18].

$$S_{(t)} = \frac{PL^3}{4bh^3\delta_{(t)}} \quad (5.1)$$

Eş. 5.1’de;

$S_{(t)}$ t anındaki sünme rijitliği (MPa)

P	deneyde uygulanan sabit yük (980 mN)
L	mesnetler arası mesafe (102 mm)
b	numune genişliği (12,5 mm)
h	numune yüksekliği (6,25 mm)
$\delta_{(t)}$	t anındaki defleksiyon (mm)

Sünme oranı (m), numuneye ait sünme rijitliğinin zamana göre değişimini temsil eder. Sünme rijitliği-zaman grafiğinin herhangi bir noktasındaki teğetin eğimi ile elde edilir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Çeşitli deney sonuçlarına göre katkı maddelerinin orijinal bitüm ve bitümlü karışım özelliklerinde meydana getirdiği değişimler değerlendirilmiştir. Bitümlere viskozite testleri, yumuşama noktası testleri, düktilite testleri, Superpave bağlayıcı şartnamesi kapsamında yer alana DSR ve BBR testleri; bitümlü karışımlara ise Marshall ve soyulma testleri uygulanmıştır. Sonuçlar yorumlanmış ve literatür değerleriyle karşılaştırılarak tartışılmıştır.

6.1. Viskozite Test Sonuçları

Viskozite, akmaya karşı direncin ölçüsüdür ve akışkanın kıvamlılığını tarif etmek için kullanılır. Bitümün kıvamlılığı arttıkça viskozite değeri yükselir. Sıcaklık, viskozite ölçümlerini etkileyen ana faktördür. Sıcaklık yükseldikçe viskozite değeri azalır, sıcaklık azaldıkça viskozite değeri artar.

Viskozite, bitümleri sınıflandırmak için de kullanılabilen önemli bir deney yöntemidir. Bu deney sonuçlarına göre bitümlerin değişik sıcaklıklardaki akıcılık özellikleri arasında kıyaslama yapılabilir. Çalışmada, viskozite testleriyle orijinal ve modifiye bitümlerin belli sıcaklıklardaki davranış biçimleri karşılaştırılmış, testin aynı bitüm ile farklı sıcaklıklarda tekrarlanmasıyla bitümdeki sıcaklığa bağlı davranış değişiklikleri incelenmiş ve modifiye bitümlerin plentte agrega ile karışım, yola serim ve sıkıştırma gibi kullanım sıcaklıklarının ne şekilde etkilendiği belirlenmiştir. Çalışma kapsamında orijinal ve değişik oranlarda katkı maddesi içeren bitümlere 50°C-160°C aralığında viskozite testleri uygulanarak katkı maddelerinin bitümün çalışma sıcaklıkları üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Viskozite testleri, orijinal ve farklı miktarlarda katkı maddeleri içeren modifiye bitümlere ASTM D4402-87 (Standard Test Method for Viscosity

Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus) şartlarına uygun olarak uygulanmıştır. Testler; 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C ve 160°C’de gerçekleştirilmiştir.

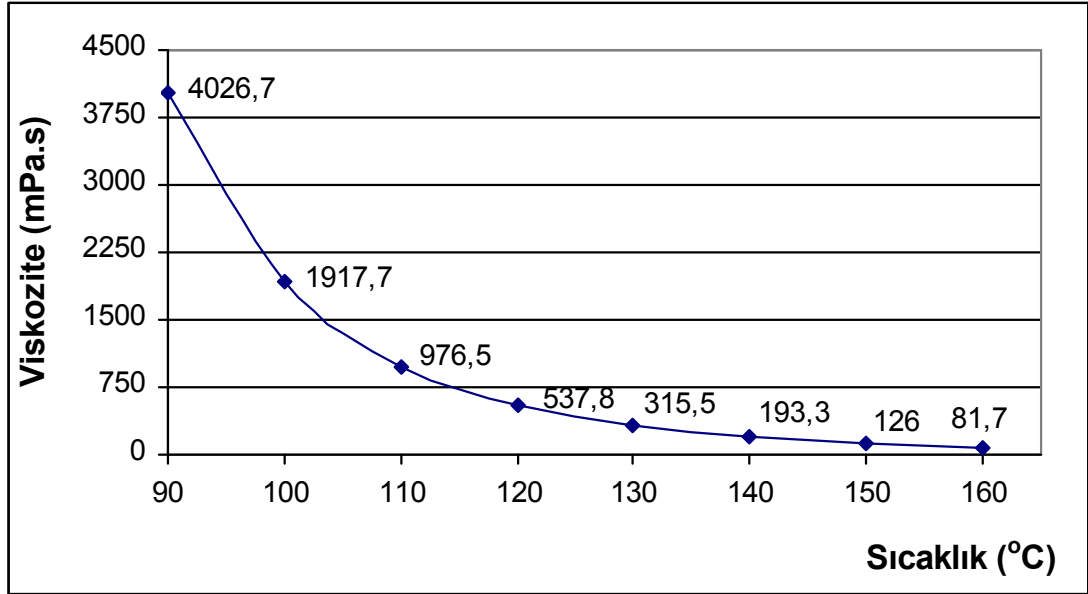
6.1.1. Orijinal bitümün viskozite test sonuçları

Viskozite testleri, çalışmada kullanılan 50/70 penetrasyon dereceli orijinal bitüm için ilk aşamada 90°C-160°C aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu aralıktaki 8 farklı sıcaklıkta ölçülen toplam 29 viskozite değeri Çizelge 6.1’de ve bu değerlere ait grafiksel gösterim Şekil 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Orijinal bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite Ölçümleri (mPa.s)					Ortalama Viskozite (mPa.s)
160	80	80	80	86,67		81,7
150	123	126,7	126,7	126,7	126,7	126,0
140	193,3	193,3	193,3	193,3		193,3
130	320	313,3	313,3			315,5
120	543	533,3	535	540		537,8
110	983	973,3	973,3			976,5
100	1940	1920	1893			1917,7
90	4100	4000	3980			4026,7

Çizelge 6.1’de görüldüğü üzere her bir deney sıcaklığında mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden olmak üzere en az üç ölçüm yapılmıştır. Herhangi bir sıcaklıktaki viskozite değeri ise bu sıcaklıkta yapılan ölçümlerin ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir.



Şekil 6.1. Orijinal bitüme ait viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Şekil 6.1’de orijinal bitüme ait viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi grafiksel olarak sunulmuştur. Grafikten de görülebildiği üzere, sıcaklık arttıkça viskozite değerleri üstel olarak azalmaktadır ve daha yüksek sıcaklıklarda viskozite değerlerindeki azalma hızı yavaşlamaktadır. Sıcaklık 90°C’den 100°C’ye yükseldiğinde viskozite %52,4 oranında azalırken 150°C’den 160°C’ye yükseldiğinde %35,2 oranında azalmaktadır.

6.1.2. Organik esaslı magnezyum bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları

Orijinal bitüme ağırlıkça %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında OEMAGB ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu bitümlere 90°C ile 160°C aralığındaki sekiz farklı deney sıcaklığında toplam 158 adet viskozite ölçümü uygulanmıştır. Farklı oranda OEMAGB içeren her bir modifiye bitümle;

- Her bir deney sıcaklığında üç ile sekiz arasında değişen sayıda ölçüm yapılmıştır.

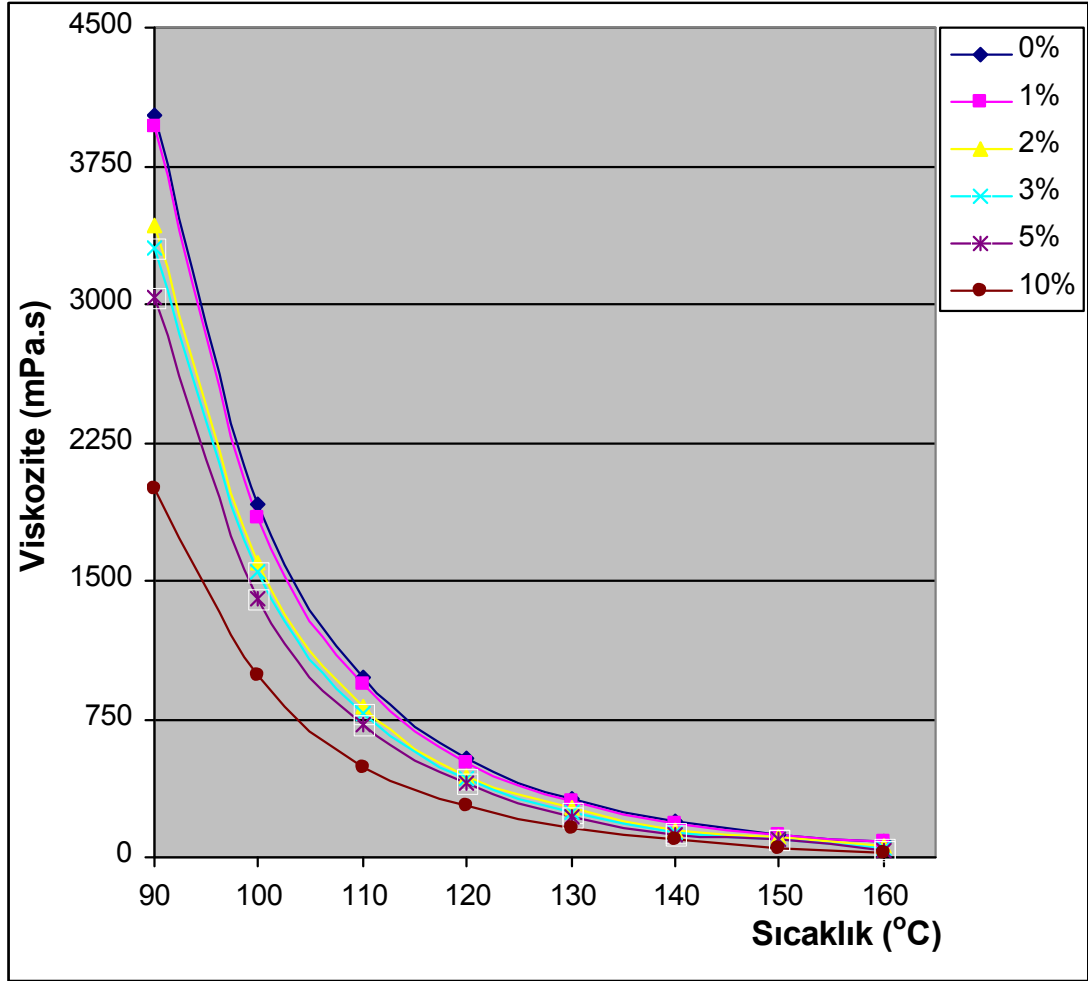
- Ölçüm yapılan her bir deney sıcaklığında bitümün sahip olduğu viskozite değeri o sıcaklıktaki ölçüm değerlerinin ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir.

Çizelge 6.2’de orijinal ve OEMAGB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklarda elde edilen ortalama viskozite değerleri mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden verilmiştir. OEMAGB katkılı bitümlere ait tüm viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler ise EK-7A’da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Orijinal ve OEMAGB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)

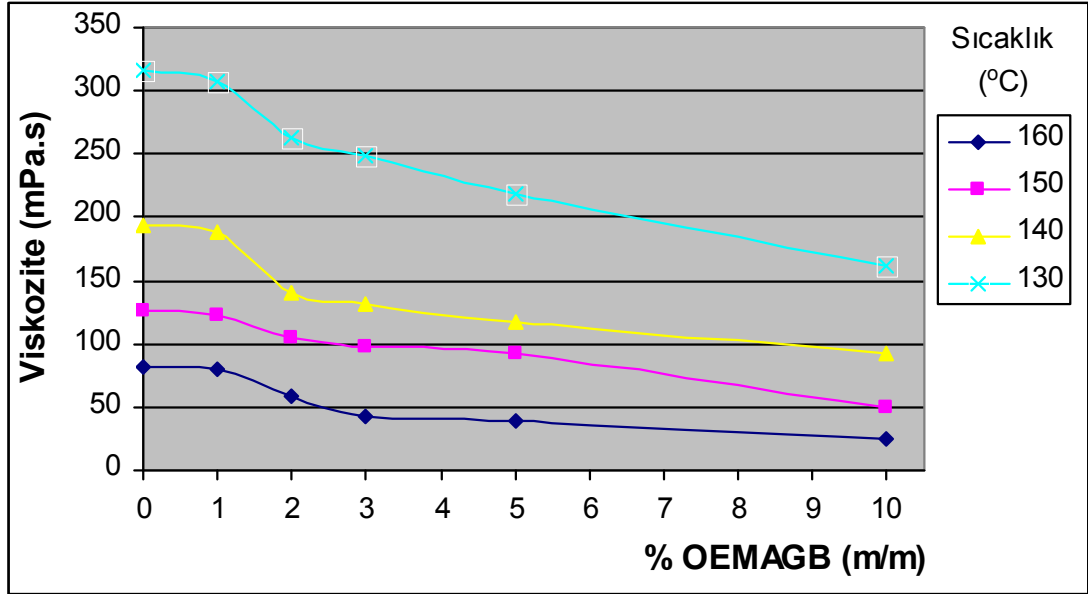
Sıcaklık (°C)	Bitümün İhtiva Ettiği OEMAGB Oranı (Ağırlıkça)					
	%0	%1	%2	%3	%5	%10
160	81,7	80,0	58,3	43,3	38,3	25,0
150	126,0	123,4	105,0	97,8	92,5	50,0
140	193,3	188,9	140,5	131,1	117,8	92,2
130	315,5	306,6	262,8	248,3	219,0	161,5
120	537,8	517,1	433,3	423,4	398,9	282,5
110	976,5	935,0	816,7	783,2	720,0	488,3
100	1917,7	1837,3	1603,3	1545,0	1404,3	993,4
90	4026,7	3968,5	3430,6	3300,3	3031,0	2002,0

Sıcaklığın viskozite üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu Çizelge 6.2’de verilen ölçüm sonuçlarından anlaşılmaktadır. Sıcaklık arttıkça gerek orijinal gerekse modifiye bitümlerin viskoziteleri hızla azalmaktadır. Bu durum Çizelge 6.2’deki değerlerin grafiksel olarak sunulduğu Şekil 6.2’de görülebilmektedir. Şekil 6.2’de, bunun yanı sıra, OEMAGB ile modifikasyonun bitümün viskozitesinde azalma meydana getirdiği de görülmektedir.

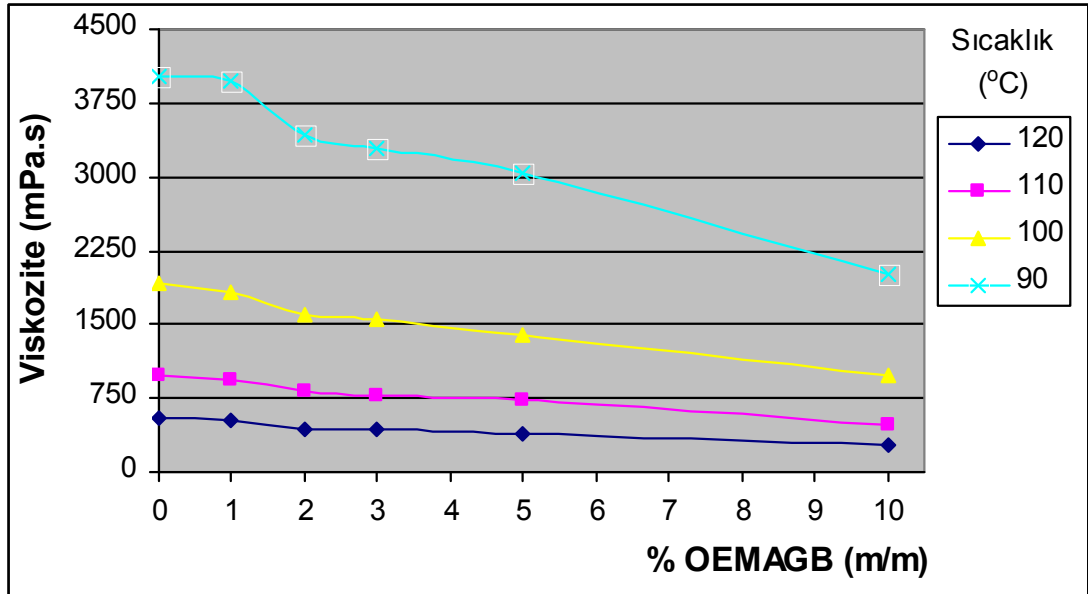


Şekil 6.2. Orijinal ve OEMAGB katkıli bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

Bu durumu daha iyi değerlendirebilmek üzere Çizelge 6.2’de verilen viskozite sonuçlarının katkı maddesi oranlarına (konsantrasyon) göre değişimleri tüm deney sıcaklıkları için incelenmiştir. Çizelge 6.2’de verilen viskozite değerleri geniş bir aralıkta dağılım gösterdiklerinden ötürü bu değişim Şekil 6.3a ve Şekil 6.3b olmak üzere iki farklı grafiksel gösterim halinde sunulmuştur. Şekil 6.3a’da 130°C ile 160°C, Şekil 6.3b’de ise 90°C ile 120°C arasındaki deney sıcaklıkları için bitüm viskozitesinin katkı maddesi oranına (konsantrasyon) bağlı olarak değişimleri sunulmuştur.



Şekil 6.3a. Bitüm viskozitesinin OEMAGB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında)



Şekil 6.3b. Bitüm viskozitesinin OEMAGB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında)

Şekil 6.2, Şekil 6.3a ve Şekil 6.3b'nin incelenmesiyle OEMAGB'nin bitüm davranışında meydana getirdiği değişiklikler şöyle özetlenebilir;

- Orijinal bitüm, OEMAGB ile modifiye edildiğinde viskozitesinde azalma oluşmaktadır.
- OEMAGB konsantrasyonu arttıkça bitümün viskozitesindeki azalma da artmaktadır.
- Sıcaklık azaldıkça, genel olarak, OEMAGB modifikasyonunun viskozite üzerindeki azaltıcı etkisi miktar olarak artmaktadır.

Modifikasyon sonucu oluşan ve yukarıda özetlenen sonuçlar Çizelge 6.3'te verilen değerler ile daha kolay anlaşılabilir. Çizelge 6.3'te OEMAGB modifikasyonu ile orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından oluşan değişimler bitüme eklenen katkı maddesi oranlarına göre verilmiştir. Çizelgedeki her bir hücrede bulunan ilk değer modifikasyon sonucu orijinal viskoziteye göre oluşan değişim miktarını, ikinci değer ise orijinal viskoziteye göre oluşan oransal (%) değişimi ifade etmektedir.

Çizelge 6.3. OEMAGB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Orijinal Bitüme İlave Edilen OEMAGB Oranı (Ağırlıkça)				
	%1	%2	%3	%5	%10
160	-1,7/2,1	-23,4/28,6	-38,4/47	-43,4/53,1	-56,7/69,4
150	-2,6/2,1	-21/16,7	-28,2/22,4	-33,5/26,6	-76/60,3
140	-4,4/2,3	-52,8/27,3	-62,2/32,2	-75,5/39,1	-101,1/52,3
130	-8,9/2,8	-52,7/16,7	-67,2/21,3	-96,5/30,6	-154/48,8
120	-20,7/3,8	-104,5/19,4	-114,4/21,3	-138,9/25,8	-255,3/47,5
110	-41,5/4,2	-159,8/16,4	-193,3/19,8	-256,5/26,3	-488,2/50
100	-80,4/4,2	-314,4/16,4	-372,7/19,4	-513,4/26,8	-924,3/48,2
90	-58,2/1,4	-596,1/14,8	-726,4/18	-995,7/24,7	-2024,7/50,3

Çizelge 6.3'teki değerler incelendiğinde ölçüm yapılan sıcaklıklar çerçevesinde modifiye bitümün içerdiği katkı maddesi oranı arttıkça viskozitedeki değişim miktarının ve değişim oranının gittikçe arttığı

görülmektedir. OEMAGB modifikasyonu orijinal bitüm viskozitesini %69,4'e varan oranlarda azaltabilmektedir. Miktar bakımından incelendiğinde ise OEMAGB modifikasyonu ile orijinal bitüm viskozitesinde meydana gelen en büyük azalma 2024,7 mPa.s'tır.

Viskozite test sonuçları; OEMAGB ile modifikasyonun, bitüm davranışında etkili bir değişim meydana getirdiğini göstermektedir. OEMAGB ile modifiye edilerek orijinal durumuna göre daha akıcı (yumuşak) özellikte bitüm elde edilmektedir. Bu tür özelliğe sahip bitümlerin esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara karşı daha dirençli oldukları [4] ve soğuk iklimin hakim olduğu kuzey ülkelerinde tercih edildikleri [40] belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, bitümün OEMAGB ile modifikasyonunun meydana getirdiği değişim;

- Agregaya ile bitümün karıştırılma sıcaklığı (plant sıcaklığı),
- Bitümde yüksek karıştırma sıcaklığı sebebiyle meydana gelen yaşlanma,
- Bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji,
- Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği,
- Agregaya ile bitüm arasındaki adezyon,
- Bitümlü karışımların soyulma direnci

hususlarında da olumlu sonuçlar oluşturabilecek özelliklere sahiptir. Buna göre, OEMAGB modifikasyonlu bitüm kullanımı ile plant sıcaklığı, bitümün kısa dönem yaşlanması, bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji ve esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlaklar azaltılabilirken bitümlü karışımların işlenebilirliği, agrega-bitüm arasındaki adezyon kuvveti ve agrega-bitüm karışımlarının soyulmaya karşı direnci artırılabilir.

Bitümün çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilerek düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna [38, 44] ve bitümlü karışımlarda meydana gelen soyulmaya [28,

45] karşı direncinin arttırılabileceğini belirten araştırmalar mevcuttur. Bitümün düşük sıcaklıklardaki çatlama direncinin belirlenmesinde BBR testi kullanılabilir. Bu test sonucuna göre modifiye bitümler için sünme rijitliğinde %20 oranında azalma ve sünme oranında %1,25 oranında değişim oluşan bir araştırmada bitümün modifikasyon sonucu çatlama direncinin önemli ölçüde iyileştirildiği belirtilmektedir [30].

Bitümün modifiye edilerek daha yumuşak özellik kazandırılması ile plent sıcaklığının azaltılacağı ve buna bağlı olarak enerji tüketimi ve emisyonun azaltılacağı ifade edilmektedir [40]. Plent sıcaklığının azaltılmasıyla bitümde yüksek sıcaklık sebebiyle meydana gelen yaşlanma miktarı da azalacaktır.

Çalışma kapsamında sentezlenen ve bitüm modifikasyonunda kullanılan tüm organik esaslı metal bileşiklerine ait viskozite test sonuçları sunumundan sonra yukarıda özetlenen sonuçlarla ilgili geniş bir tartışma yapılarak bitümde bu tür modifikasyonun sağlayacağı tüm avantajlar belirtilmiştir.

6.1.3. Organik esaslı borik asit bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları

Orijinal bitüme ağırlıkça %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında OEABAB ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu bitümlere 90°C ile 160°C aralığındaki sekiz farklı deney sıcaklığında toplam 198 adet viskozite ölçümü uygulanmıştır. Farklı miktarda OEABAB içeren her bir modifiye bitümle;

- Her bir deney sıcaklığında üç ile dokuz arasında değişen sayıda ölçüm yapılmıştır.
- Ölçüm yapılan her bir deney sıcaklığında bitümün sahip olduğu viskozite değeri o sıcaklıktaki ölçümlerin ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir.

Çizelge 6.4'te orijinal ve OEABAB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklarda elde edilen ortalama viskozite değerleri mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden

verilmiştir. OEABAB katkılı bitümlere ait tüm viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler ise EK-8A'da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

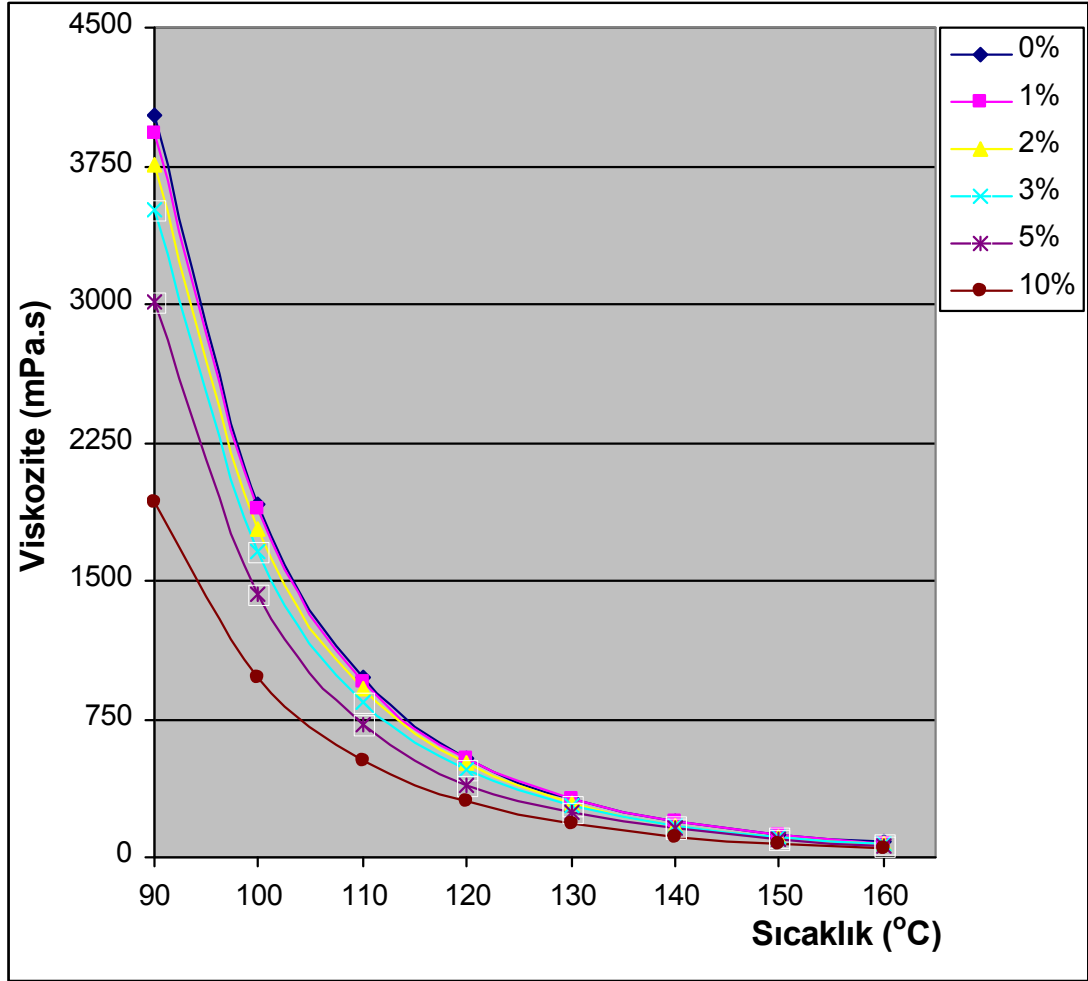
Çizelge 6.4. Orijinal ve OEABAB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Bitümün İhtiva Ettiği OEABAB Oranı					
	0%	1%	2%	3%	5%	10%
160	81,7	77,8	73,6	70,8	65,9	48,0
150	126,0	121,7	110,0	106,7	96,3	72,7
140	193,3	191,3	176,7	173,3	153,3	111,3
130	315,5	313,7	292,2	280,5	239,3	181,2
120	537,8	531,1	506,7	470,5	387,6	298,8
110	976,5	955,9	918,7	839,3	722,2	518,3
100	1917,7	1887,0	1777,7	1660,0	1429,2	974,9
90	4026,7	3923,5	3755,3	3509,0	3011,0	1926,7

Çizelge 6.4'teki değerler viskozitenin sıcaklıkla yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Sıcaklıktaki artış viskozitede hızlı azalmaya sebep olmaktadır.

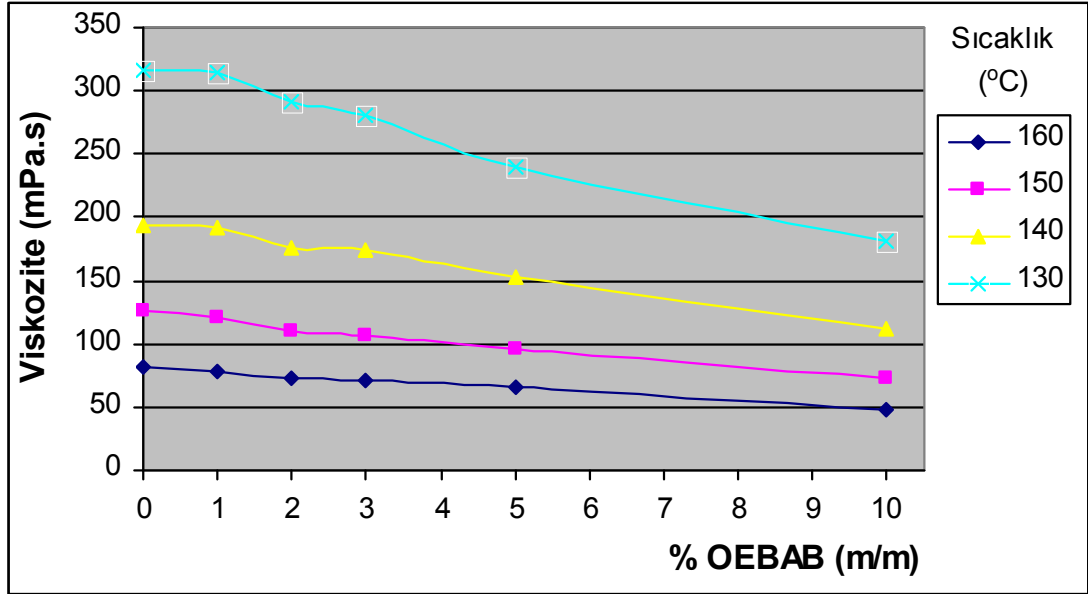
Şekil 6.4'te orijinal (katkısız) ve değişik oranlarda (%1, %2, %3, %5, %10) OEABAB katkılı bitümlerin viskozite özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri toplu halde sunulmuştur.

Şekil 6.4'teki grafiksel gösterimde sıcaklık arttığında viskozite değerlerinin üstel olarak azaldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, OEABAB'nin bitüme eklenmesi ile bitümün viskozitesinde azalma oluştuğu da görülebilmektedir.

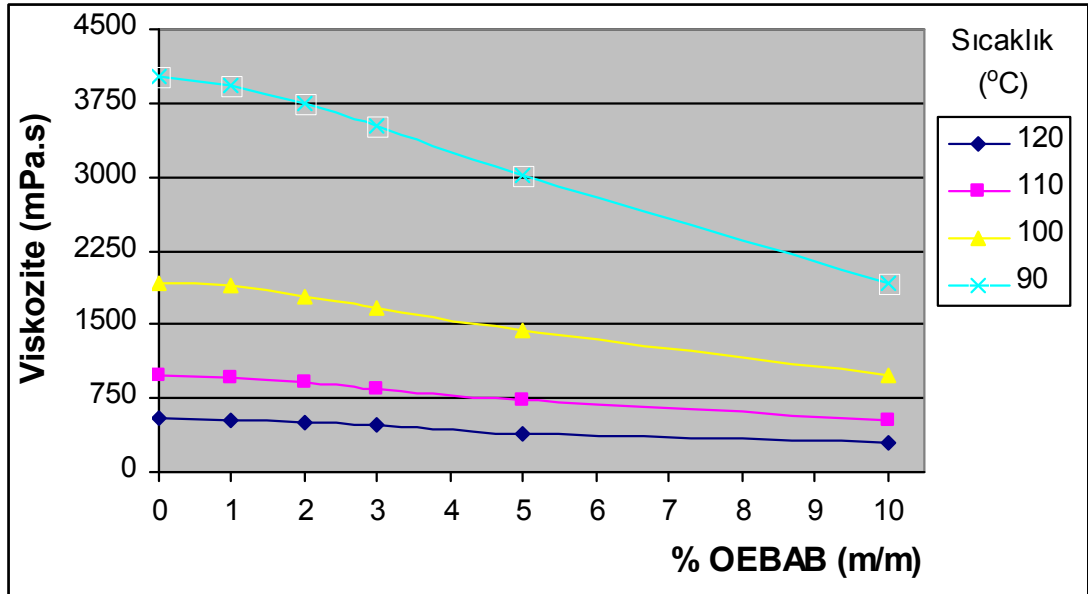


Şekil 6.4. Orijinal ve OEABAB katkıli bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

Çizelge 6.4'te verilen viskozite sonuçlarının katkı maddesi oranlarına (konsantrasyon) göre değişimleri tüm deney sıcaklıkları için incelenmiştir. Viskozite değerleri geniş bir aralıkta dağılım gösterdiklerinden ötürü bu değişim de önceki katkı maddelerinde olduğu gibi Şekil 6.5a'da ve Şekil 6.5b'de olmak üzere iki farklı grafiksel gösterim halinde sunulmuştur. Şekil 6.5a'da 130°C ile 160°C, Şekil 6.5b'de ise 90°C ile 120°C arasındaki deney sıcaklıkları için bitüm viskozitesinin katkı maddesi miktarına (konsantrasyon) bağlı olarak değişimleri sunulmuştur.



Şekil 6.5a. Bitüm viskozitesinin OEBAB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında)



Şekil 6.5b. Bitüm viskozitesinin OEBAB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında)

Şekil 6.4, Şekil 6.5a ve Şekil 6.5b incelenmesiyle OEBAB'nin bitüm davranışında meydana getirdiği değişiklikler şöyle özetlenebilir;

- Bitüm, OEABAB ile modifiye edildiğinde viskozitesinde azalma oluşmaktadır.
- OEABAB konsantrasyonu arttıkça bitümün viskozitesindeki azalma da artmaktadır.
- Sıcaklık azaldıkça, genel olarak, OEABAB modifikasyonunun viskozite üzerindeki azaltıcı etkisi miktar olarak artmaktadır.

Yukarıda özet olarak verilen sonuçlar Çizelge 6.5'te sunulan değerler ile daha kolay anlaşılabilir. Çizelge 6.5'te OEABAB modifikasyonu ile orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından oluşan değişimler bitüme eklenen katkı maddesi oranlarına göre verilmiştir. Çizelgedeki her bir hücrede bulunan ilk değer orijinal viskoziteye göre oluşan değişim miktarını (mPa.s cinsinden), ikinci değer ise orijinal viskoziteye göre oluşan oransal (%) değişimi ifade etmektedir.

Çizelge 6.5. OEABAB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Orijinal Bitüme İlave Edilen OEABAB Oranı (Ağırlıkça)				
	%1	%2	%3	%5	%10
160	-3,9/4,8	-8,1/9,9	-10,9/13,3	-15,8/19,3	-33,7/41,2
150	-4,3/3,4	-16/12,7	-9,3/15,3	-29,7/23,6	-53,3/42,3
140	-2,0/1,0	-16,6/8,6	-20/10,3	-40/20,7	-82/42,4
130	-1,8/0,6	-23,3/7,4	-35/11,1	-76,2/24,2	-134,3/42,6
120	-6,7/1,2	-31,1/5,8	-67,3/12,5	-150,2/27,9	-239/44,4
110	-20,6/2,1	-57,8/5,9	-137,2/14,1	-254,3/26	-458,2/46,9
100	-30,7/1,6	-140/7,3	-257,7/13,4	-488,5/25,5	-942,8/49,2
90	-103,2/2,6	-271,4/6,7	-517,7/12,9	-1015,7/25,2	-2100/52,2

Çizelge 6.5'teki değerler incelendiğinde ölçüm yapılan sıcaklıklar çerçevesinde bitümdeki katkı maddesi içeriği arttıkça viskozitedeki değişim miktarının ve değişim oranının gittikçe arttığı görülmektedir. OEABAB ile

modifikasyon orijinal bitüm viskozitesini %52,2'ye varan oranlarda azaltabilmektedir. Miktar bakımından incelendiğinde ise OEABAB modifikasyonu ile meydana gelen en büyük azalma 2100 mPa.s'tır.

Viskozite test sonuçları; OEABAB ile modifikasyonun, bitüm davranışında etkili bir değişim meydana getirdiğini göstermektedir. OEABAB ile modifiye edilerek orijinal durumuna göre daha akıcı (yumuşak) özellikte bitüm elde edilmektedir. Bu tür özelliğe sahip bitümlerin esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara karşı daha dirençli oldukları [4] ve soğuk iklimin hakim olduğu kuzey ülkelerinde tercih edildikleri [40] bilinmektedir. Bunun yanı sıra, bitümün OEABAB ile modifikasyonunun meydana getirdiği değişim;

- Agregata ile bitümün karıştırılma sıcaklığı (plant sıcaklığı),
- Bitümde yüksek karıştırma sıcaklığı sebebiyle meydana gelen yaşlanma,
- Bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji,
- Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği,
- Agregata ile bitüm arasındaki adezyon,
- Bitümlü karışımların soyulma direnci

hususlarında da olumlu sonuçlar oluşturabilecek özelliklere sahiptir. Buna göre, OEABAB modifikasyonlu bitüm kullanımı ile plant sıcaklığı, bitümün kısa dönem yaşlanması, bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji ve esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlaklar azaltılabilirken bitümlü karışımların işlenebilirliği, agregata-bitüm arasındaki adezyon kuvveti ve agregata-bitüm karışımlarının soyulmaya karşı direnci artırılabilir.

Bitümün çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilerek düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna [38, 44] ve bitümlü karışımlarda meydana gelen soyulmaya [28, 45] karşı direncinin artırılabilirliğini belirten araştırmalar mevcuttur. Ayrıca

bitümün modifiye edilerek daha yumuşak özellik kazandırılması ile plent sıcaklığının azaltılacağı ve buna bağlı olarak enerji tüketimi ve emisyonun azaltılacağı ifade edilmektedir [40]. Plent sıcaklığının azaltılmasıyla bitümde yüksek sıcaklık sebebiyle meydana gelen yaşlanma miktarı da azalacaktır.

Çalışma kapsamında sentezlenen ve bitüm modifikasyonunda kullanılan tüm organik esaslı metal bileşiklerine ait viskozite test sonuçları sunumundan sonra yukarıda özetlenen sonuçlarla ilgili geniş bir tartışma yapılarak bitümde bu tür modifikasyonun sağlayacağı tüm avantajlar sebep ve ayrıntılarıyla belirtilmiştir.

6.1.4. Organik esaslı mangan bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları

Orijinal bitüme ağırlıkça %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında OEMANB ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu bitümlere 90°C ile 160°C aralığındaki sekiz farklı deney sıcaklığında toplam 178 adet viskozite ölçümü uygulanmıştır. Farklı miktarda OEMANB içeren her bir modifiye bitümle;

- Her bir deney sıcaklığında üç ile yedi arasında değişen sayıda ölçüm yapılmıştır.
- Ölçüm yapılan her bir deney sıcaklığında bitümün sahip olduğu viskozite değeri o sıcaklıktaki ölçümlerin ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir.

Çizelge 6.6'da orijinal ve OEMANB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklarda elde edilen ortalama viskozite değerleri mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden verilmiştir. OEMANB katkılı bitümlere ait tüm viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler ise EK-9A'da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

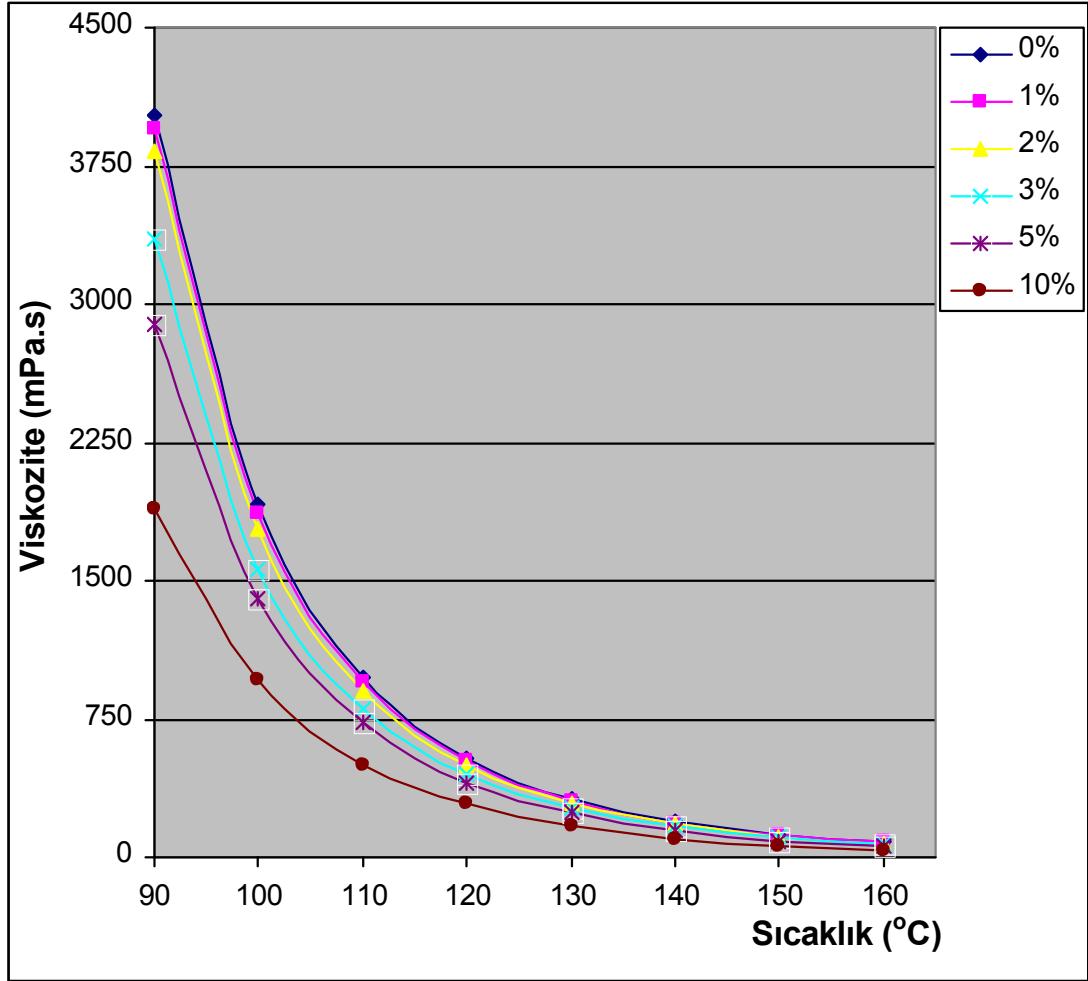
Çizelge 6.6. Orijinal ve OEMANB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Bitümün ihtiva ettiği OEMANB Bileşiği Oranı					
	0%	1%	2%	3%	5%	10%
160	81,7	79,6	77,8	70,6	60,0	42,3
150	126	120,6	114,0	106,6	91,1	63,3
140	193,3	187,3	178,8	170,0	148,6	97,4
130	315,5	308,0	295,4	267,2	244,9	165,0
120	537,8	528,8	504,1	452,0	407,5	287,5
110	976,5	950,7	908,3	808,3	725,9	495,0
100	1917,7	1863,5	1780,0	1566,7	1403,0	964,2
90	4026,7	3946,8	3826,8	3353,0	2889,3	1884,3

Çizelge 6.6'daki değerler viskozitenin sıcaklıkla yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Sıcaklıktaki artış viskozitede hızlı azalmaya sebep olmaktadır.

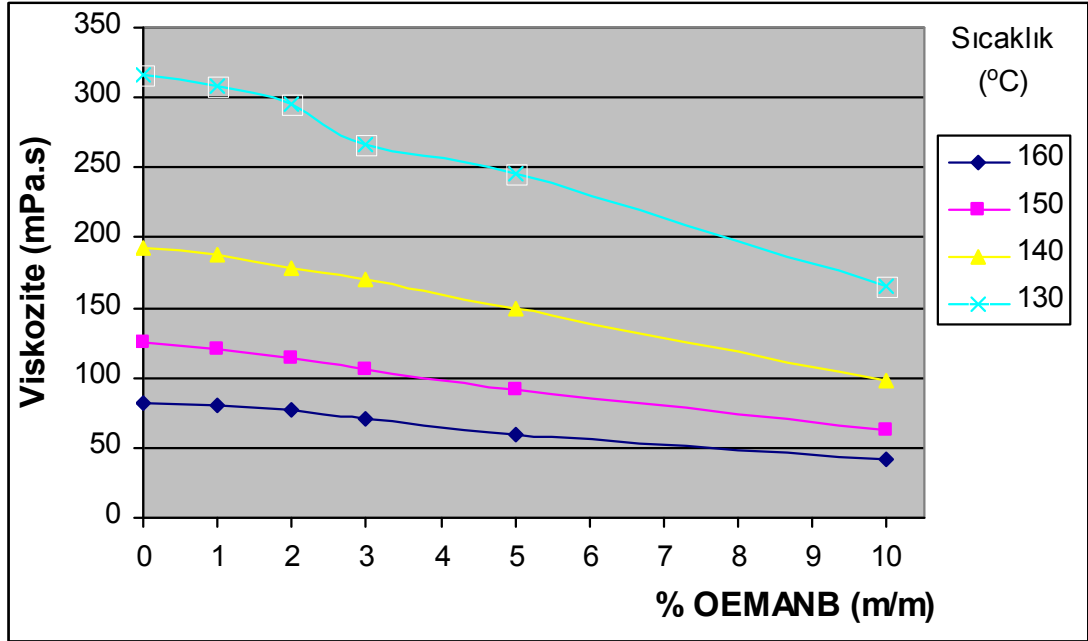
Şekil 6.6'da orijinal (katkısız) ve değişik oranlarda (%1, %2, %3, %5, %10) OEMANB katkılı bitümlerin viskozite özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri toplu halde sunulmuştur.

Şekil 6.6'daki grafiksel gösterimde sıcaklık arttığında viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, OEMANB'nin bitüme eklenmesi ile bitümün viskozitesinde azalma oluştuğu da görülebilmektedir.

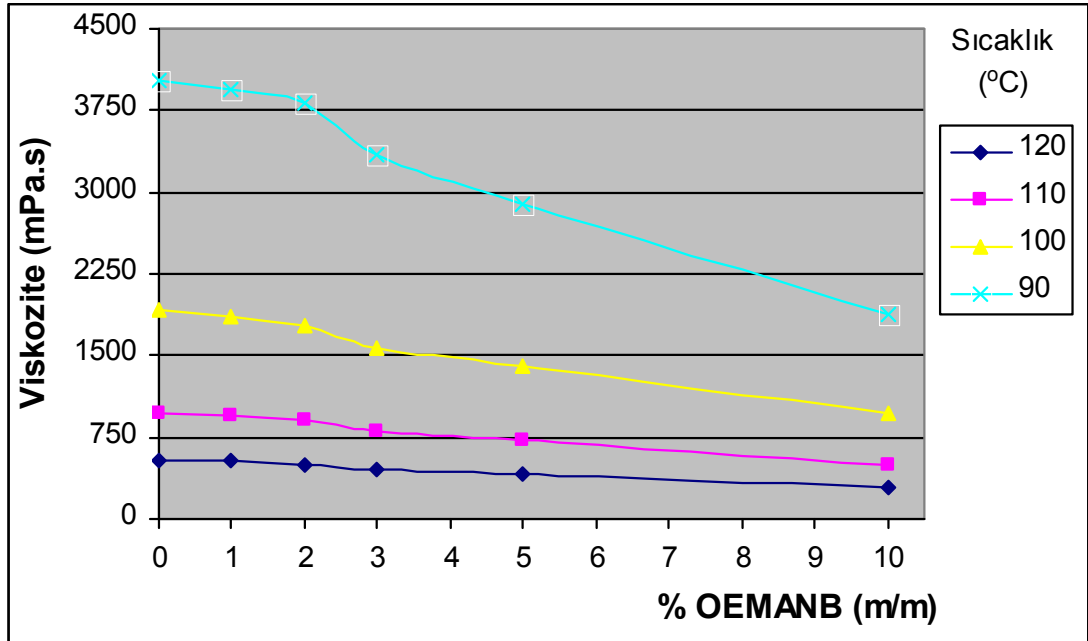


Şekil 6.6. Orijinal ve OEMANB katkıli bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

Çizelge 6.6'da verilen viskozite sonuçlarının katkı maddesi miktarlarına (konsantrasyon) göre değişimleri tüm deney sıcaklıkları için incelenmiştir. Viskozite değerleri geniş bir aralıkta dağılım gösterdiklerinden ötürü bu değişim de önceki katkı maddelerinde olduğu gibi Şekil 6.7a'da ve Şekil 6.7b'de olmak üzere iki farklı grafiksel gösterim halinde sunulmuştur. Şekil 6.7a'da 130°C ile 160°C, Şekil 6.7b'de ise 90°C ile 120°C arasındaki deney sıcaklıkları için bitüm viskozitesinin katkı maddesi miktarına (konsantrasyon) bağlı olarak değişimleri sunulmuştur.



Şekil 6.7a. Bitüm viskozitesinin OEMANB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında)



Şekil 6.7b. Bitüm viskozitesinin OEMANB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında)

Şekil 6.6, Şekil 6.7a ve Şekil 6.7b incelenmesiyle OEMANB'nin bitüm davranışında meydana getirdiği değişiklikler şöyle özetlenebilir;

- Bitüm, OEMANB ile modifiye edildiğinde viskozitesinde azalma oluşmaktadır.
- OEMANB konsantrasyonu arttıkça bitümün viskozitesindeki azalma da artmaktadır.
- Sıcaklık azaldıkça OEMANB modifikasyonunun viskozite üzerindeki azaltıcı etkisi miktar olarak artmaktadır.

Çizelge 6.7’de OEMANB modifikasyonu ile orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından oluşan değişimler bitüme eklenen katkı maddesi oranlarına göre verilmiştir. Çizelgedeki her bir hücrede bulunan ilk değer orijinal viskoziteye göre oluşan değişim miktarını (mPa.s cinsinden), ikinci değer ise orijinal viskoziteye göre oluşan oransal (%) değişimi ifade etmektedir.

Çizelge 6.7. OEMANB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Orijinal Bitüme İlave Edilen OEMANB Oranı (Ağırlıkça)				
	%1	%2	%3	%5	%10
160	-2,1/2,6	-3,9/4,8	-11,1/13,6	-21,7/26,6	-39,4/48,2
150	-5,4/4,3	-12/9,5	-19,4/15,4	-34,9/27,7	-62,7/49,8
140	-6/3,1	-14,5/7,5	-23,3/12,1	-44,7/23,1	-95,9/49,6
130	-7,5/2,4	-20,1/6,4	-48,3/15,3	-70,6/22,4	-150,5/47,7
120	-9/1,7	-33,7/6,3	-85,8/16	-130,3/24,2	-250,3/46,5
110	-25,8/2,6	-68,2/7	-168,2/17,2	-250,6/25,7	-481,5/49,3
100	-54,2/2,8	-137,7/7,2	-351/18,3	-514,7/26,8	-953,5/49,7
90	-79,9/2	-199,9/5	-673,7/16,7	-1137,4/28,2	-2142,4/53,2

Çizelge 6.7’deki değerler incelendiğinde ölçüm yapılan sıcaklıklar çerçevesinde bitümdeki katkı maddesi içeriği arttıkça viskozitedeki değişim miktarının ve değişim oranının gittikçe arttığı görülmektedir. OEMANB modifikasyonu orijinal bitüm viskozitesini %53,2’ye varan oranlarda

azaltabilmektedir. Miktar bakımından incelendiğinde ise OEMANB modifikasyonu ile meydana gelen en büyük azalma 2142,4 mPa.s'tır.

Viskozite test sonuçları; OEMANB ile modifikasyonun, bitüm davranışında etkili bir değişim meydana getirdiğini göstermektedir. OEMANB ile modifiye edilerek orijinal durumuna göre daha akıcı (yumuşak) özellikte bitüm elde edilmektedir. Bu tür özelliğe sahip bitümlerin esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara karşı daha dirençli oldukları [4] ve soğuk iklimin hakim olduğu kuzey ülkelerinde tercih edildikleri [40] belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, bitümün OEMANB ile modifikasyonunun meydana getirdiği değişim;

- Agregaya ile bitümün karıştırılma sıcaklığı (plant sıcaklığı),
- Bitümde yüksek karıştırma sıcaklığı sebebiyle meydana gelen yaşlanma,
- Bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji,
- Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği,
- Agregaya ile bitüm arasındaki adezyon,
- Bitümlü karışımların soyulma direnci

hususlarında da olumlu sonuçlar oluşturabilecek özelliklere sahiptir. Buna göre, OEMANB modifikasyonlu bitüm kullanımı ile plant sıcaklığı, bitümün kısa dönem yaşlanması, bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji ve esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlaklar azaltılabilirken bitümlü karışımların işlenebilirliği, agrega-bitüm arasındaki adezyon kuvveti ve agrega-bitüm karışımlarının soyulmaya karşı direnci artırılabilir.

Bitümün çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilerek düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna [38, 44] ve bitümlü karışımlarda meydana gelen soyulmaya [28, 45] karşı direncinin artırılabilirliğini belirten araştırmalar mevcuttur. Ayrıca bitümün modifiye edilerek daha yumuşak özellik kazandırılması ile plant

sıcaklığının azaltılacağı ve buna bağlı olarak enerji tüketimi ve emisyonun azaltılacağı ifade edilmektedir [40]. Plent sıcaklığının azaltılmasıyla bitümde yüksek sıcaklık sebebiyle meydana gelen yaşlanma miktarı da azalacaktır.

Çalışma kapsamında sentezlenen ve bitüm modifikasyonunda kullanılan tüm organik esaslı metal bileşiklerine ait viskozite test sonuçları sunumundan sonra yukarıda özetlenen sonuçlarla ilgili geniş bir tartışma yapılarak bitümde bu tür modifikasyonun sağlayacağı tüm avantajlar sebep ve ayrıntılarıyla belirtilmiştir.

6.1.5. Organik esaslı çinko bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları

Orijinal bitüme ağırlıkça %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında OEÇB ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu bitümlere 90°C ile 160°C arasındaki sekiz farklı deney sıcaklığında toplam 187 adet viskozite ölçümü uygulanmıştır. Farklı miktarda OEÇB içeren her bir modifiye bitümle;

- Her bir deney sıcaklığında üç ile onbir arasında değişen sayıda ölçüm yapılmıştır.
- Ölçüm yapılan deney sıcaklığında bitümün sahip olduğu viskozite değeri o sıcaklıktaki ölçümlerin ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir.

Çizelge 6.8'de orijinal ve OEÇB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklarda elde edilen ortalama viskozite değerleri mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden verilmiştir. OEÇB katkılı bitümlere ait tüm viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler ise EK-10A'da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

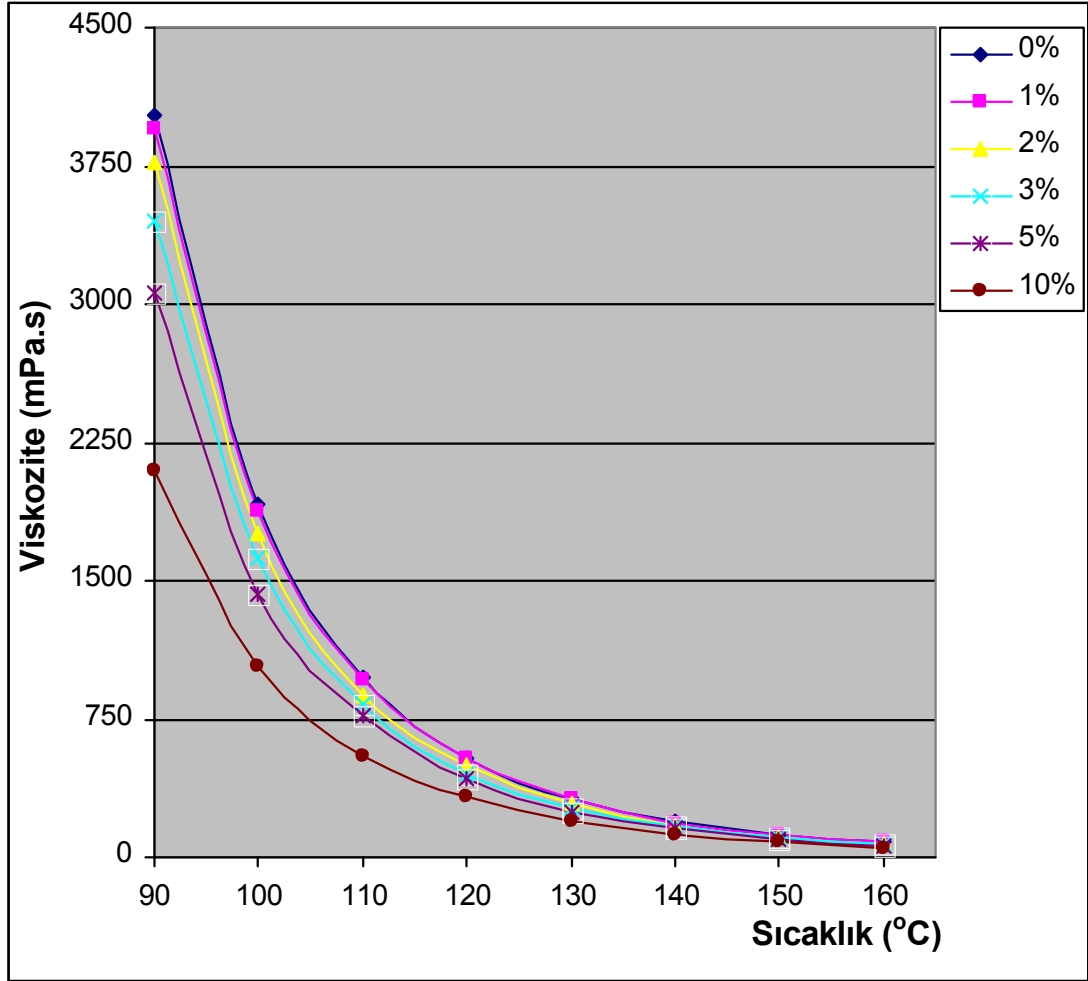
Çizelge 6.8. Orijinal ve OEÇB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Bitümün İhtiva Ettiği OEÇB Bileşimi Oranı					
	0%	1%	2%	3%	5%	10%
160	81,7	80,0	76,7	72,5	65,8	53,7
150	126,0	123,4	113,7	104,7	97,1	83,0
140	193,3	187,8	175,0	164,9	155,8	120,8
130	315,5	311,7	289,1	269,7	238,7	193,3
120	537,8	531,9	499,2	448,9	424,1	329,2
110	976,5	959,6	874,1	826,7	770,0	544,0
100	1917,7	1878,6	1761,8	1621,8	1430,6	1033,3
90	4026,7	3955,3	3766,0	3456,8	3057,5	2098,5

Çizelge 6.8'deki değerler incelendiğinde anlaşılabileceği üzere sıcaklıktaki artış viskozitede hızlı azalmaya sebep olmaktadır.

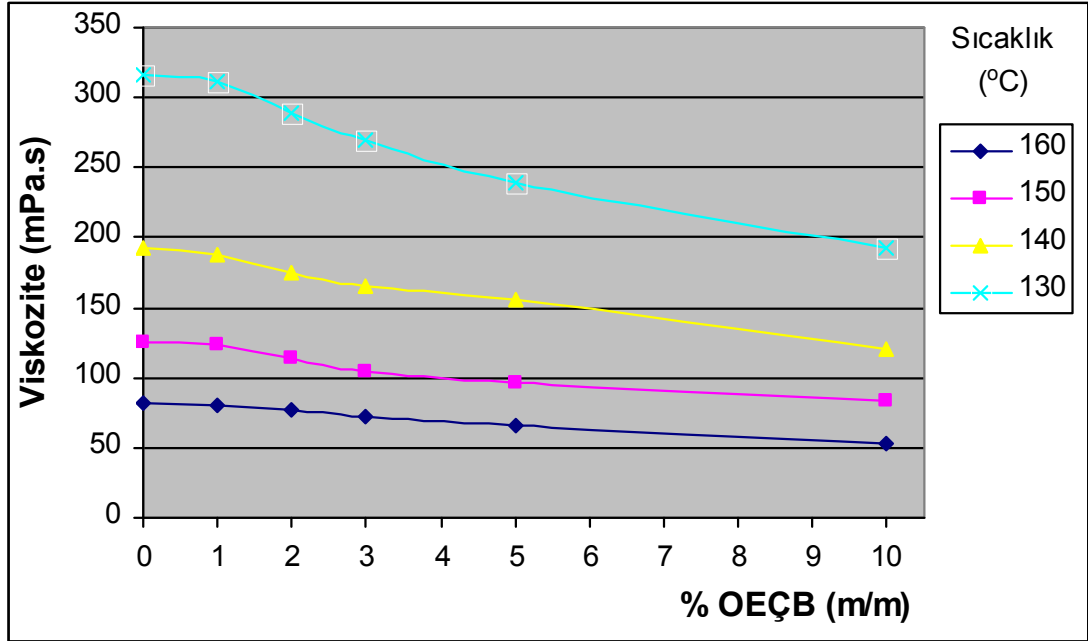
Şekil 6.8'de orijinal (katkısız) ve değişik oranlarda (%1, %2, %3, %5, %10) OEÇB katkılı bitümlerin viskozite özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri toplu halde sunulmuştur.

Sıcaklık arttığında viskozite değerlerinin azaldığı Şekil 6.8'de görülmektedir. Bunun yanı sıra, OEÇB'nin bitüme eklenmesi ile bitümün viskozitesinde azalma oluştuğu da görülebilmektedir.

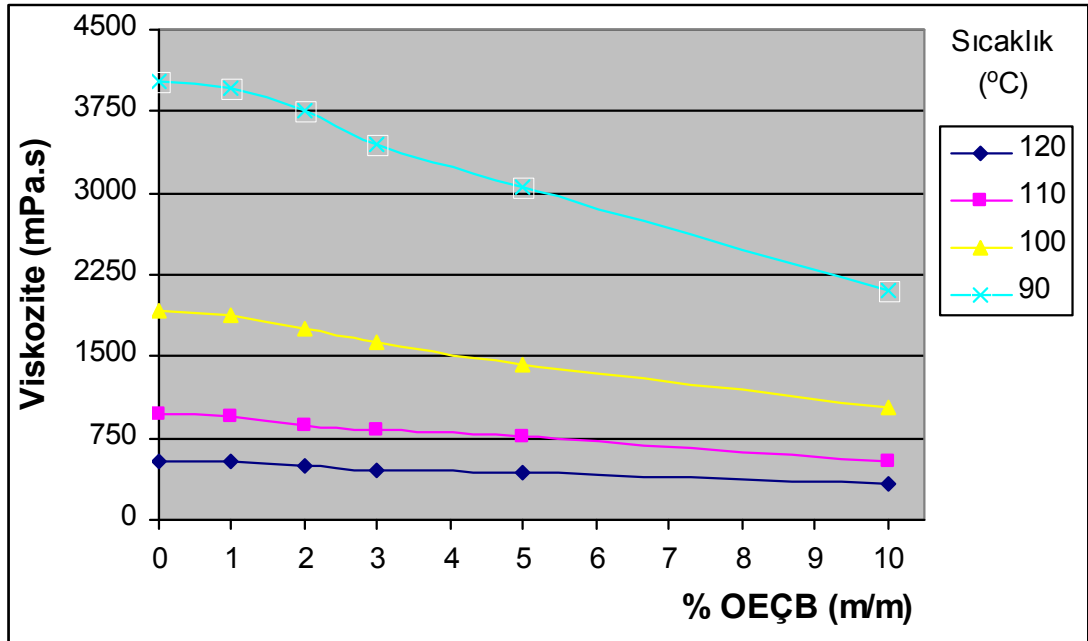


Şekil 6.8. Orijinal ve OEÇB katkıli bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

Çizelge 6.8'de verilen viskozite sonuçlarının katkı maddesi miktarlarına (konsantrasyon) göre değişimleri tüm deney sıcaklıkları için incelenmiştir. Viskozite değerleri geniş bir aralıkta dağılım göstermektedir. Bu yüzden daha rahat inceleme imkanı oluşabilmesi için bu değişim de önceki katkı maddelerinde olduğu gibi Şekil 6.9a'da ve Şekil 6.9b'de olmak üzere iki farklı grafiksel gösterim halinde sunulmuştur. Şekil 6.9a'da 130°C ile 160°C, Şekil 6.9b'de ise 90°C ile 120°C arasındaki deney sıcaklıkları için bitüm viskozitesinin katkı maddesi miktarına (konsantrasyon) bağlı olarak değişimleri sunulmuştur.



Şekil 6.9a. Bitüm viskozitesinin OEÇB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında)



Şekil 6.9b. Bitüm viskozitesinin OEÇB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında)

Şekil 6.8, Şekil 6.9a ve Şekil 6.9b incelenmesiyle OEÇB'nin bitüm davranışında meydana getirdiği değişiklikler şöyle özetlenebilir;

- Bitüm, OEÇB ile modifiye edildiğinde viskozitesinde azalma oluşmaktadır.
- OEÇB konsantrasyonu arttıkça bitümün viskozitesindeki azalma da artmaktadır.
- Sıcaklık azaldıkça OEÇB modifikasyonunun viskozite üzerindeki azaltıcı etkisi miktar olarak artmaktadır.

Çizelge 6.9'da OEÇB modifikasyonu ile orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından oluşan değişimler bitüme eklenen katkı maddesi miktarlarına göre verilmiştir. Çizelgedeki her bir hücrede bulunan ilk değer orijinal viskoziteye göre oluşan değişim miktarını (mPa.s cinsinden), ikinci değer ise orijinal viskoziteye göre oluşan oransal (%) değişimi ifade etmektedir.

Çizelge 6.9. OEÇB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Orijinal Bitüme İlave Edilen OEÇB Oranı (Ağırlıkça)				
	%1	%2	%3	%5	%10
160	-1,7/2,1	-5/6,1	-9,2/11,3	-15,9/19,5	-28/34,3
150	-2,6/2,1	-12,3/9,8	-21,3/16,9	-28,9/22,9	-43/34,1
140	-5,5/2,8	-18,3/9,5	-28,4/14,7	-37,5/19,4	-72,5/37,5
130	-3,8/1,2	-26,4/8,4	-45,8/14,5	-76,8/24,3	-122,2/38,7
120	-5,9/1,1	-38,6/7,2	-88,9/16,5	-113,7/21,1	-208,6/38,8
110	-16,9/1,7	-102,4/10,5	-149,8/15,3	-206,5/21,1	-432,5/44,3
100	-39,1/2	-155,9/8,1	-295,9/15,4	-487,1/25,4	-884,4/46,1
90	-71,4/1,8	-260,7/6,5	-569,9/14,2	-969,2/24,1	-1928,2/47,9

Çizelge 6.9'daki değerler incelendiğinde ölçüm yapılan sıcaklıklar çerçevesinde bitümdeki katkı maddesi içeriği arttıkça viskozitedeki değişimin miktar ve oran bakımından gittikçe arttığı görülmektedir. OEÇB modifikasyonu orijinal bitüm viskozitesini %47,9'ye varan oranlarda azaltabilmektedir. Miktar bakımından incelendiğinde ise OEÇB modifikasyonu ile meydana gelen en büyük azalma 1928,2 mPa.s'tır.

Viskozite test sonuçları; OEÇB ile modifikasyonun, bitüm davranışında etkili bir değişim meydana getirdiğini göstermektedir. OEÇB ile modifiye edilerek orijinal durumuna göre daha akıcı (yumuşak) özellikte bitüm elde edilmektedir. Bu tür özelliğe sahip bitümlerin esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara karşı daha dirençli oldukları [4] ve soğuk iklimin hakim olduğu kuzey ülkelerinde tercih edildikleri [40] belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, bitümün OEÇB ile modifikasyonunun meydana getirdiği değişim;

- Agregaya ile bitümün karıştırılma sıcaklığı (plant sıcaklığı),
- Bitümde yüksek karıştırma sıcaklığı sebebiyle meydana gelen yaşlanma,
- Bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji,
- Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği,
- Agregaya ile bitüm arasındaki adezyon,
- Bitümlü karışımların soyulma direnci

hususlarında da olumlu sonuçlar oluşturabilecek özelliklere sahiptir. Buna göre, OEÇB modifikasyonlu bitüm kullanımı ile plant sıcaklığı, bitümün kısa dönem yaşlanması, bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji ve esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlaklar azaltılabilirken bitümlü karışımların işlenebilirliği, agrega-bitüm arasındaki adezyon kuvveti ve agrega-bitüm karışımlarının soyulmaya karşı direnci artırılabilir.

Bitümün çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilerek düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna [38, 44] ve bitümlü karışımlarda meydana gelen soyulmaya [28, 45] karşı direncinin arttırılabileceğini belirten araştırmalar mevcuttur. Ayrıca bitümün modifiye edilerek daha yumuşak özellik kazandırılması ile plent sıcaklığının azaltılacağı ve buna bağlı olarak enerji tüketimi ve emisyonun azaltılacağı ifade edilmektedir [40]. Plent sıcaklığının azaltılmasıyla bitümde yüksek sıcaklık sebebiyle meydana gelen yaşlanma miktarı da azalacaktır.

Çalışma kapsamında sentezlenen ve bitüm modifikasyonunda kullanılan tüm organik esaslı metal bileşiklerine ait viskozite test sonuçları sunumundan sonra yukarıda özetlenen sonuçlarla ilgili geniş bir tartışma yapılarak bitümde bu tür modifikasyonun sağlayacağı tüm avantajlar sebep ve ayrıntılarıyla belirtilmiştir.

6.1.6. Organik esaslı kalsiyum bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları

Orijinal bitüme ağırlıkça %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında OEKB ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu bitümlere 90°C ile 160°C arasındaki sekiz farklı deney sıcaklığında toplam 215 adet viskozite ölçümü uygulanmıştır. Farklı miktarda OEKB içeren her bir modifiye bitümle;

- Her bir deney sıcaklığında üç ile on arasında değişen sayıda ölçüm yapılmıştır.
- Ölçüm yapılan deney sıcaklığında bitümün sahip olduğu viskozite değeri o sıcaklıktaki ölçümlerin ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir.

Çizelge 6.10'da orijinal ve OEKB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklarda elde edilen ortalama viskozite değerleri mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden verilmiştir. OEKB katkılı bitümlere ait tüm viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler ise EK-11A'da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

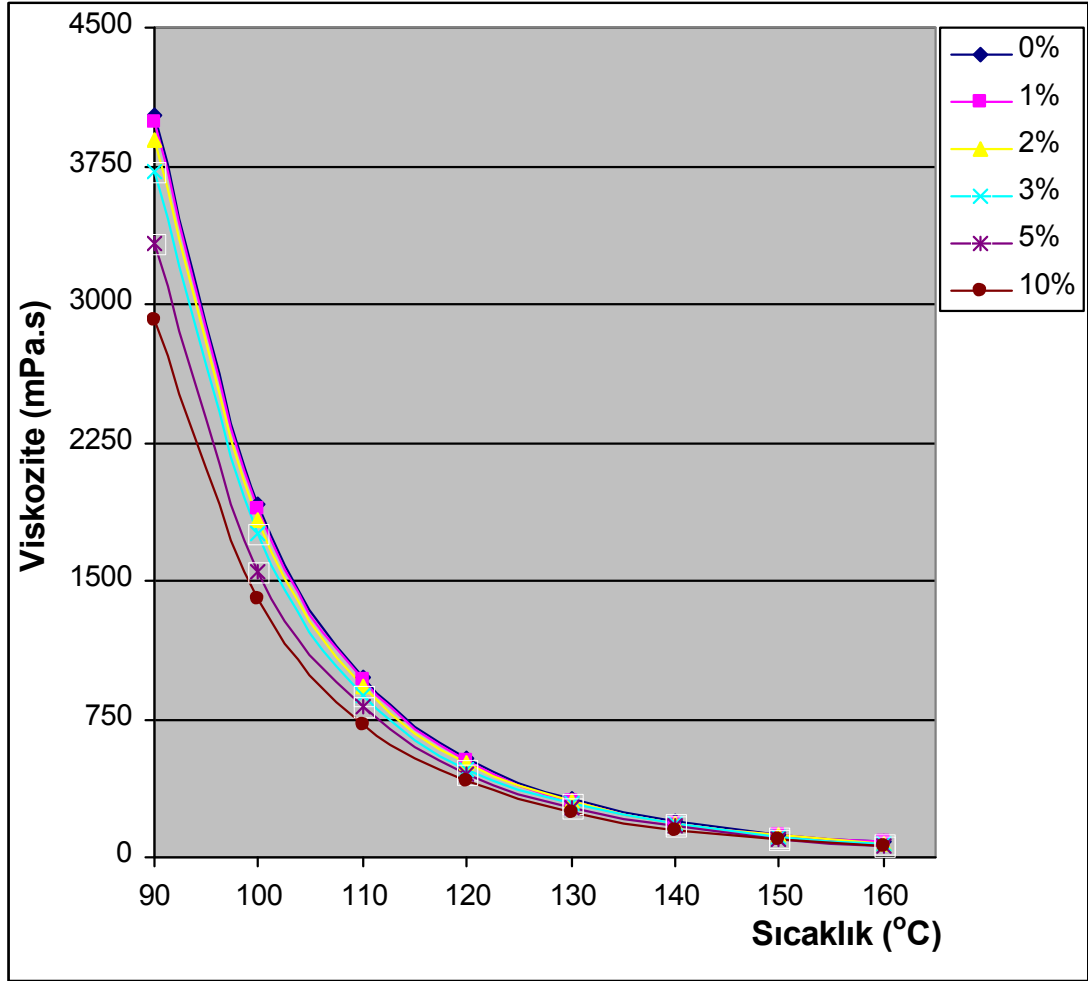
Çizelge 6.10. Orijinal ve OEKB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Bitümün İhtiva Ettiği OEKB Bileşiği Oranı					
	0%	1%	2%	3%	5%	10%
160	81,7	80,0	74,2	71,4	66,7	60,8
150	126,0	123,9	120,0	113,3	103,4	93,8
140	193,3	188,4	184,5	179,1	168,3	150,3
130	315,5	310,7	300,0	290,0	269,3	245,0
120	537,8	528,0	513,1	481,3	456,9	408,9
110	976,5	960,4	930,3	882,3	821,2	724,8
100	1917,7	1891,8	1829,0	1754,5	1547,4	1396,8
90	4026,7	3983,3	3889,2	3715,0	3329,6	2910,0

Çizelge 6.10'daki değerler önceki ölçüm sonuçlarında olduğu gibi viskozitenin sıcaklıkla yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Sıcaklıktaki artış viskozitede hızlı azalmaya sebep olmaktadır.

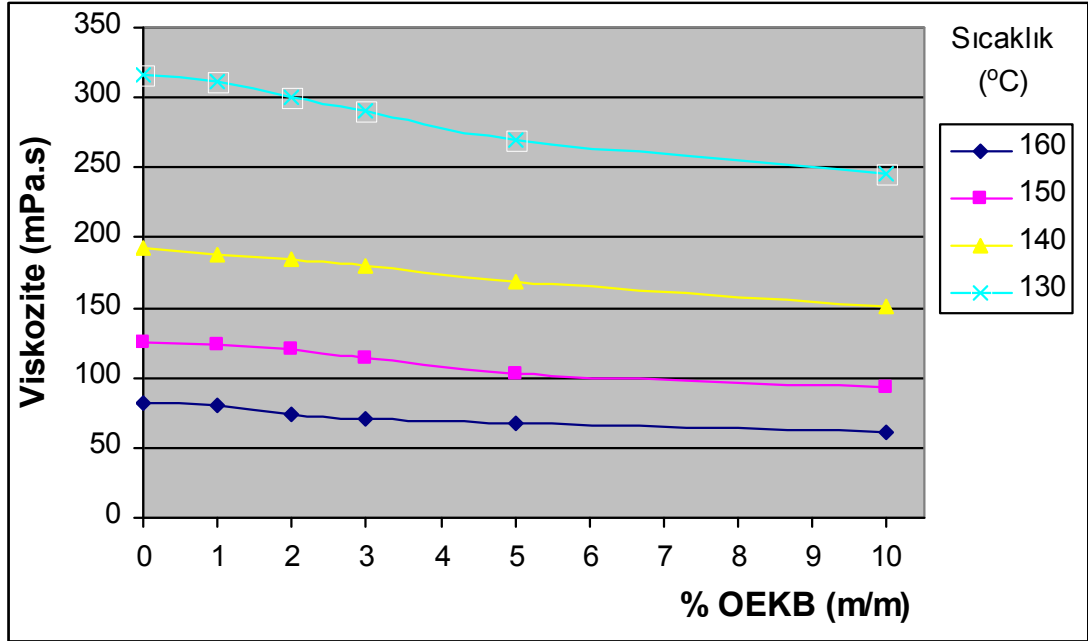
Şekil 6.10'da orijinal (katkısız) ve değişik miktarlarda (%1, %2, %3, %5, %10) OEKB katkılı bitümlerin viskozite özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri toplu halde sunulmuştur.

Şekil 6.10'daki grafiksel gösterimde sıcaklık arttığında viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, OEKB'nin bitüme eklenmesi ile bitümün viskozitesinde azalma oluştuğu da görülebilmektedir.

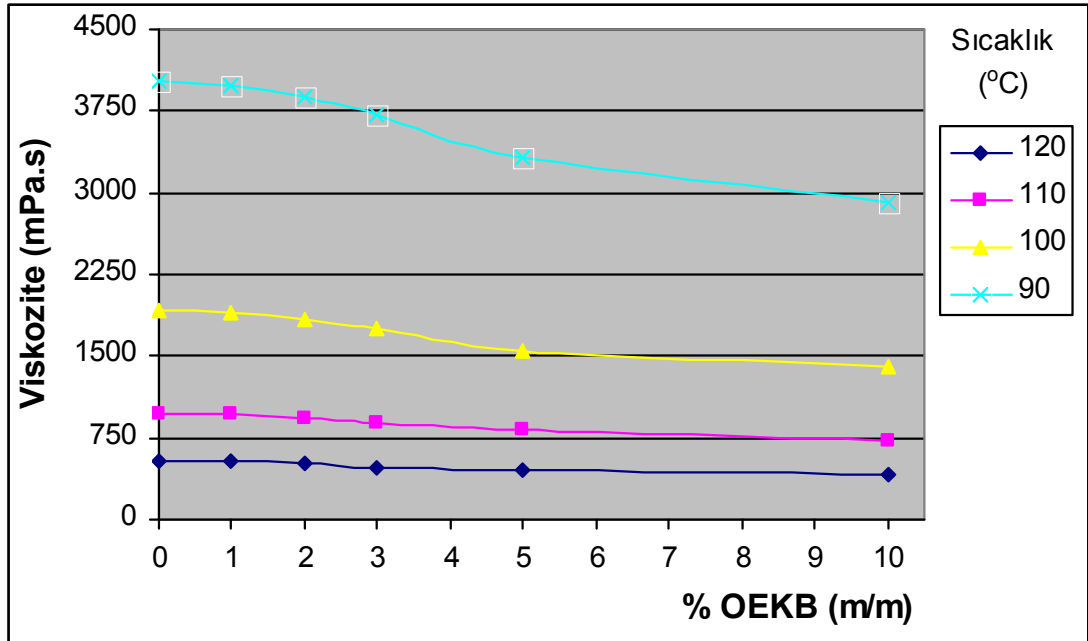


Şekil 6.10. Orijinal ve OEKB katkıli bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

Çizelge 6.10'da verilen viskozite sonuçlarının katkı maddesi oranlarına (konsantrasyon) göre değişimleri tüm deney sıcaklıkları için incelenmiştir. Viskozite değerleri geniş bir aralıkta dağılım gösterdiklerinden ötürü bu değişim de önceki katkı maddelerinde olduğu gibi Şekil 6.11a'da ve Şekil 6.11b'de olmak üzere iki farklı grafiksel gösterim halinde sunulmuştur. Şekil 6.11a'da 130°C ile 160°C, Şekil 6.11b'de ise 90°C ile 120°C arasındaki deney sıcaklıkları için bitüm viskozitesinin katkı maddesi miktarına (konsantrasyon) bağlı olarak değişimleri sunulmuştur.



Şekil 6.11a. Bitüm viskozitesinin OEKB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında)



Şekil 6.11b. Bitüm viskozitesinin OEKB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında)

Şekil 6.10, Şekil 6.11a ve Şekil 6.11b incelenmesiyle OEKB'nin bitüm davranışında meydana getirdiği değişiklikler şöyle özetlenebilir;

- Bitüm, OEKB ile modifiye edildiğinde viskozitesinde azalma oluşmaktadır.
- OEKB konsantrasyonu arttıkça bitümün viskozitesindeki azalma da artmaktadır.
- Sıcaklık azaldıkça OEKB modifikasyonunun viskozite üzerindeki azaltıcı etkisi miktar olarak artmaktadır.

Çizelge 6.11'de OEKB modifikasyonu ile orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından oluşan değişimler bitüme eklenen katkı maddesi oranlarına göre verilmiştir. Çizelgedeki her bir hücrede bulunan ilk değer orijinal viskoziteye göre oluşan değişim miktarını (mPa.s cinsinden), ikinci değer ise orijinal viskoziteye göre oluşan oransal (%) değişimi ifade etmektedir.

Çizelge 6.11. OEKB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Orijinal Bitüme İlave Edilen OEKB Oranı (Ağırlıkça)				
	%1	%2	%3	%5	%10
160	-1,7/2,1	-7,5/9,2	-10,3/12,6	-15/18,4	-20,9/25,6
150	-2,1/1,7	-6/4,8	-12,7/10,1	-22,6/17,9	-32,2/25,6
140	-4,9/2,5	-8,8/4,6	-14,2/7,3	-25/12,9	-43/22,2
130	-4,8/1,5	-15,5/4,9	-25,5/8,1	-46,2/14,6	-70,5/22,3
120	-9,8/1,8	-24,7/4,6	-56,5/10,5	-80,9/15	-128,9/24
110	-16,1/1,6	-46,2/4,7	-94,2/9,6	-155,3/15,9	-251,7/25,8
100	-25,9/1,4	-88,7/4,6	-163,2/8,5	-370,3/19,3	-520,9/27,2
90	-43,4/1,1	-137,5/3,4	-311,7/7,7	-697,1/17,3	-1116,7/27,7

Çizelge 6.11'deki değerler incelendiğinde ölçüm yapılan sıcaklıklar çerçevesinde bitümdeki katkı maddesi içeriği arttıkça viskozitedeki miktar ve oran bakımından değişimin gittikçe arttığı görülmektedir. OEKB modifikasyonu orijinal bitüm viskozitesini %27,7'ye varan oranlarda

azaltabilmektedir. Miktar bakımından incelendiğinde ise OEKB modifikasyonu ile meydana gelen en büyük azalma 1116,7 mPa.s'tır.

Viskozite test sonuçları; OEKB ile modifikasyonun, bitüm davranışında etkili bir değişim meydana getirdiğini göstermektedir. OEKB ile modifiye edilerek orijinal durumuna göre daha akıcı (yumuşak) özellikte bitüm elde edilmektedir. Bu tür özelliğe sahip bitümlerin esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara karşı daha dirençli oldukları [4] ve soğuk iklimin hakim olduğu kuzey ülkelerinde tercih edildikleri [40] belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, bitümün OEKB ile modifikasyonunun meydana getirdiği değişim;

- Agregaya ile bitümün karıştırılma sıcaklığı (plant sıcaklığı),
- Bitümde yüksek karıştırma sıcaklığı sebebiyle meydana gelen yaşlanma,
- Bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji,
- Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği,
- Agregaya ile bitüm arasındaki adezyon,
- Bitümlü karışımların soyulma direnci

hususlarında da olumlu sonuçlar oluşturabilecek özelliklere sahiptir. Buna göre, OEKB modifikasyonlu bitüm kullanımı ile plant sıcaklığı, bitümün kısa dönem yaşlanması, bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji ve esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlaklar azaltılabilirken bitümlü karışımların işlenebilirliği, agrega-bitüm arasındaki adezyon kuvveti ve agrega-bitüm karışımlarının soyulmaya karşı direnci artırılabilir.

Bitümün çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilerek düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna [38, 44] ve bitümlü karışımlarda meydana gelen soyulmaya [28, 45] karşı direncinin artırılabilirliğini belirten araştırmalar mevcuttur. Ayrıca bitümün modifiye edilerek daha yumuşak özellik kazandırılması ile plant

sıcaklığının azaltılacağı ve buna bağlı olarak enerji tüketimi ve emisyonun azaltılacağı ifade edilmektedir [40]. Plent sıcaklığının azaltılmasıyla bitümde yüksek sıcaklık sebebiyle meydana gelen yaşlanma miktarı da azalacaktır.

Çalışma kapsamında sentezlenen ve bitüm modifikasyonunda kullanılan tüm organik esaslı metal bileşiklerine ait viskozite test sonuçları sunumundan sonra yukarıda özetlenen sonuçlarla ilgili geniş bir tartışma yapılarak bitümde bu tür modifikasyonun sağlayacağı tüm avantajlar sebep ve ayrıntılarıyla belirtilmiştir.

6.1.7. Organik esaslı çinkofosfat bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları

Orijinal bitüme ağırlıkça %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında OEÇFB ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu bitümlere 90°C ile 160°C arasındaki sekiz farklı deney sıcaklığında toplam 181 adet viskozite ölçümü uygulanmıştır. Farklı miktarda OEÇFB içeren her bir modifiye bitümle;

- Her bir deney sıcaklığında üç ile altı arasında değişen sayıda ölçüm yapılmıştır.
- Ölçüm yapılan deney sıcaklığında bitümün sahip olduğu viskozite değeri o sıcaklıktaki ölçümlerin ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir.

Çizelge 6.12’de orijinal ve OEÇFB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklarda elde edilen ortalama viskozite değerleri mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden verilmiştir. OEÇFB katkılı bitümlere ait tüm viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler ise EK-12A’da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

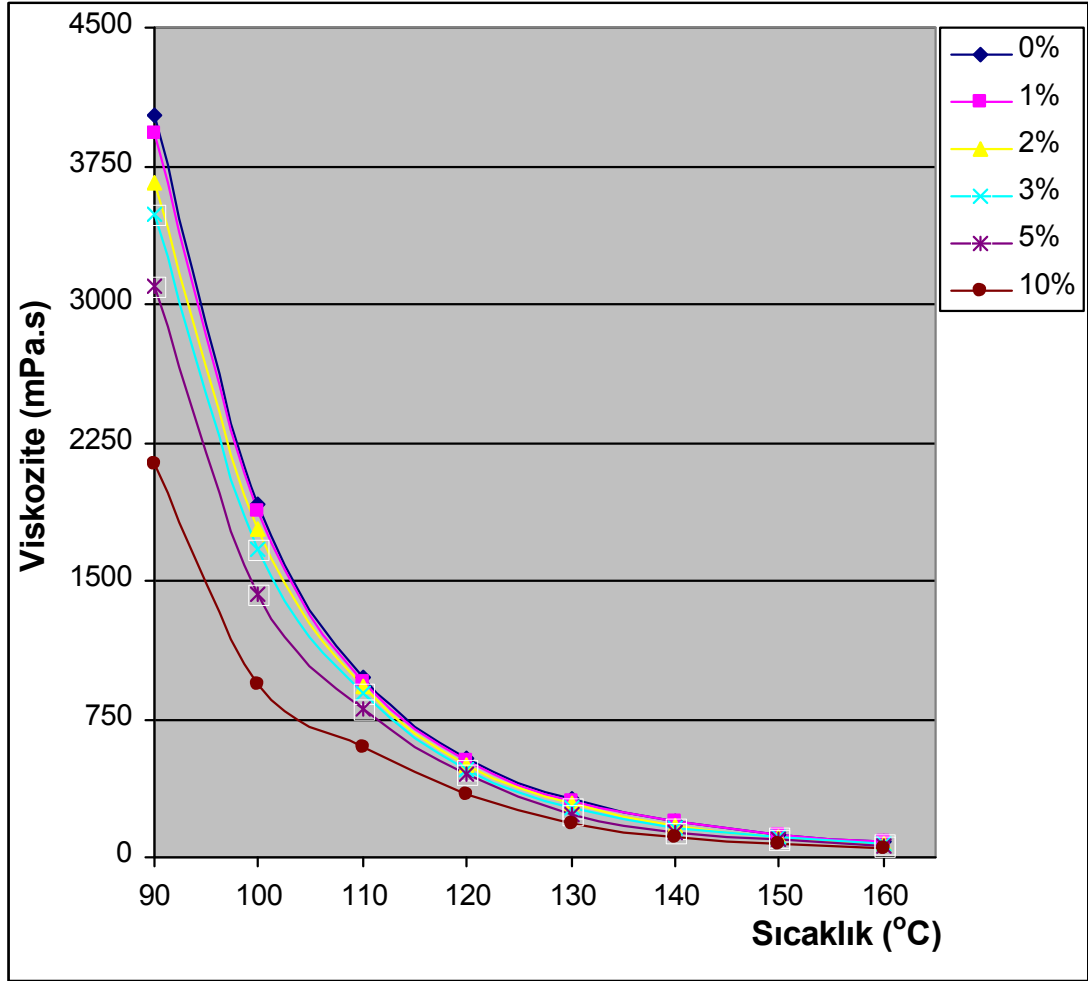
Çizelge 6.12. Orijinal ve OEÇFB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Bitümün İhtiva Ettiği OEÇFB Bileşiği Oranı					
	0%	1%	2%	3%	5%	10%
160	81,7	79,4	74,0	71,1	65,4	51,7
150	126,0	121,9	115,8	106,7	97,1	76,3
140	193,3	190,0	173,3	154,6	140,2	105,2
130	315,5	309,3	292,5	268,3	236,7	183,9
120	537,8	525,3	503,4	474,7	455,4	343,7
110	976,5	956,6	922,8	885,4	809,3	597,9
100	1917,7	1878,8	1780,5	1668,3	1431,0	940,3
90	4026,7	3922,3	3654,8	3482,5	3093,3	2136,8

Çizelge 6.12'deki değerler önceki ölçüm sonuçlarında olduğu gibi viskozitenin sıcaklıkla yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Sıcaklık artışı viskozitede hızlı azalmaya sebep olmaktadır.

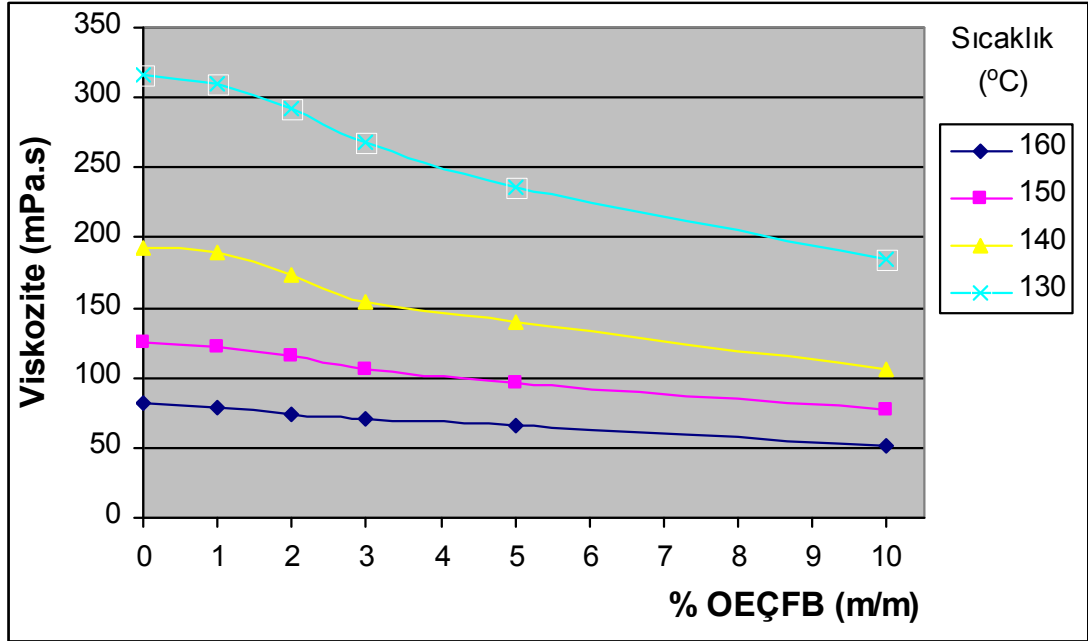
Şekil 6.12'de orijinal (katkısız) ve değişik oranlarda (%1, %2, %3, %5, %10) OEÇFB katkılı bitümlerin viskozite özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri toplu halde sunulmuştur.

Şekil 6.12'deki grafiksel gösterimde sıcaklık arttığında viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, OEÇFB'nin bitüme eklenmesi ile bitümün viskozitesinde azalma oluştuğu da görülebilmektedir.

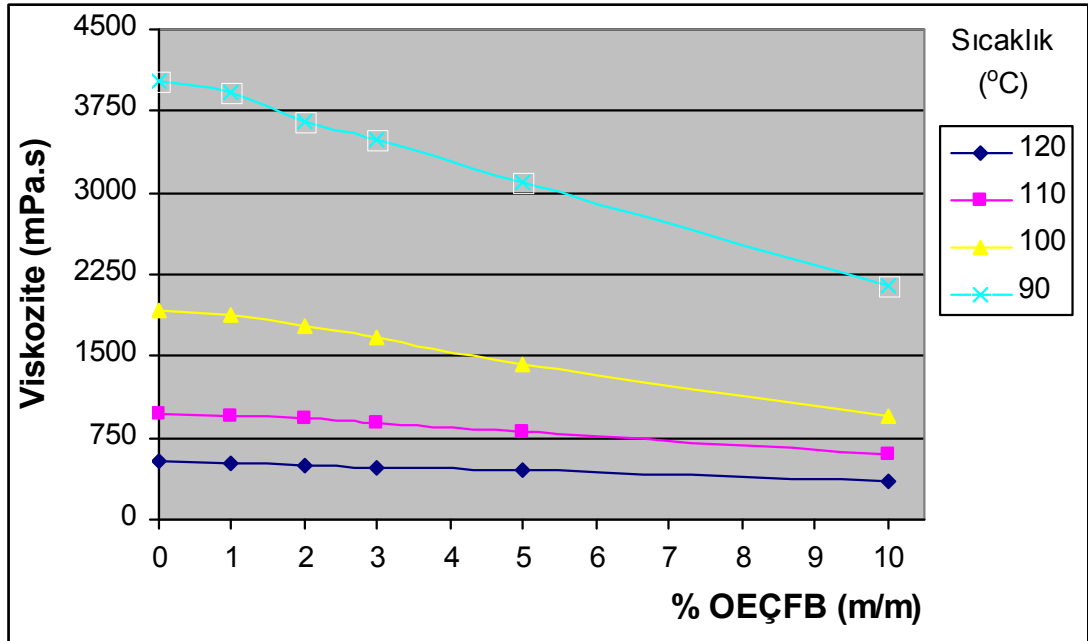


Şekil 6.12. Orijinal ve OEÇFB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

Çizelge 6.12’de verilen viskozite sonuçlarının katkı maddesi oranlarına (konsantrasyon) göre değişimleri tüm deney sıcaklıkları için incelenmiştir. Viskozite değerleri geniş bir aralıkta dağılım gösterdiklerinden ötürü bu değişim de önceki katkı maddelerinde olduğu gibi Şekil 6.13a’da ve Şekil 6.13b’de olmak üzere iki farklı grafiksel gösterim halinde sunulmuştur. Şekil 6.13a’da 130°C ile 160°C, Şekil 6.13b’de ise 90°C ile 120°C arasındaki deney sıcaklıkları için bitüm viskozitesinin katkı maddesi miktarına (konsantrasyon) bağlı olarak değişimleri sunulmuştur.



Şekil 6.13a. Bitüm viskozitesinin OEÇFB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında)



Şekil 6.13b. Bitüm viskozitesinin OEÇFB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında)

Şekil 6.12, Şekil 6.13a ve Şekil 6.13b incelenmesiyle OEÇFB'nin bitüm davranışında meydana getirdiği değişiklikler şöyle özetlenebilir;

- Bitüm, OEÇFB ile modifiye edildiğinde viskozitesinde azalma oluşmaktadır.
- OEÇFB konsantrasyonu arttıkça bitümün viskozitesindeki azalma da artmaktadır.
- Sıcaklık azaldıkça OEÇFB modifikasyonunun viskozite üzerindeki azaltıcı etkisi miktar olarak artmaktadır.

Çizelge 6.13'te OEÇFB modifikasyonu ile orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından oluşan değişimler bitüme eklenen katkı maddesi miktarlarına göre verilmiştir. Çizelgedeki her bir hücrede bulunan ilk değer orijinal viskoziteye göre oluşan değişim miktarını (mPa.s cinsinden), ikinci değer ise orijinal viskoziteye göre oluşan oransal (%) değişimi ifade etmektedir.

Çizelge 6.13. OEÇFB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Orijinal Bitüme İlave Edilen OEÇFB Oranı (Ağırlıkça)				
	%1 için	%2 için	%3 için	%5 için	%10 için
160	-2,3/2,8	-7,7/9,4	-10,6/13	-16,3/20	-30/36,7
150	-4,1/3,3	-10,2/8,1	-19,3/15,3	-28,9/22,9	-49,7/39,4
140	-3,3/1,7	-20/10,3	-38,7/20	-53,1/27,5	-88,1/45,6
130	-6,2/1,9	-23/7,3	-47,2/15	-78,8/25	-131,6/41,7
120	-12,5/2,3	-34,4/6,4	-63,1/11,7	-82,4/15,3	-194,1/36,1
110	-19,9/2	-53,7/5,5	-91,1/9,3	-167,2/17,1	-378,6/38,8
100	-38,9/2	-137,2/7,2	-249,4/13	-486,7/25,4	-977,4/51
90	-104,4/2,6	-371,9/9,2	-544,2/13,5	-933,4/23,2	-1889,9/46,9

Çizelge 6.13'teki değerler incelendiğinde ölçüm yapılan sıcaklıklar çerçevesinde bitümdeki katkı maddesi içeriği arttıkça viskozitedeki miktar ve oran bakımından değişimin gittikçe arttığı görülmektedir. OEÇFB modifikasyonu orijinal bitüm viskozitesini %51'e varan oranlarda

azaltabilmektedir. Miktar bakımından incelendiğinde ise OEÇFB modifikasyonu ile meydana gelen en büyük azalma 1889,9 mPa.s'tır.

Viskozite test sonuçları; OEÇFB ile modifikasyonun, bitüm davranışında etkili bir değişim meydana getirdiğini göstermektedir. OEÇFB ile modifiye edilerek orijinal durumuna göre daha akıcı (yumuşak) özellikte bitüm elde edilmektedir. Bu tür özelliğe sahip bitümlerin esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara karşı daha dirençli oldukları [4] ve soğuk iklimin hakim olduğu kuzey ülkelerinde tercih edildikleri [40] belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, bitümün OEÇFB ile modifikasyonunun meydana getirdiği değişim;

- Agregaya ile bitümün karıştırılma sıcaklığı (plant sıcaklığı),
- Bitümde yüksek karıştırma sıcaklığı sebebiyle meydana gelen yaşlanma,
- Bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji,
- Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği,
- Agregaya ile bitüm arasındaki adezyon,
- Bitümlü karışımların soyulma direnci

hususlarında da olumlu sonuçlar oluşturabilecek özelliklere sahiptir. Buna göre, OEÇFB modifikasyonlu bitüm kullanımı ile plant sıcaklığı, bitümün kısa dönem yaşlanması, bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji ve esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlaklar azaltılabilirken bitümlü karışımların işlenebilirliği, agrega-bitüm arasındaki adezyon kuvveti ve agrega-bitüm karışımlarının soyulmaya karşı direnci artırılabilir.

Buraya kadar sunulmuş olan viskozite test sonuçları ile çalışma kapsamında sentezlenen ve katkı maddesi olarak kullanılan organik esaslı metal bileşiklerinin bitüm davranışında meydana getirdiği değişimler belirlenmiştir. Bu değişimlerin yüksek standartlı esnek üstyapı inşaatında, üstyapı

inşaatında kullanılan bitümlü sıcak karışım imalatında ve üstyapının kullanım sürecinde sağladığı avantajlar aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Bitümün agregaya ile plentte karıştırılması ve ardından yola serilip sıkıştırılması esnasında sahip olması tercih edilen viskozite özellikleri mevcuttur. Buna göre bitümün; karıştırılma esnasında 200 mPa.s, sıkıştırılma esnasında ise 500-3000 mPa.s akıcılıkta olması istenir. Sıkıştırma esnasında bitüm viskozitesi 500 mPa.s'tan daha düşük olması durumunda karışım sıkıştırılamayacak kadar gevşek, 3000 mPa.s'tan daha yüksek olması durumunda ise karışım sıkıştırılamayacak kadar katı olur [6]. Bunların yanı sıra, agregaya ile karıştırılma esnasında bitümün yüksek viskoziteye sahip olması agregaya ile bitümün bağlanma derecesini olumsuz yönde etkiler.

Bitümün karıştırma ve sıkıştırma esnasında yukarıda belirtilen akıcılık özelliklerini sağlayabilmesi için agregaya ile plentte yüksek sıcaklıklarda karıştırılması gerekmektedir ($\sim 160^{\circ}\text{C}$). Daha önce bahsedildiği üzere bitümde meydana gelen yaşlanmanın büyük kısmı plentte maruz kaldığı yüksek sıcaklıktan kaynaklanmaktadır [4].

Bitümün organik esaslı metal bileşikleriyle modifikasyonu sonucunda yapısında meydana gelen değişimin yüksek standartlı esnek üstyapılarda sağlayacağı avantajlar Çizelge 6.14'te özetlenmiştir.

Çizelge 6.14. Organik esaslı metal bileşikleriyle modifiye edilen bitümün yüksek standartlı esnek üstyapılarda sağlayacağı avantajlar

Süreç	Değişim	Değişim Yönü	Değişim Yönüne Bağlı Olarak Sağlanan Avantaj
BSK İmalatı	Plent Sıcaklığı	Azalma	Enerji Tasarrufu, Bitümün Yaşlanmasında Azalma
		Sabit	Adezyon Artışı, Soyulma Direncinde Artış
İnşaat	İşlenebilirlik	Artma	Daha Düşük Sıcaklıklarda Serme ve Sıkıştırma
Kullanım	Çatlak Dayanımı	Artma	Düşük Sıcaklıklarda Daha Az Çatlak Oluşumu

Çizelge 6.14'te özet halinde sunulan hususlar aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

- Bitümün agrega ile plentte karıştırılma sıcaklığı azalır. Bu husus iki bakımdan avantaj sağlar. Şöyle ki;

Organik esaslı metal bileşikler ile modifikasyon sonucu bitümün viskozitesi azalmaktadır. Bu yüzden bitüm, agrega ile karıştırılma esnasında ihtiyaç duyulan viskoziteye daha düşük sıcaklıklarda sahip olur. Bu durum, bitümün plentte agrega ile karıştırılmasının daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmesine imkan verir. Bitümde meydana gelen yaşlanmanın büyük bölümü plentte agrega ile karıştırılma esnasında maruz kaldığı yüksek sıcaklıktan kaynaklanmaktadır. Bu yüzden, karıştırma sıcaklığının azalması bitümde meydana gelen yaşlanmanın azalmasını sağlayacaktır.

Yukarıda belirtilen hususun viskozite test sonuçları ile birlikte değerlendirilmesi durumunda şu sonuçlara ulaşılmaktadır; viskozite test sonuçlarına göre katkı maddeleri bitüm viskozitesini farklı oranlarda olmakla birlikte etkili biçimde azaltmaktadır. Bu sonuç sadece düşük ölçüm sıcaklıkları için geçerli değildir. Yüksek sıcaklıklarda, modifikasyon sonucu bitümün viskozitesinde meydana gelen değişim miktar bakımından daha az olsa da oransal olarak incelendiğinde oldukça yüksek değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Bu oran plent sıcaklığına yakın sıcaklıklarda katkı maddelerinin konsantrasyonuna bağlı olarak %70'e kadar artabilmektedir. Bu da bitümün organik esaslı metal bileşikler ile modifiye edilmesinin plentteki karıştırma sıcaklığını azaltacağını göstermektedir. Böylece plentte daha düşük sıcaklığa maruz kalan bitüm daha az yaşlanacaktır.

Bitümün organik esaslı metal bileşikleriyle modifiye edilmesinin plent sıcaklığı üzerindeki etkisini daha açık bir şekilde ortaya koyabilmek üzere EK-7A ile EK-12A arasında sunulan grafiklerden yararlanılmıştır. Bu grafiklerden 200 mPa.s'lik viskozite değeri için gerekli olan sıcaklık değeri her bir bitüm için

(orijinal ve modifiye) ayrı ayrı belirlenmiştir. Örneğin orijinal bitüme ait grafik incelendiğinde bu değerin 139,5°C olduğu görülmektedir. Yani orijinal bitüm kullanılması durumunda bitüm ile agreganın plentte en uygun karıştırılma sıcaklığı 139,5°C'dir. Modifiye bitümler için de benzer yöntem ile sıcaklıklar (plent sıcaklıkları) belirlenmiş ve sonuçlar toplu halde Çizelge 6.15'te sunulmuştur.

Çizelge 6.15. Bitüme eklenen katkı maddesi türü ve miktarına göre plent sıcaklıkları (°C)

Katkı Maddesi Oranı (Ağırlıkça)	Katkı Maddesi Türü					
	OEMAGB	OEBAB	OEMANB	OEÇB	OEKB	OEÇFB
0%	139,5	139,5	139,5	139,5	139,5	139,5
1%	139,1	139,3	138,9	139,0	139,1	139,2
2%	135,1	138,0	138,2	137,8	138,7	137,8
3%	134,1	137,5	136,9	136,7	138,1	136,0
5%	131,9	134,6	134,7	134,7	136,9	133,8
10%	126,8	128,1	127,1	129,5	134,8	129,0
Orijinal Bitüme Göre Plent Sıcaklıklarında Oluşan En Büyük Azalma (°C)	12,7	11,4	12,4	10,0	4,7	10,5

Çizelge 6.15'te sıcak karışımlarda organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilen bitüm kullanılması durumunda plent sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir. Son satırda görülen değerlerle plent sıcaklığının katkı maddesi konsantrasyonuna bağlı olmak üzere modifiye bitüm kullanımı ile 12,7°C kadar azalabileceği anlaşılmaktadır. 100°C'nin üzerinde her 10°C'lik sıcaklık artışı bitümdeki oksitlenme miktarını iki kat arttırmaktadır [4]. Bu sonuç, sıcak karışımlarda organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilen bitümlerin kullanılmasıyla bitümde oluşan yaşlanma miktarında azalma sağlanacağını göstermektedir.

Bitümün organik esaslı metal bileşikleri ile modifikasyonu enerji bakımından da avantaj sağlamaktadır. Bitümlü sıcak karışımların imalatı için yüksek sıcaklık gerekir. Yüksek sıcaklık yüksek enerji sarfiyatı anlamına gelir. Daha düşük karıştırma sıcaklığı (plent sıcaklığı) bitümlü sıcak karışımların imalatı için daha az enerji harcanmasına imkan verir. Bu tür katkı maddeleri ile modifiye edilen bitümün kullanılması bitümlü sıcak karışımların imalatında enerji tasarrufu sağlayacaktır.

- Bitüm, organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilip plent sıcaklığının değiştirilmemesi durumunda da modifiye bitümün sağladığı bazı avantajlar bulunmaktadır. Şöyle ki;

Organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilen bitüm, yola serilip sıkıştırılma esnasında sahip olması gereken akıcılığı orijinal bitümle kıyaslandığında daha düşük sıcaklıklara kadar koruyabilir. Yani organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilmiş bitüm kullanımı karışımın işlenebilirliğini arttırarak serme ve sıkıştırma işlemlerinin daha kolay ve daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmesi için imkan oluşturur. Test sonuçlarına ve EK-7A ile EK-12A arasında sunulan grafiklere göre, bitüm viskozitesinin sıkıştırma esnasında üst sınırı olan 3000 mPa.s'a orijinal bitüme kıyasla modifiye bitümlerde daha düşük sıcaklıklarda erişilmektedir. Orijinal bitüm için bu sınır mevcut deney sonuçlarına göre 94,9°C olarak elde edilmiştir. Modifiye bitümlerde ise sıkıştırma esnasındaki viskozite üst sınırına katkı maddesi konsantrasyonuna bağlı olarak 90°C'den daha düşük sıcaklıklarda ulaşılacağı görülmektedir.

Plentte imal edilen bitümlü sıcak karışımlar serilecekleri yerlere kamyonlarla taşınmaktadır. Taşıma esnasında karışımın sıcaklığı ortam koşullarına bağlı olarak azalır. Taşımanın süresi arttıkça, kamyonda taşınan karışımın miktarı azaldıkça, kamyon hızı arttıkça, hava sıcaklığı azaldıkça sıcaklık kaybı daha fazla olur [4]. Bitümlü sıcak karışımların sıcaklığı azaldıkça karışımdaki bitümün viskozluğu artar, karışımın işlenebilirliği azalarak sıkışma direnci

artar. Bu durum, karışımın yeterli oranda sıkıştırılmamasına sebep olabilir. Bitümlü sıcak karışımlarda organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilmiş bitüm kullanımı bu hususlarda avantaj sağlamaktadır. Orijinal bitüm kullanılan karışımla kıyaslandığında taşıma süresi daha uzun olabilir. Yani, plent ile kaplama tabakalarının inşaa edildiği yer arası daha uzak olabilir. Daha az malzeme gerekebilen yama gibi işlerde kamyonla daha az malzeme taşınması daha az problem oluşturur. Malzeme sevkiyat hızının arttırılabilmesi daha fazla teçhizat, ekipman, işçi kullanarak inşaatın daha kısa sürede tamamlanmasına katkı sağlayabilir veya daha az sayıda taşıma ekipmanının kullanılmasına imkan verebilir.

Esnek üstyapıların üst katmanlarında bulunan kaplama tabakalarının inşaatı esnasında hava koşulları oldukça önemlidir. İnşaat esnasında herhangi bir yağış olmaması şart olup hava sıcaklığının düşük olmaması gerekmektedir. Bu koşullar, esnek üstyapıların mevsim koşullarına bağlı olmak üzere yıl içindeki inşaat sürelerinin azalmasına yol açmaktadır. Herhangi bir yağış olmaması koşulunda; bitümün yeterli miktarda organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilmesi kaplama tabakalarının daha düşük hava sıcaklıklarında inşaatına imkan vererek esnek üstyapıların yıl içindeki inşaat sürelerinin uzamasını sağlayabilir.

Bitümün organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilip plent sıcaklığının değiştirilmemesi durumunda bitümün agregaya ile adezyon yeteneğinin artması sağlanan diğer bir avantajdır. Viskozitesi daha düşük olan bitüm agregaya danelerini daha kolay sarar ve agregaya danelerinde bulunan boşluklara daha fazla miktarda absorbe olur. Böylece agregaya ile bitüm arasındaki adezyon kuvveti artar. Bu durum, bitümün agregaya yüzeyinden su etkisi ile ayrılmaya karşı direncini yükselteceğinden bitümlü sıcak karışımların soyulmaya karşı direnci artar.

Bitümün organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilmesinin sağladığı bir diğer önemli avantaj esnek üstyapılardaki kaplama tabakalarının düşük

sıcaklık sebebiyle oluşan çatlaklara karşı daha dirençli olmasıdır. Bitümlü kaplamalar soğuk hava etkisinde büzülme eğiliminde olurlar. Büzülen kaplamada çekme gerilmeleri oluşur [4]. Bu gerilmeler, büzülmeye çalışan bitümlü kaplamanın altında bulunan tabaka tarafından büzülme hareketinin ara yüzeyde oluşan sürtünme kuvvetleri ile engellenmeye çalışılmasından kaynaklanır. Çekme gerilmeleri, kaplamanın çekme dayanımını aştığında bu tür çatlaklar meydana gelmektedir [54]. Kaplamanın ana büzülme hattı boyuna doğrultudadır. Bu yüzden bu çatlaklar kaplamanın eni doğrultusundadır [4]. Çatlaklar arası mesafenin genellikle 6-9 metre arasında olduğu ancak bu mesafenin 1 metreden daha az veya 30 metreye kadar artabildiği ve bu aralıkların genellikle düzenli olduğu da ifade edilmektedir [55]. Bu tür bozulma için yapılan gözlemler sonucu çatlakların kaplama yüzeyinde başladığı ve tabana kadar inebildiği belirtilmektedir [54]. Esnek üstyapıların kaplama tabakalarında soğuk havalarda meydana gelen çatlaklar, bitümün düşük sıcaklıklarda sahip olduğu davranış özelliği ile çok yakından ilişkilidir. Bitümün soğuk havalarda çok rijit olmasıyla bu tür çatlaklar hem daha erken hem de daha büyük boyutta oluşarak kaplama için daha ciddi bir bozulma oluşturur. Kaplamada kullanılan ve soğuk hava etkisinde çok rijit davranış sergileyen bitüm, çekme gerilmeleri etkisinde çok az deformasyon göstererek gevrek (ani) bir kırılma meydana getirir. Bu yüzden soğuk havanın hüküm sürdüğü bölgelerde yumuşak bitüm kullanımı tercih edilmektedir. Daha yumuşak özellikte olan bitümler soğuk havalarda daha sünek davranış gösterebilmekte ve buna bağlı olarak esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumu azaltılabilmektedir.

Düşük sıcaklıklar sebebiyle meydana gelen çatlaklar, esnek kaplamalarda önemli bir bozulma türünü oluşturur. Bu çatlaklardan yağmur sularının girmesiyle kaplama daha fazla soyulmaya maruz kalabilir. Bununla birlikte, çatlaklardan giren suyun gece dona çekmesi ile genleşmeden kaynaklanan deformasyon hızlanır. Ayrıca su ile temas eden bitüm, suda çözülmüş bulunan oksijen sebebiyle daha fazla oksitlenerek daha hızlı yaşlanır. Bitümün yaşlanması düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı direncini

azaltır. Enine çatlakların, boyuna çatlakların oluşabileceği gerilme merkezi gibi davranabileceği de belirtilmektedir [55]. Özetle, bu tür bozulma diğer bozulma türlerinin oluşmasına ve/veya hızlanmasına sebep olabilir. Bu suretle; üstyapı, servis yeteneğini hızla kaybeder ve daha erken bakım-onarım gerektirir.

Literatürde bitümün çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilerek düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara karşı direncinin artırılabilirdiği belirtilmektedir [27, 30, 32, 38, 40, 44]. Bitümlü sıcak karışımlarda düşük sıcaklık çatlaklarına karşı daha dirençli bitüm kullanılması, kaplamanın soğuk havada oluşan çatlamlara karşı direncini de arttıracaktır.

Organik esaslı metal bileşikler ile modifiye ederek daha yumuşak özellikte bitüm elde edilmektedir. Başka bir deyişle, bu modifikasyon bitüme düşük sıcaklıklarda daha fazla sünek davranış sergileyebilecek özellik kazandırmaktadır. Yüksek standartlı esnek üstyapıların çeşitli tabakalarında kullanılabilen bitümlü sıcak karışımların bu tür bitüm ile hazırlanması çatlak direnci bakımından avantaj sağlar. Sünek davranış özelliği geliştirilmiş bitüm kullanımı ile düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamlara karşı üstyapının direnci artacaktır.

6.1.8. Trietilen glikol esaslı polibor bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları

Orijinal bitüme ağırlıkça %1, %2, %3 ve %5 oranlarında TEGPB ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu bitümlere öncelikle 90°C ile 160°C arasındaki sekiz farklı deney sıcaklığında toplam 189 adet viskozite ölçümü uygulanmıştır. Farklı miktarda TEGPB içeren her bir modifiye bitümle;

- Her bir deney sıcaklığında üç ile on arasında değişen sayıda ölçüm yapılmıştır.

- Ölçüm yapılan her bir deney sıcaklığında bitümün sahip olduğu viskozite değeri o sıcaklıktaki ölçümlerin ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir.

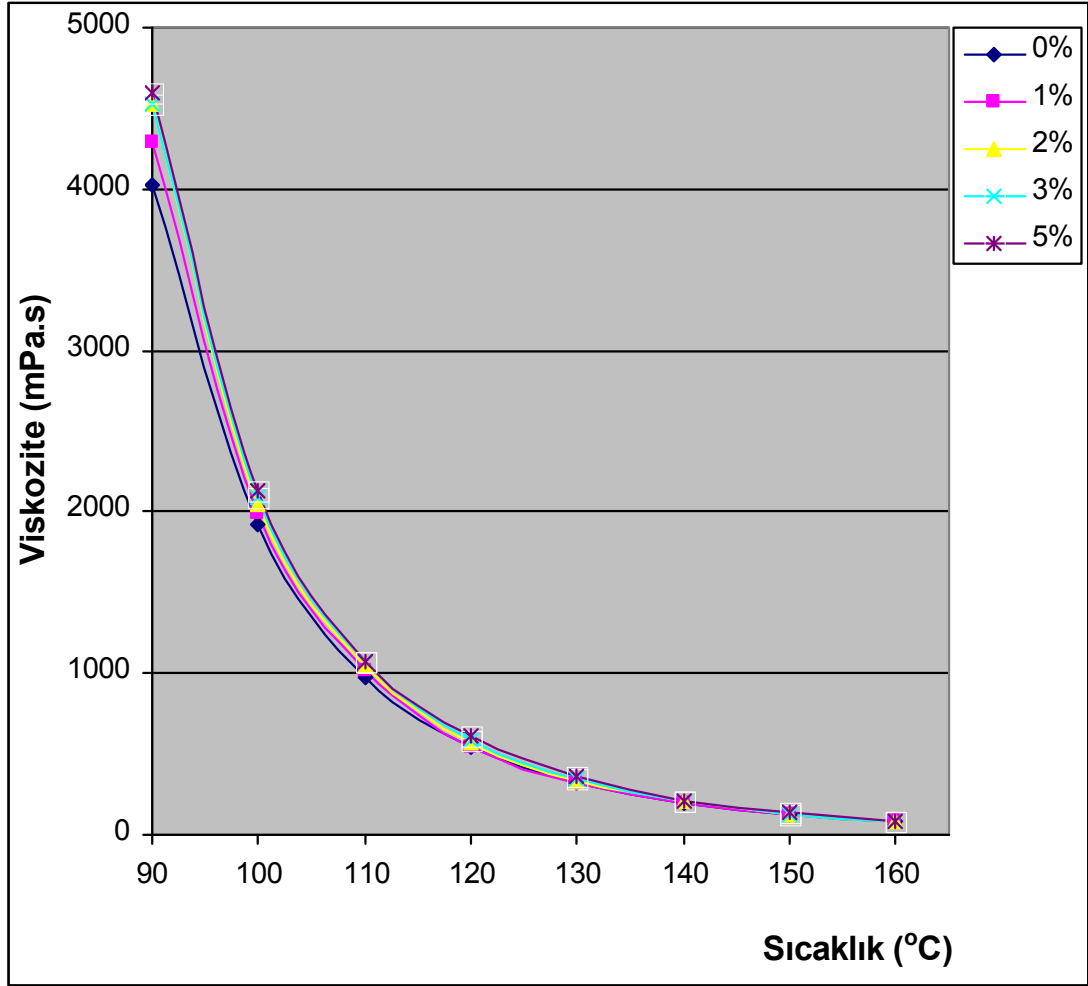
Çizelge 6.16'da orijinal ve TEGPB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden verilmiştir. TEGPB katkılı bitümlere ait tüm viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler ise EK-13'te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Çizelge 6.16. Orijinal ve TEGPB katkılı bitümler için farklı sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Bitümün İhtiva Ettiği TEGPB Oranı				
	0%	1%	2%	3%	5%
160	81,7	82,0	83,7	86,0	87,1
150	126,0	126,7	130,9	131,6	133,5
140	193,3	195,5	207,9	208,0	215,6
130	315,5	321,2	330,7	341,3	358,6
120	537,8	546,0	576,6	590,7	613,1
110	976,5	1017,6	1040,8	1065,6	1074,1
100	1917,7	1995,5	2047,3	2091,3	2127,2
90	4026,7	4285,3	4520,2	4524,2	4592,3

Çizelge 6.16'daki değerler, sıcaklık arttıkça orijinal ve modifiye bitümlerin viskozitelerinde hızlı azalmaların oluştuğunu göstermektedir.

Şekil 6.14'te orijinal (katkısız) ve değişik oranlarda (%1, %2, %3, %5) TEGPB katkılı bitümlerin viskozite özelliklerinin 90°C-160°C arasında bulunan deney sıcaklıklarındaki değişimleri toplu halde sunulmuştur.

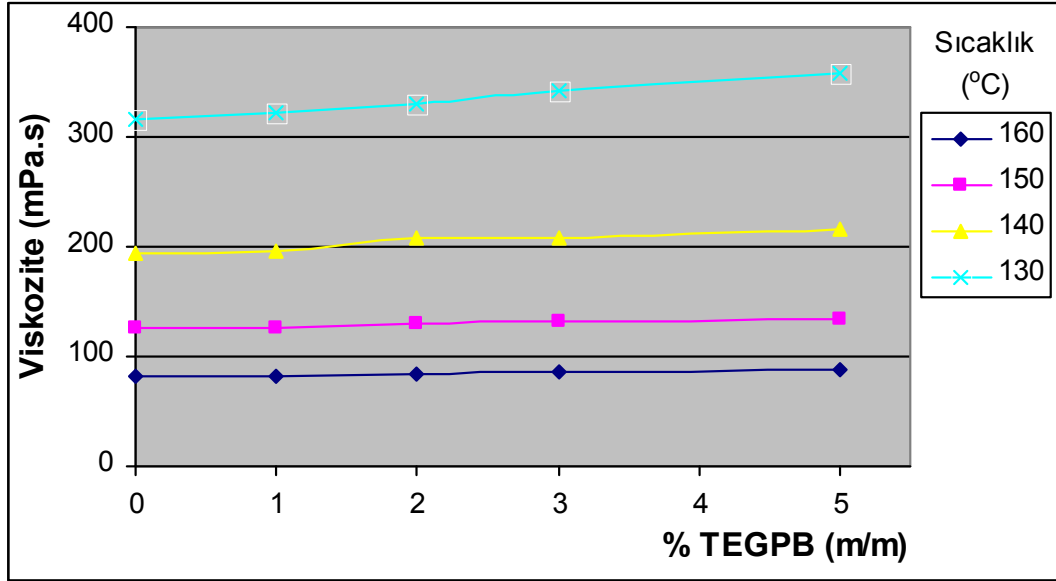


Şekil 6.14. Orijinal ve TEGPB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

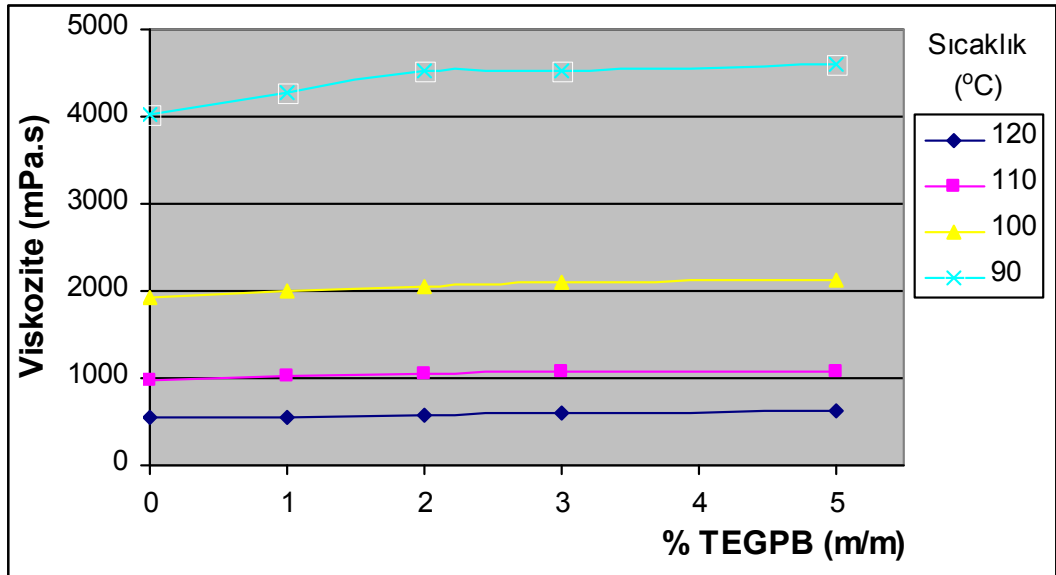
Şekil 6.14'teki grafiksel gösterimde sıcaklık arttığında viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, TEGPB'nin bitüme ilave edilmesi ile orijinal duruma göre bitüm viskozitesinin arttığı da görülebilmektedir. Yani bu tür katkı maddesi ile modifikasyon, organik esaslı metal katkı maddelerine kıyasla bitüme daha farklı bir davranış özelliği kazandırmaktadır.

Çizelge 6.16'da verilen viskozite sonuçlarının katkı maddesi oranlarına (konsantrasyon) göre değişimleri 90°C ile 160°C arasındaki deney sıcaklıkları için incelenmiştir. Viskozite değerleri geniş bir aralıkta dağılım gösterdiklerinden ötürü bu değişim de önceki katkı maddelerinde olduğu gibi

Şekil 6.15a'da ve Şekil 6.15b'de olmak üzere iki farklı grafiksel gösterim halinde sunulmuştur. Şekil 6.15a'da 130°C ile 160°C, Şekil 6.15b'de ise 90°C ile 120°C arasındaki deney sıcaklıkları için bitüm viskozitesinin katkı maddesi miktarına (konsantrasyon) bağlı olarak değişimleri sunulmuştur.



Şekil 6.15a. Bitüm viskozitesinin TEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (130°C-160°C arasında)



Şekil 6.15b. Bitüm viskozitesinin TEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (90°C-120°C arasında)

Şekil 6.14, Şekil 6.15a ve Şekil 6.15b incelenmesiyle TEGPB'nin bitüm davranışında meydana getirdiği değişiklikler şöyle özetlenebilir;

- Bitüm, TEGPB ile modifiye edildiğinde viskozitesinde artma oluşmaktadır.
- İlave edilen TEGPB oranı arttıkça bitümün viskozitesindeki artış yükselmektedir.
- Sıcaklık azaldıkça TEGPB modifikasyonunun viskozite üzerindeki arttırıcı etkisi miktar bakımından artmaktadır.

Çizelge 6.17'de TEGPB modifikasyonu sonucu orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından oluşan değişimler bitüme ilave edilen katkı maddesi oranlarına göre verilmiştir. Çizelgedeki her bir hücrede bulunan ilk değer orijinal viskoziteye göre oluşan değişim miktarını (mPa.s cinsinden), ikinci değer ise orijinal viskoziteye göre oluşan oransal (%) değişimi ifade etmektedir.

Çizelge 6.17. TEGPB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Orijinal Bitüme İlave Edilen TEGPB Oranı (Ağırlıkça)			
	%1	%2	%3	%5
160	0,3/0,4	2/2,4	4,3/5,3	5,4/6,6
150	0,7/0,6	4,9/3,9	5,6/4,4	7,5/6,0
140	2,2/1,1	14,6/7,6	14,7/7,6	22,3/11,5
130	5,7/1,8	15,2/4,8	25,8/8,2	43,1/13,7
120	8,2/1,5	38,8/7,2	52,9/9,8	75,3/14,0
110	41,1/4,2	64,3/6,6	89,1/9,1	97,6/10,0
100	77,8/4,1	129,6/6,8	173,6/9,1	209,5/10,9
90	258,6/6,4	493,5/12,3	497,5/12,4	565,6/14,0

Çizelge 6.17'deki değerler incelendiğinde 90°C ile 160°C arasında bitümdeki katkı maddesi içeriği arttıkça viskozitedeki miktar ve oran bakımından değişimin gittikçe arttığı görülmektedir. Bu sıcaklık aralığında TEGPB modifikasyonu orijinal bitüm viskozitesini %14'e varan oranlarda arttırabilmektedir. Miktar bakımından incelendiğinde ise orijinal bitüme göre TEGPB modifikasyonu ile meydana gelen en büyük artma 565,6 mPa.s'tır. Bu değere ağırlıkça %5 oranında katkı maddesi içeren bitümün 90°C'deki ölçüm sonucu ile ulaşılmıştır.

90°C ile 160°C arasında gerçekleştirilen viskozite test sonuçlarına göre TEGPB'nin bitümün viskozitesini arttırdığı anlaşılmaktadır. Bu etki sıcaklıkla ters orantılı olarak değişmektedir. Yani katkı maddesinin bitüm davranışındaki etkisi sıcaklık arttıkça azalmakta, sıcaklık azaldıkça ise artmaktadır. Başka bir ifadeyle, bitümün agrega ile karıştırılma sıcaklıklarında (150°C~160°C) katkı maddesinin bitüm üzerindeki etkisi nispeten azalmaktadır. Bu durum katkı maddesinin bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliği bakımından avantaj yaratmaktadır.

Viskozite ölçümlerinin yapıldığı 90°C-160°C aralığı oldukça yüksek sıcaklıkları içermektedir. Bu sıcaklıkta yapılan deneyler katkı maddesinin bitümde meydana getirdiği etki hakkında bilgi verebilmektedir. Ancak katkı maddesinin üstyapının kullanım koşullarında yarattığı etki ile ilgili daha doğru değerlendirme yapabilmek için viskozite ölçümleri daha düşük sıcaklıklarda da gerçekleştirilmiştir. Bitüm, ısıyı absorbe edebilir. Hava sıcaklığı 30°C iken üstyapıdaki sıcaklık 70°C'lere kadar yükselebildiği belirtilmektedir [4]. Bu sebeple, üstyapının hizmet verdiği sıcaklıklarda TEGPB'nin bitüm davranışında meydana getirdiği değişimi belirlemek üzere viskozite testleri 50°C ile 90°C arasında 10°C farklarla gerçekleştirilmiştir. 50°C-90°C arasında yapılan ölçümlerde önceki viskozite ölçümlerine göre daha farklı deney parametreleri kullanılmıştır. Bu durum, iki ölçüm grubu için ortak değer olan 90°C'de elde edilen sonuçlardaki farklılıklardan anlaşılabilmektedir. Ancak değerlendirmeler aynı parametreler kullanılarak ölçüm yapılan sonuçlar

arasında yapıldığından değerlendirme açısından herhangi bir sakınca oluşmamaktadır. Deneylerde kullanılan parametrelerle ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 5.4.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.18’de farklı oranlarda TEGPB içeren bitümlere 50°C ile 90°C arasında uygulanan viskozite test sonuçları toplu olarak sunulmuştur.

Çizelge 6.18. Orijinal ve TEGPB ihtiva eden bitümlerin 50°C-90°C arasındaki viskozite ölçüm sonuçları (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Bitümün İhtiva Ettiği TEGPB İçeriği				
	0%	1%	2%	3%	5%
50	737796,5	781916,7	854254,7	866729,2	917384,2
60	138985,3	153120,1	160477,6	165047,2	168470,8
70	35782,7	38809,9	41022,4	41598,2	41989,1
80	11821,0	12201,6	12844,8	13070,4	13524,4
90	4748,0	4918,5	4970,8	5002,3	5161,1

Çizelge 6.18’deki ölçüm sonuçlarında da 90°C ile 160°C arasında yapılan ölçüm sonuçlarına benzer olarak TEGPB ile modifikasyonun bitümün viskozitesini arttırdığı görülmektedir.

Çizelge 6.19’da TEGPB modifikasyonu ile orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından oluşan değişimler bitüme eklenen katkı maddesi oranlarına göre verilmiştir. Çizelgedeki her bir hücrede bulunan ilk değer orijinal viskoziteye göre oluşan değişim miktarını (mPa.s cinsinden), ikinci değer ise orijinal viskoziteye göre oluşan oransal (%) değişimi ifade etmektedir.

Çizelge 6.19. TEGPB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Orijinal Bitüme İlave Edilen TEGPB Oranı (Ağırlıkça)			
	%1	%2	%3	%5
50	44120,2/6,0	116458,2/15,8	128932,7/17,5	179587,7/24,3
60	14134,8/10,2	21492,3/15,5	26061,9/18,8	29485,5/21,2
70	3027,2/8,5	5239,7/14,6	5815,5/16,3	6206,4/17,3
80	380,6/3,2	1023,8/8,7	1249,4/10,6	1703,4/14,4
90	170,5/3,6	222,8/4,7	254,3/5,4	413,1/8,7

Çizelge 6.19'daki değerler incelendiğinde 50°C ile 90°C arasında bitümdeki katkı maddesi içeriği arttıkça viskozitedeki miktar ve oran bakımından değişimin gittikçe arttığı görülmektedir. Bu sıcaklık aralığında TEGPB modifikasyonu orijinal bitüm viskozitesini %24,3'e varan oranlarda arttırabilmektedir. Miktar bakımından incelendiğinde ise TEGPB modifikasyonu ile meydana gelen en büyük artma 179587,7 mPa.s'tır. Bu değerlere %5 TEGPB içeriğinde ve 50°C'de ulaşılmaktadır.

TEGPB'nin 50°C ile 160°C arasında bitüm viskozitesi üzerinde miktar ve oran olarak meydana getirdiği değişimler Çizelge 6.17 ve Çizelge 6.19'da görülmektedir. Çizelgeler incelendiğinde, sıcaklık azaldıkça TEGPB'nin bitüm viskozitesi üzerindeki etkisinin daha fazlalaştığı anlaşılmaktadır. Bu etki, 50°C'de ağırlıkça %5 oranında katkı maddesi içeriğinde %24,3'e kadar ulaşabilmektedir.

Viskozite test sonuçları, TEGPB ile modifikasyon sonucunda bitüm davranışında etkili bir değişimin meydana geldiğini göstermektedir. Bitümün TEGPB ile modifiye edilmesiyle viskozitesi artmaktadır yani orijinal bitüme göre daha sert özellikte bitüm elde edilmektedir.

Tekerlek izi, kalıcı deformasyon tipinde olan oldukça önemli bir bozulmadır. Çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilen bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı direncinin arttığına yönelik araştırmalar mevcuttur [33, 51, 53]. Bu çalışmalar içerisinde bitüme ağırlıkça %2 oranında epoksi reçinesi ilave edilen araştırmadaki DSR test sonuçlarına göre, modifikasyon ile bitümün tekerlek izine karşı direncini ifade eden parametre değeri %22 oranında arttırılmaktadır [33]. Diğer araştırmalarda da [51, 53] katkı maddesi ilavesi ile bitümün hem viskozitesi artmakta hem de DSR test sonuçlarına göre bitümün tekerlek izi direnç parametre değeri artmaktadır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen viskozite test sonuçlarına göre, esnek üstyapılarda TEGPB modifikasyonlu bitüm kullanımı ile üstyapının tekerlek izine karşı direncinin arttırılabileceği görülmektedir. Bunun yanı sıra, bu tür bitüm kullanımı ile üstyapıda lastik deseni oluşumu ve kuma problemleri de azaltılabilir niteliktedir.

6.1.9. Dietilen glikol esaslı polibor bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları

DEGPB'nin bitüm davranışı üzerindeki etkisini belirleyebilmek için önceki katkı maddelerinde olduğu gibi öncelikle viskozite testleri uygulanmıştır. Ancak TEGPB modifikasyonlu bitümlerin test sonuçları ışığında; DEGPB ile viskozite testleri 50°C ile 90°C arasında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlara göre testin 90°C ile 160°C arasında uygulanmasına gerek görülmemiştir.

Orijinal bitüme ağırlıkça %1, %2, %3 ve %5 oranlarında DEGPB ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu bitümlere 50°C, 60°C, 70°C, 80°C ve 90°C'de viskozite testleri uygulanmıştır.

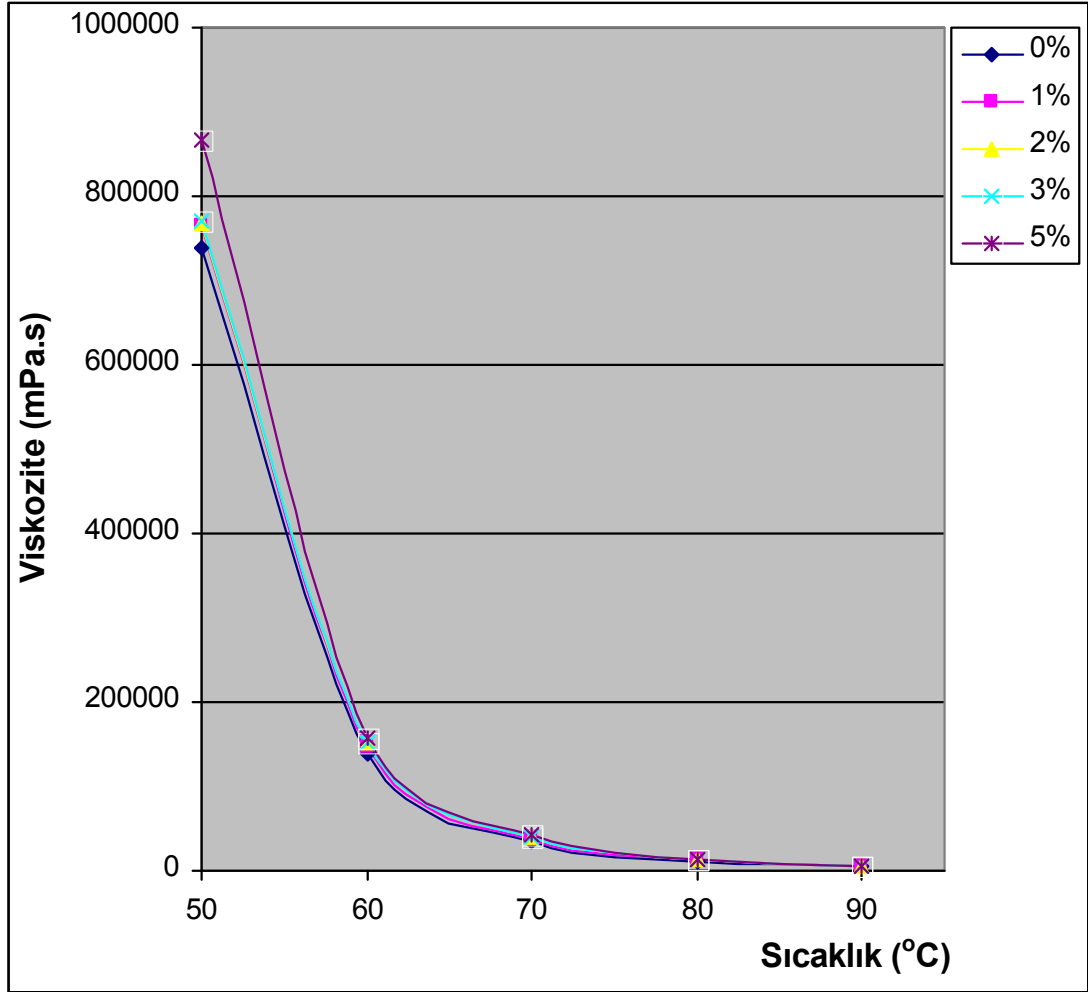
Orijinal (katkısız) ve ağırlıkça %1, %2, %3, %5 oranlarında DEGPB katkılı bitümlere ait 50°C ile 90°C arasındaki viskozite test sonuçları mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden Çizelge 6.20’de sunulmuştur.

Çizelge 6.20. Orijinal ve DEGPB ihtiva eden bitümlerin 50°C-90°C arasındaki viskozite ölçüm sonuçları (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Bitümün İhtiva Ettiği DEGPB Oranı				
	%0	%1	%2	%3	%5
50	737796,5	765159,7	768915,8	771069,1	866240,1
60	138985,3	147827,9	151758,7	151775,4	156883,6
70	35782,7	38022,7	40259,8	41091,1	41758,5
80	11821,0	12157,8	12398,4	12901,3	13277,6
90	4748,0	4814,0	4848,6	4867,2	5052,9

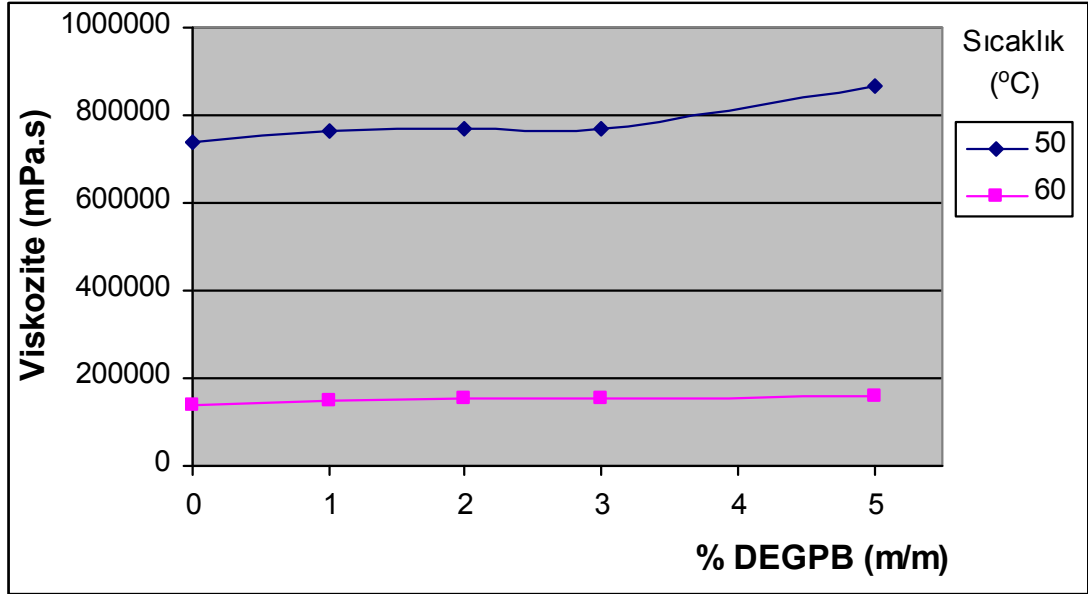
Çizelge 6.20 incelendiğinde sıcaklık arttıkça viskozite değerlerinin hızla azaldığı görülmektedir.

Şekil 6.16’da orijinal (katkısız) ve değişik oranlarda (%1, %2, %3, %5) DEGPB katkılı bitümlerin viskozite özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri toplu halde sunulmuştur. Grafikselsel gösterimde sıcaklık arttığında viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, DEGPB’nin bitüme eklenmesi ile bitümün viskozitesinde artışın meydana geldiği de görülebilmektedir.

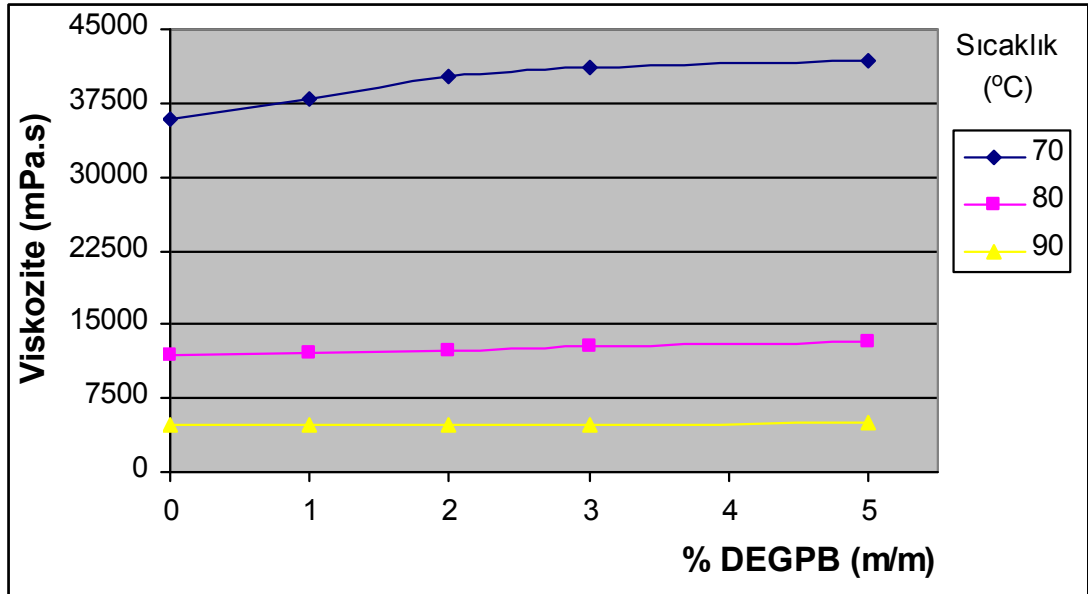


Şekil 6.16. Orijinal ve DEG PB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

Çizelge 6.20’de verilen viskozite sonuçlarının katkı maddesi oranlarına (konsantrasyon) göre değişimleri 50°C ile 90°C arasındaki her bir deney sıcaklığı için incelenmiştir. Viskozite değerleri geniş bir aralıkta dağılım gösterdiklerinden ötürü bu değişim de önceki katkı maddesinde olduğu gibi Şekil 6.17a’da ve Şekil 6.17b’de olmak üzere iki farklı grafiksel gösterim halinde sunulmuştur. Şekil 6.17a’da 50°C ve 60°C’deki, Şekil 6.17b’de ise 70°C, 80°C ve 90°C’deki bitüm viskozitesinin katkı maddesi miktarına (konsantrasyon) bağlı olarak değişimleri görülmektedir.



Şekil 6.17a. Bitüm viskozitesinin DEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (50°C ve 60°C)



Şekil 6.17b. Bitüm viskozitesinin DEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (70°C, 80°C ve 90°C)

Şekil 6.16, Şekil 6.17a ve Şekil 6.17b incelenmesiyle DEGPB'nin bitüm davranışında meydana getirdiği değişiklikler şöyle özetlenebilir;

- Bitüm, DEGPB ile modifiye edildiğinde viskozitesinde artma oluşmaktadır.
- İlave edilen DEGPB miktarı arttıkça bitümün viskozitesindeki artış yükselmektedir.
- Sıcaklık azaldıkça DEGPB modifikasyonunun viskozite üzerindeki artırıcı etkisi miktar bakımından artmaktadır.

DEGPB de TEGPB gibi bitümün viskozitesini arttırmaktadır. Ancak iki katkı maddesi için elde edilen viskozite sonuçları incelendiğinde DEGPB ile oluşan artışın daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, DEGPB'nin de bitümün plentte agrega ile karıştırılma ve karışımın yola serilip sıkıştırma sıcaklıklarını önemli miktarda arttırmayacağını göstermektedir. Bu yüzden bu katkı maddesi ile daha yüksek sıcaklıklarda viskozite ölçümleri yapılmasına gerek görülmemiştir.

Çizelge 6.21'de DEGPB modifikasyonu ile orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından oluşan değişimler bitüme eklenen katkı maddesi oranlarına göre verilmiştir. Çizelgedeki her bir hücrede bulunan ilk değer orijinal viskoziteye göre oluşan değişim miktarını (mPa.s cinsinden), ikinci değer ise orijinal viskoziteye göre oluşan oransal (%) değişimi ifade etmektedir.

Çizelge 6.21. DEGPB modifikasyonunun orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Orijinal Bitüme İlave Edilen DEGPB Oranı (Ağırlıkça)			
	%1	%2	%3	%5
50	27363,2/3,7	31119,3/4,2	33272,6/4,5	128443,6/17,4
60	8842,6/6,4	12773,4/9,2	12790,1/9,2	17898,3/12,9
70	2240/6,3	4477,1/12,5	5308,4/14,8	5975,8/16,7
80	336,8/2,8	577,4/4,9	1080,3/9,1	1456,6/12,3
90	66,0/1,4	100,6/2,1	119,2/2,5	304,9/6,4

Çizelge 6.21'deki değerler incelendiğinde 50°C ile 90°C arasında bitümdeki katkı maddesi içeriği arttıkça viskozitedeki değişimin miktar ve oran bakımından gittikçe arttığı görülmektedir. Bu sıcaklık aralığında DEGPB modifikasyonu orijinal bitüm viskozitesini %17,4'e varan oranlarda arttırabilmektedir. Miktar bakımından incelendiğinde ise DEGPB modifikasyonu ile meydana gelen en büyük artma 128443,6 mPa.s'tır.

Viskozite test sonuçlarına göre, DEGPB ile modifikasyon sonucu bitüm davranışında etkili bir değişim meydana gelmektedir. Bitümün DEGPB ile modifiye edilmesiyle viskozite artmaktadır yani orijinal duruma göre daha sert özellikte bitüm elde edilmektedir. Modifiye bitümlerde kullanılan modifiyerler arasında kırıntı formlu kauçuk malzeme önemli bir yere sahiptir. Bu malzemenin ilave edilmesiyle bitümün viskozitesi ve tekerlek izi direnç parametresi artmaktadır [32, 38]. Benzer sonuçlar içeren çalışmalar [33, 51, 53] incelendiğinde, DEGPB'nin bitümün tekerlek izi dayanımının artırılmasında kullanılabilir özellikte bir katkı maddesi olduğu anlaşılmaktadır. DEGPB modifikasyonlu bitümün esnek üstyapıda kullanılmasıyla üstyapının tekerlek izi direnci artırılabilir. Bunun yanı sıra, bu tür bitüm kullanımı ile üstyapıda lastik deseni oluşumu ve kuma problemleri de azaltılabilir niteliktedir.

6.1.10. Monoetilen glikol esaslı polibor bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin viskozite test sonuçları

Orijinal bitüme ağırlıkça %1, %2, %3 ve %5 oranlarında MEGPB ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu bitümlere 50°C, 60°C, 70°C, 80°C ve 90°C'de viskozite testleri uygulanmıştır.

Orijinal (katkısız) ve ağırlıkça %1, %2, %3, %5 oranlarında MEGPB katkılı bitümlere ait 50°C ile 90°C arasındaki viskozite test sonuçları mPa.s (miliPaskal*saniye) cinsinden Çizelge 6.22'de sunulmuştur.

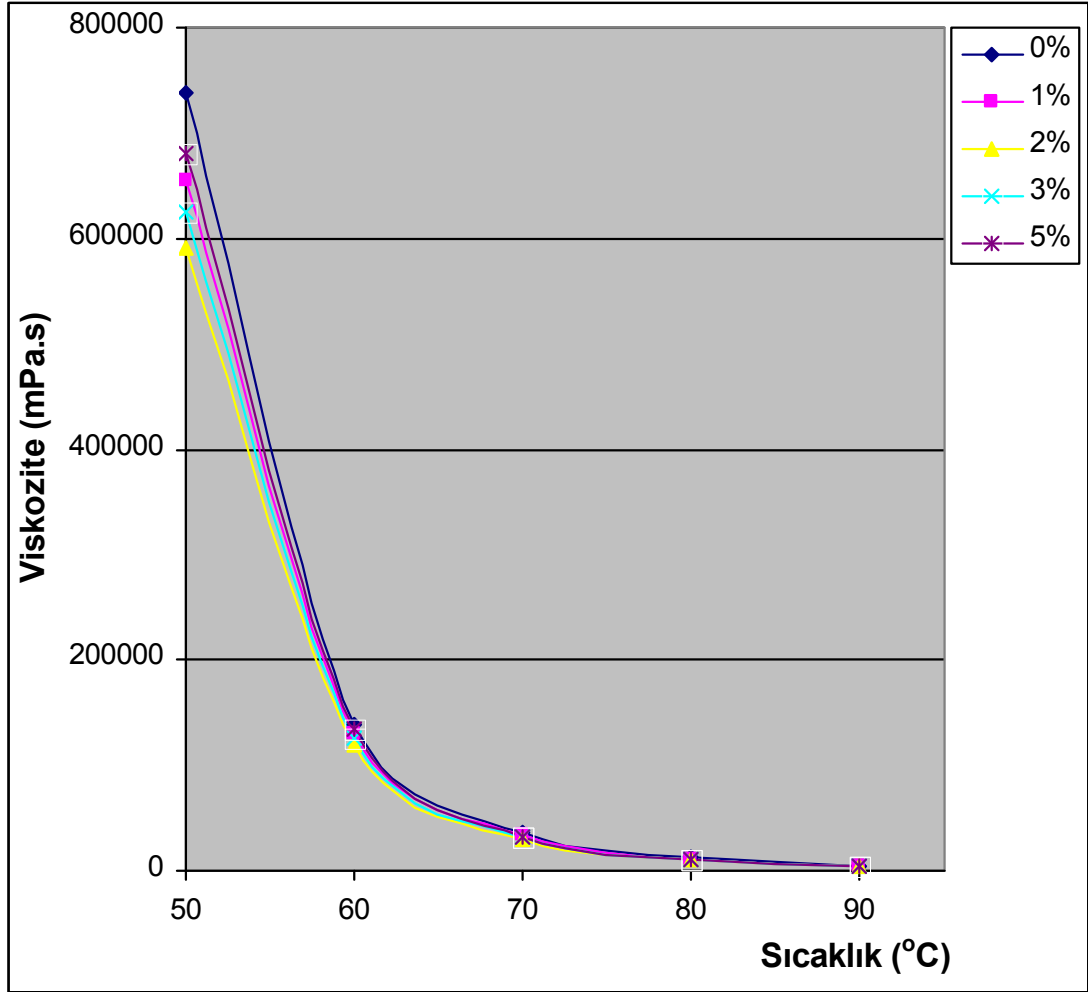
Çizelge 6.22. Orijinal ve MEGPB ihtiva eden bitümlerin 50°C-90°C arasındaki viskozite ölçüm sonuçları (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Bitümün İhtiva Ettiği MEGPB İçeriği				
	0%	1%	2%	3%	5%
50	737796,5	654481,1	591941,7	624200,2	679668,7
60	138985,3	129917,1	120160,1	126924,4	133795,5
70	35782,7	33261,5	30287,2	31111,2	32673,9
80	11821,0	11318,5	10434,0	10992,7	11729,1
90	4748,0	4423,3	3858,6	4450,9	4808,6

Çizelge 6.22’de görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça viskozite değerleri hızla azalmaktadır.

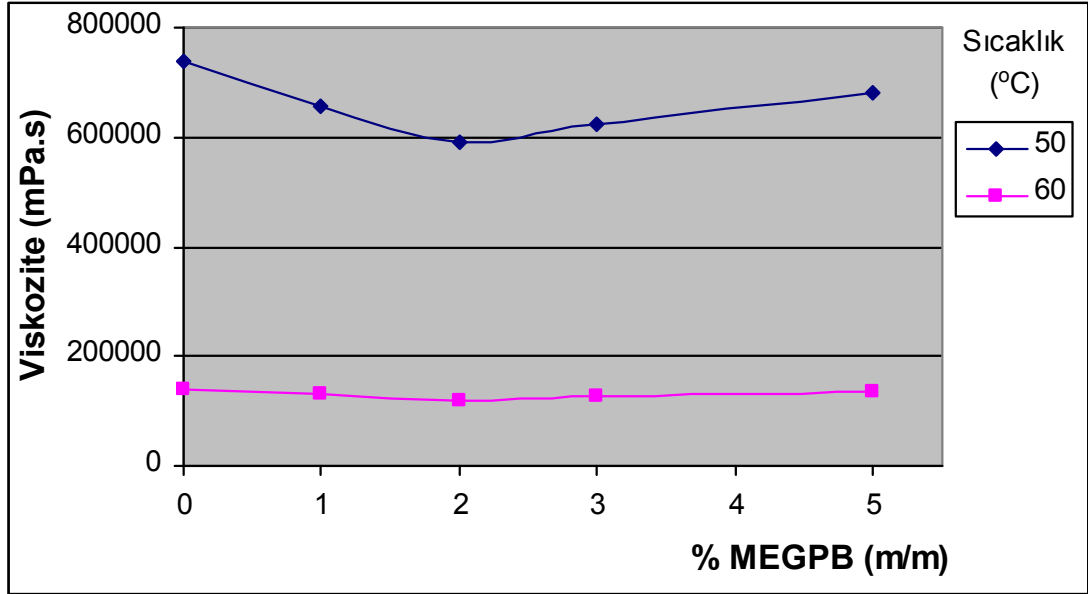
Şekil 6.18’de orijinal (katkısız) ve değişik oranlarda (%1, %2, %3, %5) MEGPB katkılı bitümlerin viskozite özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri toplu halde sunulmuştur.

Şekil 6.18’deki grafiksel gösterimde sıcaklık arttığında viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, diğer etilen glikol esaslı polibor bileşiklerinden (TEGPB ve DEGPB) farklı olarak MEGPB’nin bitüme eklenmesi ile bitümün viskozitesinde azalmanın meydana geldiği görülebilmektedir.

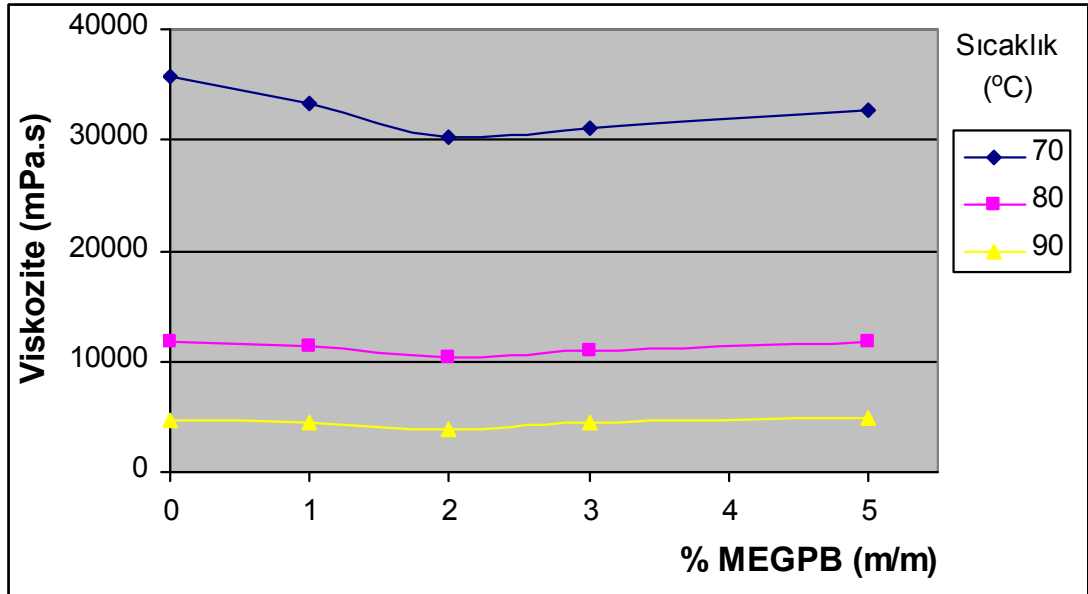


Şekil 6.18. Orijinal ve MEGPB katkılı bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

Çizelge 6.22’de verilen viskozite sonuçlarının katkı maddesi oranlarına (konsantrasyon) göre değişimleri 50°C ile 90°C arasındaki her bir deney sıcaklığı için incelenmiştir. Viskozite değerleri geniş bir aralıkta dağılım gösterdiklerinden ötürü bu değişim de önceki katkı maddelerinde olduğu gibi Şekil 6.19a’da ve Şekil 6.19b’de olmak üzere iki farklı grafiksel gösterim halinde sunulmuştur. Şekil 6.19a’da 50°C ve 60°C’deki, Şekil 6.19b’de ise 70°C, 80°C ve 90°C’deki bitüm viskozitesinin katkı maddesi miktarına (konsantrasyon) bağlı olarak değişimleri görülmektedir.



Şekil 6.19a. Bitüm viskozitesinin MEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (50°C ve 60°C)



Şekil 6.19b. Bitüm viskozitesinin MEGPB konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi (70°C, 80°C ve 90°C)

Şekil 6.18, Şekil 6.19a ve Şekil 6.19b incelenmesiyle MEGPB'nin bitüm davranışında meydana getirdiği değişiklikler şöyle özetlenebilir;

- Bitüm, MEGPB ile modifiye edildiğinde viskozitesinde genel olarak azalma oluşmaktadır.
- Bitüm viskozitesindeki en büyük azalma MEGPB'nin bitüme ağırlıkça %2 oranında ilave edildiğinde oluşmaktadır.
- Bitüme ilave edilen MEGPB oranı %2'den %5'e doğru arttıkça viskozitede oluşan azalma miktarı düşmektedir.
- İlave edilen MEGPB oranı %5 olduğunda orijinal bitüm viskozitesine yakın sonuçlar elde edilmektedir.
- Sıcaklık azaldıkça MEGPB modifikasyonunun viskozite üzerindeki azaltıcı etkisi miktar bakımından artmaktadır.

Çizelge 6.23'te MEGPB modifikasyonu ile orijinal bitümün viskozitesinde miktar ve oran bakımından oluşan değişimler bitüme eklenen katkı maddesi miktarlarına göre verilmiştir. Çizelgedeki her bir hücrede bulunan ilk değer orijinal viskoziteye göre oluşan değişim miktarını (mPa.s cinsinden), ikinci değer ise orijinal viskoziteye göre oluşan oransal (%) değişimi ifade etmektedir.

Çizelge 6.23. MEGPB modifikasyonunun orijinal bitüm viskozitesinde miktar ve oran bakımından meydana getirdiği değişimler

Sıcaklık (°C)	Orijinal Bitüme İlave Edilen MEGPB Oranı (Ağırlıkça)			
	%1	%2	%3	%5
50	-83315,4/11,3	-145854,8/19,8	-113596,3/15,4	-58127,8/7,9
60	-9068,2/6,5	-18825,2/13,5	-12060,9/8,7	-5189,8/3,7
70	-2521,2/7	-5495,5/15,4	-4671,5/13,1	-3108,8/8,7
80	-502,5/4,3	-1387/11,7	-828,3/7	-91,9/0,8
90	-324,7/6,8	-889,4/18,7	-297,1/6,3	60,6/1,3

Çizelge 6.23'teki değerler incelendiğinde, 50°C ile 90°C arasındaki deney sıcaklıklarında miktar ve oran bakımından bitüm viskozitedeki en büyük azalmanın MEGPB'nin %2 oranında ilave edilmesiyle olduğu görülmektedir.

Bu sıcaklık aralığında ağırlıkça %2 oranındaki MEGPB modifikasyonu orijinal bitüm viskozitesini %19,8'e varan oranlarda azaltabilmektedir. Miktar bakımından incelendiğinde ise MEGPB modifikasyonu ile meydana gelen en büyük azalma 145854,8 mPa.s'tır.

Etilen glikol esaslı polibor bileşiklerinin (TEGPB, DEGPB ve MEGPB) bitüm davranışında yarattığı değişimler yukarıda sunulmuştur. Bu katkı maddeleri ile modifiye edilmiş bitümlerin esnek üstyapılarda kullanımı ile sağlanacak avantajlar ise aşağıda belirtilmektedir.

Viskozite test sonuçlarına göre bitümün TEGPB veya DEGPB ile modifikasyonu viskozitesini arttırmaktadır. Çeşitli sıcaklıklarda gerçekleştirilen testlere ait sonuçlar, belirtilen katkı maddelerinden TEGPB ile modifikasyonun bitüm viskozitesinde daha fazla artış oluşturduğunu göstermektedir. Bu sonucun yanı sıra, her iki katkı maddesi ile modifikasyon sonucu bitüm viskozitesinde meydana gelen artışın sıcaklıkla yakından ilişkili olduğu anlaşılabilmektedir. Buna göre, katkı maddeleri sıcaklık azaldıkça bitüm davranışında daha etkili olmakta ve orijinal durumuna kıyasla bitümün fiziksel sertliğini arttırmaktadırlar. Sıcaklık yükseldiğinde ise viskozite üzerindeki etkileri azalmaktadır. Bu durum Şekil 6.14 ve Şekil 6.16'nın incelenmesiyle görülebilir. Katkı maddelerinin bitüm davranışı üzerinde bu türlü farklılaşan davranış değişikliği sağlaması bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirlikleri bakımından avantaj sağlamaktadır. Şöyle ki;

Bitümün agrega ile plentte karıştırılması esnasında viskozitesinin 200 mPa.s olması tercih edilir [6]. Bitümün TEGPB ve DEGPB ile modifikasyonu, bu viskozite değerine daha yüksek sıcaklıkta sahip olmasına sebep olacaktır. Bu da plent sıcaklığının arttırılmasını gerektirecektir. Ancak katkı maddelerinin viskozite üzerindeki etkisi sıcaklık arttıkça azalmaktadır. TEGPB ile modifiye edilen bitümlere 160°C'de uygulanan test sonuçlarına göre orijinal bitüm viskozitesine göre oluşan en büyük artış oranı %6,6'dır. Bu değer ağırlıkça %5 oranında TEGPB içeren bitümde meydana gelmiştir. Katkı maddesi

miktarının daha az olması durumunda veya TEGPB yerine DEGPB kullanılması durumunda viskozitedeki artış oranı daha da azalmaktadır. Şekil 6.14 ve EK-13'te sunulan grafiklerden orijinal ve TEGPB katkılı bitümlerin 200 mPa.s'lik viskozite değerine sahip oldukları sıcaklıklar belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 6.24'te sunulmuştur.

Çizelge 6.24. Orijinal ve TEGPB katkılı bitümlerin 200 mPa.s viskozite değerine sahip oldukları sıcaklıklar

Bitümün İhtiva Ettiği TEGPB Oranı (%)	Bitüm Viskozitesinin 200 mPa.s Olması İçin Gereken Plent Sıcaklığı (°C)	Orijinal Bitüm Kullanımına Göre Plent Sıcaklığında Oluşacak Artış Miktarı (°C)
0	139,5	-
1	139,6	0,1
2	141,0	1,5
3	141,1	1,6
5	141,9	2,4

Çizelge 6.24 incelendiğinde, bitümlü sıcak karışımlarda TEGPB ile modifiye edilen bitüm kullanımının plent sıcaklığını çok az etkilediği anlaşılmaktadır. Bitüm modifikasyonunda DEGPB kullanımı durumunda ise Çizelge 6.24'te görülen değerlerden daha düşük artışlar oluşacaktır. Bu sonuçlar ışığında, bitümlü sıcak karışımlarda TEGPB veya DEGPB ile modifiye edilmiş bitüm kullanımının plent sıcaklığını arttırmayacağı ve buna bağlı olarak bitümde ek yaşlanma oluşmayacağı söylenebilir. Bunun yanı sıra plent sıcaklığının artmaması bitümlü sıcak karışımların imalatı için harcanan enerjinin de daha fazla artmamasını sağlayacaktır.

Sıcak karışımda bulunan bitümün viskozitesi 3000 mPa.s'tan daha fazla olmasıyla karışım sıkıştırılamayacak kadar katı hale gelmektedir [6]. Şekil 6.14 ve EK-13'te sunulan grafiklerden orijinal ve TEGPB katkılı bitümlerin

3000 mPa.s'lik viskozite değerine sahip oldukları sıcaklıklar belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 6.25'te sunulmuştur.

Çizelge 6.25. Orijinal ve TEGPB katkılı bitümlerin 3000 mPa.s viskozite değerine sahip oldukları sıcaklıklar

Bitümün İhtiva Ettiği TEGPB Oranı (%)	Bitüm Viskozitesinin 3000 mPa.s Olması İçin Gereken Sıcaklık (°C)	Orijinal Bitüm Kullanımına Göre Sıkıştırma Altsınır Sıcaklığında Oluşacak Artış Miktarı (°C)
0	94,9	-
1	95,6	0,7
2	96,2	1,3
3	96,3	1,4
5	96,5	1,6

Çizelge 6.25'teki veriler; plant sıcaklığı ile ilgili elde edilen sonucun, TEGPB veya DEGPB modifiyeli bitümle hazırlanan sıcak karışımların yola serilme ve sıkıştırılma hususlarında da benzer şekilde geçerli olduğunu göstermektedir. Buna göre, TEGPB veya DEGPB modifikasyonlu bitüm ile hazırlanan sıcak karışımların modifikasyon sebebiyle işlenebilirliklerinde meydana gelen azalma ihmal edilebilir düzeydedir ve pratikte herhangi bir azalma olmadığı söylenebilir.

Tekerlek izi esnek üstyapılarda görülen önemli bir bozulma türüdür. Zemindeki veya üstyapıda bulunan temel tabakasındaki yetersizlikler oluşumlarında etken olabilir. Bunun yanı sıra tabakaların sıkıştırılmasındaki yetersizlik ve kaplama tabakalarında aşırı bitüm kullanımı da üstyapıda tekerlek izlerinin oluşmasına yol açabilmektedir [4]. Ancak yüksek hava sıcaklıklarında ağır ve uzun süreli yüklemeler tekerlek izinin meydana gelmesinde oldukça etkilidir. Bu tür bozulmalara, sıcak havanın hakim olduğu bölgelerdeki ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu karayolu kesimlerinde sıkça rastlanmaktadır.

Üstyapıda oluşan tekerlek izleri trafik güvenliğini olumsuz yönde etkiler. Yağış olması durumunda yüzeysel suların bu oluklarda birikmesi ile trafik güvenliği bakımından tekerlek izlerinin meydana getirdiği mevcut tehlike artar. Ayrıca bu oluklarda biriken suların donması tehlikeyi daha da arttırır. Suyun üstyapı üzerinde birikmesi istenmeyen bir durumdur. Tekerlek izi olukları suyun birikebilmesi için uygun ortam oluşturur. Burada biriken suların üstyapı içerisine nüfuz etmesi soyulma problemine ve bitümün oksitlenmesinin artması ile daha hızlı yaşlanmasına yol açar. Böyle bir durumda da üstyapıda farklı türde bozulmalar oluşabilmektedir. Ayrıca, üstyapıda oluşan tekerlek izlerinin seyahat konforunu azaltması bu bozulma türünün sebep olduğu bir diğer olumsuzluktur [4].

Esnek üstyapı; tasarım, imalat ve malzeme kalitesi bakımından yeterli özelliklere sahip olsa dahi yüksek hava sıcaklıklarında ve ağır yüklemeler etkisi altında tekerlek izleri oluşabilmektedir. Standart aks yükü kullanılarak gerçekleştirilen Ağır Araç Simülatör testlerine göre (Heavy Vehicle Simulator-HVS) 60°C'lik kaplama yüzey sıcaklığında oluşan tekerlek izi oranının 40°C'lik kaplama yüzey sıcaklığında oluşandan 20 kat fazla olabileceği belirtilmiştir [56]. Bu durum, esnek üstyapılarda oluşan tekerlek izlerinin bitümün yüksek sıcaklıklarda sahip olduğu akıcılık (kıvam) özelliği ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Bunlara bağlı olarak bitümün yüksek hava sıcaklıklarında kıvamlılığı azalmazsa ya da ne kadar az miktarda azalırsa tekerlek izi kusurunda o miktarda iyileşme görülebilecektir. Literatürde bitümün tekerlek izine karşı daha dirençli olması için çeşitli katkı maddeleri ile modifiye edilmesine yönelik çalışmalar mevcuttur [30, 32-34, 37, 38]. SBS [39, 53] ve EVA [35, 44] bu çalışmalarda kullanılan katkı maddeleri içinde en çok bilinenleridir. Esnek üstyapıların tekerlek izine karşı direncini arttırmak üzere bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi direnci arttırılmış bitümler kullanılabilmektedir. Tekerlek izi direncinin arttırılmasına yönelik olarak modifikasyonda kullanılan katkı maddelerindeki ortak özellik bitümün viskozitesini arttırmalarıdır [33, 51, 53]. Bitüme ağırlıkça %2 oranında epoksi reçinesi ilave edilen çalışmada [33] ölçüm yapılan 90°C-

170°C aralığında bitüm viskozitesi %60'a varan oranlarda artış göstermiş aynı zamanda bu modifikasyon ile bitümün tekerlek izi direnç parametresi %22 oranında arttırılmıştır.

Bitümde modifiyer olarak TEGPB veya DEGPB kullanılması viskozite artışı sağlamaktadır. Özellikle 50°C-90°C arasında uygulanan viskozite test sonuçlarına göre; orijinal bitüm viskozitesi katkı maddesi miktarına bağlı olarak TEGPB ile %25 oranında, DEGPB ile %17 oranında arttırılabilmektedir. Bu sebeple; bu katkı maddeleri ile modifikasyon, bitümün tekerlek izi direnci üzerinde olumlu sonuçlar oluşturacak özelliktedir. Sonuç olarak, TEGPB veya DEGPB modifikasyonlu bitüm kullanımı ile esnek üstyapıların tekerlek izine karşı dirençleri arttırılacaktır.

Lastik deseni ve kuma esnek üstyapılarda görülen diğer kusurlar (bozulmalar) arasındadır. Her ikisinin de meydana gelmesinde bitümün yüksek hava sıcaklıklarında kıvamını kaybetmesi başlıca etkindir. Kuma, bitümün yüksek hava sıcaklıklarında çeşitli etkilerle kaplama yüzeyinde film halinde toplanması olarak tarif edilebilir. Kuma ile kaplama yüzeyinde parlak ve sürtünme direnci düşük yüzeyler meydana gelir. Lastik deseni ise genellikle tekerlek izleri ile birlikte görülür. Taşıtların lastiklerinde bulunan olukların kaplama yüzeyine iz bırakması ile oluşurlar. Kusmanın artması ile kaplamada lastik deseni oluşumu da artar. Her iki kusur da sıcaklığa daha az duyarlı bitüm kullanımı ile iyileştirilebilir. Bu kapsamda, TEGPB veya DEGPB modifikasyonlu bitüm bu tür kusurların azaltılması için kullanılabilir özelliktedir.

MEGPB ise organik esaslı metal bileşikler ile benzer özellikte değişim yaratmaktadır. Özellikle bitüme ağırlıkça %2 oranında MEGPB ilave edilmesiyle plent sıcaklığı, bitümün kısa dönem yaşlanması, bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerji ve esnek üstyapılarda düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlaklar azaltılabilirken bitümlü karışımların işlenebilirliği,

agrega-bitüm arasındaki adezyon kuvveti ve agrega-bitüm karışımlarının soyulmaya karşı direnci arttırılabilir.

6.2. Bitüm Modifikasyonunda Optimum Katkı Maddesi Miktarı Tayini

Bu bölümde, çalışma kapsamında kullanılan her bir katkı maddesinin bitüme hangi oranda eklenmesinin daha uygun olduğu araştırılmıştır. Bu amaçla, Bölüm 6.1’de sonuçları ayrıntılı olarak verilmiş olan viskozite testlerinden yararlanılmıştır. Her bir katkı maddesi için ayrı ayrı olmak üzere, bitüme ilave edildiğinde en fazla davranış değişikliği yaratan en düşük katkı maddesi oranı araştırılmıştır ve bu oranın o katkı maddesi için bitüme ilave edilecek optimum miktar olduğu kabul edilmiştir.

Optimum miktar belirlenirken bitüme ilave edilen katkı maddesi miktarındaki birim değişim için bitüm viskozitesinde meydana gelen değişimler oransal olarak hesaplanmıştır. Organik esaslı metal bileşikleri için hesaplama aralıkları ve bu aralıklarda kullanılan hesaplama yöntemi Çizelge 6.26’da gösterilmiştir.

Çizelge 6.26. Organik esaslı metal bileşikleri için hesaplama aralıkları ve bu aralıklarda kullanılan hesaplama yöntemi

Hesaplama Aralıkları	Hesaplama Yöntemi
%0-%1	Orijinal ve %1 oranında katkı maddesi içeren bitümlerin viskoziteleri arasındaki oransal değişim
%1-%2	%1 ve %2 oranlarında katkı maddesi içeren bitümlerin viskoziteleri arasındaki oransal değişim
%2-%3	%2 ve %3 oranlarında katkı maddesi içeren bitümlerin viskoziteleri arasındaki oransal değişim
%3-%5	{%3 ve %5 oranlarında katkı maddesi içeren bitümlerin viskoziteleri arasındaki oransal değişim} / 2
%5-%10	{%5 ve %10 oranlarında katkı maddesi içeren bitümlerin viskoziteleri arasındaki oransal değişim} / 5

Tüm organik esaslı metal bileşikleri için viskozite ölçümlerinin yapıldığı sıcaklık aralığında (90°C-160°C) bitümde meydana getirdikleri değişim Çizelge 6.26'da belirtilen şekilde hesaplanmış ve her bir katkı maddesi için en fazla değişim yaratan katkı maddesi oranı tayin edilmiştir. Bunun yanı sıra; EK-7B, EK-8B, EK-9B, EK-10B, EK-11B ve EK-12B'de verilen grafikler her bir katkı maddesi cinsi ve orijinal bitüme ilave edilme oranlarına göre tüm viskozite test sıcaklıkları için ayrı ayrı incelenmiştir. Grafiklerde eğrilerin en hızlı değişim gösterdikleri aralıklar belirlenerek değerlendirmeler yapılmıştır.

6.2.1. Organik esaslı magnezyum bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini

OEMAGB için bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde bitüm viskozitesinde meydana gelen oransal değişimler Çizelge 6.27'de verilmiştir.

Çizelge 6.27. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEMAGB için)

Sıcaklık (°C)	%0-%1	%1-%2	%2-%3	%3-%5	%5-%10
160	2,08	27,13	25,73	5,77	6,95
150	2,06	14,91	6,86	2,71	9,19
140	2,28	25,62	6,69	5,07	4,35
130	2,82	14,29	5,52	5,90	5,25
120	3,85	16,21	2,28	2,89	5,84
110	4,25	12,65	4,10	4,03	6,44
100	4,19	12,74	3,64	4,55	5,85
90	1,45	13,55	3,80	4,08	6,79

Çizelge 6.27 OEMAGB ile modifiye edilen bitümler için oluşturulmuştur. Çizelgede görüldüğü üzere tüm deney sıcaklıklarında bitüm viskozitesindeki en büyük değişim, katkı maddesinin bitüme ağırlıkça %2 oranında eklendiği zaman oluşmaktadır. Bu sonuç, EK-7B’de verilen OEMAGB katkılı bitümlere ait grafiklerde viskozite değişimini gösteren eğride katkı maddesinin diğer oranlarına göre düşey ekseninde daha fazla değişim oluşması şekliyle görülebilmektedir.

6.2.2. Organik esaslı borik asit bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini

OEBAB için bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde bitüm viskozitesinde meydana gelen oransal değişimler Çizelge 6.28’de verilmiştir.

Çizelge 6.28. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEBAB için)

Sıcaklık(°C)	%0-%1	%1-%2	%2-%3	%3-%5	%5-%10
160	4,77	5,40	3,80	3,46	5,43
150	3,41	9,61	3,00	4,87	4,90
140	1,03	7,63	1,92	5,77	5,48
130	0,57	6,85	4,00	7,34	4,86
120	1,25	4,59	7,14	8,81	4,58
110	2,11	3,89	8,64	6,98	5,65
100	1,60	5,79	6,62	6,95	6,36
90	2,56	4,29	6,56	7,10	7,20

Çizelge 6.28’de verilen değerlere göre OEBAB ile modifiye edilen bitümler için tüm sıcaklıklarda en fazla değişim yaratan tek bir katkı maddesi miktarı bulunmamaktadır. Bu durum EK-8B’de verilmiş olan grafiksel gösterimlerde de görülebilmektedir. Sıcaklıklara göre en büyük değişim oluşturan katkı maddesi miktarı aralıkları Çizelge 6.29 görülmektedir.

Çizelge 6.29. OEBAB modifikasyonu ile farklı sıcaklıklarda bitüm viskozitesinde en büyük değişimin olduğu katkı maddesi aralıkları

Sıcaklık (°C)	En Büyük Değişimin Oluştığı Aralık
160	%5-%10
150	%1-%2
140	%1-%2
130	%3-%5
120	%3-%5
110	%2-%3
100	%3-%5
90	%5-%10

Çizelge 6.29 incelendiğinde OEBAB için bitüme ilave edilmesi uygun görülen optimum miktar net olarak belirlenemese de Çizelge 6.28’de 90°C, 100°C, 110°C ve 120°C’de %2-%3 aralığında oluşan değişimlerin tatminkar olabileceği düşünülmektedir. Elde edilen deneysel verilerden %2 oranında OEBAB katkılı bitüm viskozitesinden %3 oranında OEBAB katkılı bitüm viskozitesine geçerken oluşan değişimin diğer değişimlere göre baskın olduğu düşünülmektedir.

6.2.3. Organik esaslı mangan bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini

OEMAN için bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde bitüm viskozitesinde meydana gelen oransal değişimler Çizelge 6.30’da verilmiştir.

Çizelge 6.30. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEMANB için)

Sıcaklık(°C)	%0-%1	%1-%2	%2-%3	%3-%5	%5-%10
160	2,57	2,26	9,25	7,51	5,90
150	4,29	5,47	6,49	7,27	6,10
140	3,10	4,54	4,92	6,29	6,89
130	2,38	4,09	9,55	4,17	6,53
120	1,67	4,67	10,34	4,92	5,89
110	2,64	4,46	11,01	5,10	6,36
100	2,83	4,48	11,98	5,22	6,26
90	1,98	3,04	12,38	6,91	6,96

Çizelge 6.30 ve EK-9B incelendiğinde OEMANB ile modifiye edilmiş bitümlerde 150°C ve 140°C dışındaki tüm deney sıcaklıklarındaki viskozite sonuçlarında en büyük değişimin %2-%3 aralığında olduğu, 150°C’de oluşan değişimin de oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

6.2.4. Organik esaslı çinko bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini

OEÇB için bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde bitüm viskozitesinde meydana gelen oransal değişimler Çizelge 6.31’de verilmiştir.

Çizelge 6.31. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEÇB için)

Sıcaklık(°C)	%0-%1	%1-%2	%2-%3	%3-%5	%5-%10
160	2,08	4,13	5,48	4,62	3,68
150	2,06	7,86	7,92	3,63	2,90
140	2,85	6,82	5,77	2,76	4,49
130	1,20	7,25	6,71	5,75	3,80
120	1,10	6,15	10,08	2,76	4,48
110	1,73	8,91	5,42	3,43	5,87
100	2,04	6,22	7,95	5,89	5,55
90	1,77	4,79	8,21	5,78	6,27

Çizelge 6.31 ve EK-10B incelendiğinde OEÇB ile modifiye edilen bitümlerde 140°C, 130°C ve 110°C dışındaki tüm deney sıcaklıklarındaki viskozite sonuçlarında en büyük değişimin %2-%3 aralığında olduğu; 140°C, 130°C ve 110°C'de %2-%3 aralığında oluşan değişimlerin de oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

6.2.5. Organik esaslı kalsiyum bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini

OEKB için bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde bitüm viskozitesinde meydana gelen oransal değişimler Çizelge 6.32'de verilmiştir.

Çizelge 6.32. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEKB için)

Sıcaklık(°C)	%0-%1	%1-%2	%2-%3	%3-%5	%5-%10
160	2,08	7,25	3,77	3,29	1,77
150	1,67	3,15	5,58	4,37	1,86
140	2,53	2,07	2,93	3,02	2,14
130	1,52	3,44	3,33	3,57	1,80
120	1,82	2,82	6,20	2,53	2,10
110	1,65	3,13	5,16	3,46	2,35
100	1,35	3,32	4,07	5,90	1,95
90	1,08	2,36	4,48	5,19	2,52

Çizelge 6.32 ve EK-11B incelendiğinde OEKB katkılı bitümlerde 160°C dışındaki tüm deney sıcaklıklarındaki viskozite sonuçlarında ya en büyük değişimlerin ya da oldukça yüksek değişimlerin %2-%3 aralığında olduğu görülmektedir.

6.2.6. Organik esaslı çinkofosfat bileşiği için bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum miktar tayini

OEÇFB için bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde bitüm viskozitesinde meydana gelen oransal değişimler Çizelge 6.33'te verilmiştir.

Çizelge 6.33. Bitüme ilave edilen katkı maddesi oranının birim değişiminde viskozitede meydana gelen oransal değişimler (OEÇFB için)

Sıcaklık(°C)	%0-%1	%1-%2	%2-%3	%3-%5	%5-%10
160	2,82	6,80	3,92	4,01	4,19
150	3,25	5,00	7,86	4,50	4,28
140	1,71	8,79	10,79	4,66	4,99
130	1,93	5,46	8,27	5,89	4,46
120	2,32	4,17	5,70	2,03	4,91
110	2,04	3,53	4,05	4,30	5,22
100	2,03	5,23	6,30	7,11	6,86
90	2,59	6,82	4,71	5,59	6,18

Çizelge 6.33 ve EK-12B incelendiğinde OEÇFB ile modifiye edilen bitümlerde 120°C ile 150°C aralığındaki deney sıcaklıklarında viskozite sonuçlarında en büyük değişimin %2-%3 aralığında olduğu; 90°C, 100°C, 110°C ve 160°C'de %2-%3 aralığında oluşan değişimlerin ise tatminkar olduğu düşünülmektedir.

Yukarıda belirtilen hususlar dahilinde, her ne kadar OEMAGB için bitüme ilave edileceği optimum miktarın %2 olduğu gözükse de tüm organik esaslı metal bileşikleri için bitümde en büyük davranış değişikliği yaratan en düşük katkı maddesi oranının (optimum miktar) ağırlıkça %3 olduğuna karar verilmiştir.

Etilen glikol esaslı katkı maddeleri TEGPB, DEGPB ve MEGPB'den oluşmaktadır. Bu katkı maddelerini bitüme ağırlıkça hangi oranda eklemenin daha uygun olacağı EK-14'te verilen grafikler incelenerek belirlenmiştir. EK-14'te bu katkı maddeleri için 50°C ile 90°C arasında gerçekleştirilen viskozite ölçümlerinden elde edilen sonuçların grafiksel gösterimleri bulunmaktadır. İncelemeler sonunda tüm etilen glikol esaslı polibor bileşikleri için bitüme eklenecekleri optimum miktarın ağırlıkça %2 olduğuna karar verilmiştir.

Viskozite testlerini takip eden deneysel araştırmalar yukarıda belirtilen oranlarda katkı maddesi içeren modifiye bitümler ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre, organik esaslı metal bileşiklerinin bitüme ağırlıkça %3 oranında ve etilen glikol esaslı polibor bileşiklerinin bitüme ağırlıkça %2 oranında eklenmesiyle modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu bitümler, orijinal bitüm ile çalışma kapsamında gerçekleştirilen diğer deneylerle kıyaslanarak bitümde modifikasyon etkisi değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerde, MEGPB dışında kalan tüm katkı maddelerinin bitüme ilave edilme oranları arttıkça bitüm davranışında meydana getirdikleri değişikliğinin arttığı da unutulmaması gereken önemli bir husustur.

6.3. Marshall Test Sonuçları

Marshall testi, çalışmada kullanılan katkı maddelerinin bitümlü sıcak karışımların stabilite özelliği üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere gerçekleştirilmiştir. Bu testte, agrega ve bitüm ile hazırlanan silindirik briketlerin yanal yüzeylerine 2 inç/dakika'lık hızda yükleme uygulanmıştır. Her bir briketin direnç gösterebildiği maksimum yük ve bu yüke karşılık oluşan akma miktarları ölçülmüştür. Aynı zamanda, stabilite ve akma ölçümlerinden önce her bir briketin yükseklik ve ağırlıkları ölçülmüş, yoğunluk ve hacim hesaplamaları da yapılmıştır.

Metotta, stabilite ve akmanın yanı sıra tüm briketlere ait yoğunluk ve hacim özellikleri de ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalarda kullanılmak

üzere bitüm ve agregaya ait özgül ağırlık değerleri EK-1'de belirtildiği gibi deneysel olarak elde edilmiştir. Çizelge 6.34'te çalışmada kullanılan bitüme ait özgül ağırlığın belirlenmesinde kullanılan ölçüm değerleri sunulmuştur.

Çizelge 6.34. Bitüm özgül ağırlığının belirlenmesinde kullanılan ölçüm değerleri

	Numune 1	Numune 2
piknometre (g)	17,411	18,149
piknometre + su (g)	67,709	68,139
piknometre + bitüm (g)	34,768	35,803
piknometre + bitüm + su (g)	68,057	68,477

Çizelge 6.34'te görüldüğü üzere ölçümler iki numune ile yapılmıştır. Bitümün özgül ağırlık değeri, bu iki numuneden ayrı ayrı elde edilen özgül ağırlık değerlerinin ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir.

Çizelge 6.34'teki ölçüm sonuçları ile bitüme ait özgül ağırlıklar şu şekilde hesaplanmıştır;

$$\text{Bitüm özgül ağırlığı}_1 = \frac{34,768 - 17,411}{(34,768 - 17,411) - (68,057 - 67,709)} = 1,02046$$

$$\text{Bitüm özgül ağırlığı}_2 = \frac{35,803 - 18,149}{(35,803 - 18,149) - (68,477 - 68,139)} = 1,01952$$

Bitümün özgül ağırlığı, yukarıda hesaplanan iki değer aritmetik ortalaması alınmak suretiyle 1,02 olarak elde edilmiştir. Marshall testindeki bitüm özgül ağırlığını gerektiren hesaplamalarda bu değer kullanılmıştır.

Agregaya ait özgül ağırlıklar EK-1'de belirtildiği şekilde kaba agreg, ince agreg ve filler için ayrı ayrı olmak üzere deneysel olarak elde edilen ölçümler kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.35'te sunulmuştur.

Çizelge 6.35. Agregaya ait özgül ağırlık değerleri

	Hacim Özgül Ağırlık	Zahiri Özgül Ağırlık
Kaba Agregası	2,814	2,849
İnce Agregası	2,833	2,855
Filler	-	2,820

Marshall testleri çalışmada kullanılan katkı maddelerinin karışım stabilitesi üzerinde etkisini belirlemek üzere gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle orijinal ve modifiye bitümler ile hazırlanacak briketlerde kullanılacak bitüm oranı belirlenmiştir. Bunun için orijinal bitüm kullanılarak Marshall metodu ile tasarım yapılmıştır. Tüm briketler bu tasarım sonucu elde edilen optimum bitüm oranında imal edilmiştir.

Agrega-bitüm karışımlarındaki optimum bitüm oranının belirlenmesine yönelik olarak orijinal bitüm ile yapılan Marshall tasarım çalışmasında ulaşılan hesaplama ve ölçüm sonuçları EK-15'te sunulmuştur.

EK-15'ten anlaşılabileceği üzere tasarım; %3,5, %4, %4,5, %5 ve %5,5 bitüm oranlarında ve her bir bitüm oranı için toplam 3 adet briket hazırlanarak yapılmıştır.

Tasarımda, her bir bitüm içeriğinde imal edilen üç briketten elde edilen değerlerin ortalamaları Çizelge 6.36'da verilmiştir. Bu değerlerden; bitüm içeriğine karşılık D_p , stabilite, boşluk oranı (V_h) ve bitümle dolu boşluk oranı (V_f) grafikleri ile optimum bitüm oranı belirlenmiştir. Belirlenen optimum miktarın uygunluğu agregası boşluk oranı (VMA) ve akma değerleri ile çizilen grafiklerle kontrol edilmektedir. Tüm stabilite ölçümlerinde cihazdan okunan değer, kalibrasyon katsayısı $(-11,75+3,75 \cdot \text{cihaz okuması})$ ile işleme sokulmuş ve elde edilen değer briketin yüksekliğine bağlı düzeltme katsayısıyla çarpılarak briketin düzeltilmiş stabilite değeri elde edilmiştir.

Çizelge 6.36. Briketlerde kullanılan bitüm oranına bağlı olarak Marshall tasarımında elde edilen ortalama değerler

Bitüm İçeriği (%)	Dp	Stabilite (kg)	Vh (%)	Vf (%)	VMA (%)	Akma (mm)
3,5	2,484	666,61	7,07	52,32	14,82	3,85
4	2,517	769,52	5,10	63,85	14,11	3,51
4,5	2,540	880,69	3,51	74,46	13,75	3,98
5	2,556	971,53	2,15	84,17	13,6	5,29
5,5	2,543	809,36	1,96	86,43	14,48	5,33

Çizelge 6.36'daki değerlere göre çizilen ve optimum bitüm oranının hesaplanabilmesi için gerekli olan grafikler EK-16'da sunulmuştur. Optimum bitüm oranı, EK-16'daki grafiklerden elde edilen değerlerle Çizelge 6.37'de görüldüğü şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.37. Optimum bitüm oranı

	Bitüm oranı (%)	Optimum Bitüm Oranı (%)
Dp	5,053	$\frac{5,053 + 4,947 + 4,295 + 4,812}{4} = 4,8$
Stabilite	4,947	
Vh	4,295	
Vf	4,812	

Çizelge 6.37'de görüldüğü üzere orijinal bitüm ile yapılan Marshall tasarımı sonucunda agrega-bitüm karışımında kullanılacak en uygun bitüm miktarının agrega ağırlığının %4,8'i kadar olduğu belirlenmiştir.

Katkı maddelerinin bitümlü sıcak karışımların stabilite özelliği üzerindeki etkisini Marshall testi ile incelemek üzere, orijinal ve modifiye bitüm

kullanılarak hazırlanan tüm karışımlarda agrega ağırlığının %4,8'i kadar bitüm kullanılmıştır. Daha açık bir ifadeyle, her bir briket 1100 g agrega ve 52,8 g bitüm içeren karışımla hazırlanmıştır. Ayrıca Marshall testi için briket imalatında kullanılan modifiye bitümler, viskozite test sonuçlarına göre belirlenen optimum oranlarda katkı maddesi içerecek şekilde hazırlanmışlardır. Başka bir deyişle, ağırlıkça %3 oranında organik esaslı metal bileşiği içeren modifiye bitümlerin ve ağırlıkça %2 oranında etilen glikol esaslı polibor bileşiği içeren modifiye bitümlerin agrega-bitüm karışımlarının stabilitesini ne şekilde etkilediği Marshall testi ile incelenmiştir.

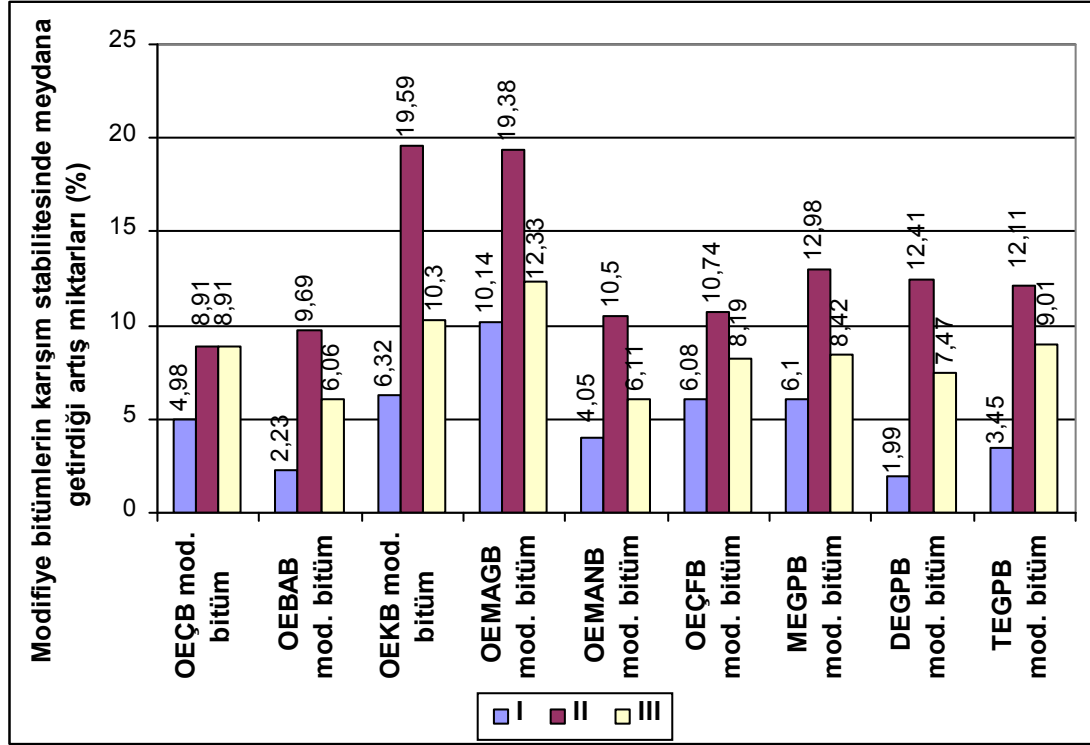
Briketlerde kullanılacak modifiye bitüm üretimi ve üretimden sonra kür süresi, agreganın yüksek sıcaklıkta belli bir süre bekletilme zorunluluğu, orijinal ve modifiye bitümlerin briket imalatı sırasında gerekli akıcılığa ulaşması için ısıtılma süresi ve bu süresinin artmasıyla bitümde oluşan yaşlanmanın artması sebebiyle imalat sırasında tümünün aynı anda etüvde bekletilemeyip yapım sürecinin hemen öncesinde sırayla ısıtılması zorunluluklarından dolayı Marshall briketlerinin imalat süreci oldukça uzun sürebilmektedir. Aynı zamanda laboratuvar koşullarının mevcut durumu ile Marshall briketlerinin tümünün aynı günde hazırlanması ve belli bir kür süresinden sonra aynı günde kırılması (stabilite ve akma ölçümlerinin yapılması) mümkün olmadığından dolayı orijinal ve modifiye bitümlerden oluşan toplam 10 farklı bitüm tipi ile Marshall briket üretimi 4 farklı günde (süreçte) gerçekleştirilmiştir. Her bir üretim gününde (sürecinde) modifiye bitümlerle hazırlanan briketlerin yanı sıra orijinal bitüm kullanılarak da briketler üretilmiştir ve performans değerlendirmeleri aynı gün üretilen briketler arasında yapılmıştır. Böylece ortamda ve/veya briket imalat şartlarında oluşabilecek değişkenlik etkileri ortadan kaldırılmış veya en aza indirilmiştir.

Çizelge 6.38'de aynı günde imal edilen briketlerde kullanılan bitüm tipleri verilmiştir.

Çizelge 6.38. Marshall briketi üretim süreci

Süreç	Kullanılan Bitüm Türleri
I. Grup Üretim (1. üretim günü)	Orijinal bitüm, MEGPB katkılı bitüm
II. Grup Üretim (2. üretim günü)	Orijinal bitüm, OEÇB katkılı bitüm, OEBAB katkılı bitüm, OEKB katkılı bitüm
III. Grup Üretim (3. üretim günü)	Orijinal bitüm, OEMAGB katkılı bitüm, OEMANB katkılı bitüm, OEÇFB katkılı bitüm
IV. Grup Üretim (4. üretim günü)	Orijinal bitüm, DEGPB katkılı bitüm, TEGPB katkılı bitüm

İçeriği Çizelge 6.38’de verilmiş olan süreçlerde, orijinal ve optimum oranda katkı maddeleri içeren modifiye bitümler ile Marshall briketleri hazırlanmıştır. Orijinal bitüm ile yapılan tasarımda olduğu gibi, imal edilen briketlerin öncelikle boyut ve ağırlık ölçümleri yapılarak yoğunluk ve hacim hesaplamaları yapılmıştır. Daha sonra her bir briketin dayanım gösterebildiği maksimum yük miktarı (stabilite) ve bu yük miktarında meydana gelen akma (düşey deformasyon) değerleri Marshall testi ile ölçülmüştür. Test sonuçları; tüm modifiye bitüm tipleri için üç farklı karşılaştırma halinde olmak üzere, modifiye bitümlerin orijinal bitüm ile elde edilen stabilite değerinde meydana getirdikleri oransal değişimler biçiminde Şekil 6.20’de sunulmuştur. I. Grup üretim, II. Grup üretim, III. Grup üretim ve IV. Grup üretim süreçlerinde orijinal ve modifiye bitümlerle imal edilip aynı kür süresini takiben kırılan briketlere ait ölçümler ve hesaplama sonuçları EK-17, EK-18, EK-19, EK-20’de ayrıntılı olarak sunulmuştur.



Şekil 6.20. Modifiye bitümlerin karışım stabilitesinde meydana getirdikleri oransal değişimler

Şekil 6.20’de modifiye bitümlerle üretilen briketlerin orijinal bitümle üretilen briketlere kıyasla stabilitelerinde meydana gelen değişimler görülmektedir. Şekil incelendiğinde her bir durum için elde edilen değişim oranlarının birbirlerinden farklı ancak tüm değerlerin pozitif olduğu görülmektedir. Bu da, modifiye bitümlerin karışım stabilitesini değişik oranlarda arttırdığını göstermektedir. Marshall tasarım metodunda her bir briket ile ilgili ölçümler ve hesaplamalar yapıldıktan sonra brikiye ait değerlerin sonuç verilerini oluşturacak ortalama hesaplamalarına dahil edilip edilmeyeceğini belirlemek için bazı incelemelerin yapılması önerilmektedir. Şöyle ki;

- Aynı tip bitüm içeren ve belli bir bitüm oranında hazırlanan briketlerin en yüksek ve en düşük D_p (yoğunluk) değerleri arasındaki fark en fazla 0,020 olmalıdır. Bu farkın 0,020’den daha fazla olması halinde ortalama hesaplamalarına alınmayacak D_p değerinin seçimi için stabilize değerlerine bakılması gerekir [48].

- Aynı tip bitüm ile hazırlanmış bütün briketler için düzeltilmiş stabilite değerlerinin ortalaması alınır. Ancak nicelik olarak farklı olduğu açık şekilde görülen stabilite sonuçları kullanılmaz [11].

Yukarıda belirtilenler ışığında; imal edilen bazı briketlerin ortalama hesaplamalarında kullanılmayabileceği deneyin şartları kapsamında olduğu anlaşılmaktadır. EK-18’de görülebileceği üzere, deney sonuçları incelendiğinde sadece OEÇB modifiyeli bitüm ile hazırlanan briketlerde Dp bakımından farklılaşmanın 0,020’den fazla olduğu görülmektedir. Bu briketlerden 4.8/1 no.’lu briquete, oluşan bir hata ile, gerekenden daha fazla bitüm eklendiği briketin yapımı esnasında fark edilmiş ancak yine de ölçüm ve hesaplamaları yapılmıştır. Sonuçta bu briket, hem nispeten yüksek Dp değeri hem de nispeten düşük stabilite değerlerine sahip olması sebepleriyle OEÇB modifiyeli bitüm ile imal edilen briket sonuçları içine dahil edilmemiştir.

Yukarıda açıklanan iki husus incelendiğinde Dp ile ilgili koşulda net bir ifadenin mevcut olduğu anlaşılmaktadır. Çalışma kapsamında üretilen briketler (OEÇB modifiyeli bitümle üretilenler hariç ve zaten bu grup içinde kullanılmaması gereken briket bilinmektedir) Dp ile ilgili koşulu sağlamaktadırlar. Ancak “stabilitenin açık şekilde farklı olması” net bir ifade olmayıp yorum gerektiren ve buna bağlı olarak hesaplamalarda farklılaşma yaratabilecek bir durum oluşturmaktadır. Bu yüzden tek bir karşılaştırma yerine Şekil 6.20’de görüldüğü üzere 3 farklı karşılaştırma yaparak bitüm modifikasyonu ile karışım stabilitesinde oluşan değişimin daha geniş bir yelpazede incelenmesi amaçlanmıştır. Marshall test sonuçlarına uygulanan ve Şekil 6.20’de sunulan değerlendirme yöntemi aşağıda özetlenmiştir;

- Modifiye bitüm kullanımı ile stabilitede oluşan değişimin özeti her bir katkı maddesi türü için I, II ve III ifadeleri altında sunulmuştur.
- I sütunu; orijinal ve modifiye bitüm kullanılarak üretilen briketlerin tümüne ait deney sonuçlarının hesaplamalara katılmasıyla stabilitede meydana

gelen değişim oranlarını göstermektedir ve her bir katkı maddesi için ayrı ayrı verilen 3 adet grafiksel gösterimin ilk sütunlarında yer almaktadır. Buna göre I ile yapılan karşılaştırmada sonuç değerleri göz ardı edilen hiçbir briket bulunmamaktadır (OEÇB modifiyeli bitüm ile üretilen kusurlu briket dahil). Yani üretilen briketlerin %100'ü hesaplamalara dahil edilmiştir.

- II sütunu; her bir üretim sürecinde orijinal bitümle elde edilen en yüksek stabilite değeri ile o üretimde imalatı yapılan her bir modifiye bitüm içeren briket grubu için elde edilen en düşük stabilite değerlerinin kullanılmamasıyla elde edilmiştir. Bu durumda, üretilen briketlerin %67'si hesaplamalarda kullanılmıştır.
- III sütunu; 4 farklı günde yapılan üretimlerin her bir üretim gününde orijinal bitümle imal edilen briketler arasında elde edilen en yüksek stabilite değerinin kullanılmayıp II'den farklı olarak o üretimde imalatı yapılan her bir modifiye bitüm içeren briket grubu için elde edilen tüm stabilite değerlerinin kullanılmasıyla elde edilmiştir (OEÇB modifiyeli fazla bitüm içeren briket hariç). Bu durumda, üretilen briketlerin %90'ı hesaplamalarda kullanılmıştır.

Yukarıda belirtilen değerlendirme yöntemine göre bitüm modifikasyonunun stabilite üzerindeki etkisi Şekil 6.20'de özet halinde sunulmuştur. Şekilde görülen sayısal değerlerle, modifiye bitümlerin orijinal bitüm kullanılarak elde edilen stabilite değerinde meydana getirdiği oransal değişimler ifade edilmektedir. Şekil 6.20'de veya daha ayrıntılı olarak EK-17, EK-18, EK-19, EK-20'de görüldüğü üzere çalışma kapsamında kullanılan tüm katkı maddeleri stabilitede iyileşme (artış) sağlamaktadır. Değerler incelendiğinde, sıcak karışımlarda modifiye bitüm kullanımı ile stabilitede %20'ye varan oranlarda artışlar sağlanabildiği anlaşılmaktadır.

Stabilite, bitümlü karışımların kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tarif edilir [4]. Stabilitenin yüksek olması üstyapının kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğunu gösterir. Ancak stabilitenin

hayli yüksek olması durumunda üstyapının esnek davranış özelliği azalır ve bu durum yükleme koşulları altında çatlaklar oluşmasına sebep olur. Bitümün modifiye edilmesi ile Marshall stabilitesinin arttırılabildiği belirtilmekte [6, 8] ve literatürde bu yönde sonuçlar içeren çalışmalar bulunmaktadır [31, 33, 35]. Ancak bitüm modifikasyonu Marshall stabilitesinde azalmalara da yol açabilmektedir [36, 42].

SBS, bitüm modifikasyonunda sıkça kullanılan bir malzemedir. Ağırlıkça %5 oranında SBS modifiyeli bitüm kullanılan çeşitli çalışmalarda [31, 36] Marshall stabilitesinde %8 ve %16 civarında artışlar sağlanmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan malzeme ve tasarım kriterlerinin farklı olması ve Marshall briketlerinin farklı bitüm oranlarında imal edilmeleri (%6,12 ve %4,73) elde edilen sonuçlarda bu şekilde farklılaşmaya yol açabileceği düşünülmektedir. Mevcut çalışmamızda ise bitüme ağırlıkça %2 veya %3 oranlarında ilave edilen katkı maddeleri ile Marshall stabilitesinde %20'ye varan oranlarda artışlar sağlanabilmektedir.

EVA, bitüm modifikasyonunda sıkça kullanılan diğer bir malzemedir. Ağırlıkça %5 oranında EVA modifikasyonlu bitümle Marshall stabilitesinde artma meydana gelmektedir [35]. Literatürde bu modifikasyon ile stabilitede azalma da (%10 civarında) görülmüştür [36]. Bu iki çalışmada da farklı malzeme ve Marshall briketlerinde farklı bitüm oranları (%6 ve %4,82) kullanılmıştır. Bu derecede farklı sonuçların sebebi belirlenememekle birlikte yazarlar [36] EVA modifikasyonu ile stabilitede azalma sonucunun genelleştirilebilmesi için daha geniş bir araştırmaya ihtiyaç olduğunu belirtmektedirler.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen Marshall test sonuçlarına göre, modifiye bitüm kullanımı ile stabilitede artışlar meydana gelmektedir ve literatür çalışmaları ile birlikte [31, 33] oransal olarak incelendiğinde bu artışların esnek davranış özelliğinde olumsuzluk yaratacak düzeyde olmadığı anlaşılmaktadır. Kısaca ifade edilirse, modifiye bitüm kullanımı ile üstyapının performansı arttırılabilmektedir. Bu tür katkı maddelerinin kullanımı, tekerlek

izi, ondülasyon (dalgalanma), bölgesel çökme gibi deformasyon tipi bozulmalara karşı üstyapının direncini arttıracak özelliğindedir.

Yukarıdaki değerlendirmelere ek olarak EK-17, EK-18, EK-19, EK-20’de ayrıntılı olarak verilen Marshall test sonuçları incelendiğinde, modifiye bitüm kullanımı ile sıkıştırılmış briketlerdeki boşluk oranının (Vh) azaldığı görülmektedir. Böyle bir sonuç daha iyi sıkışma ile elde edilebilir. Daha iyi bir sıkışmanın sağlanabilmesi için karışımın sıkışma direncinin düşük olması gerekir. Sıkışma direnci düşük bir karışımın işlenebilirliği yüksektir. Yani modifiye bitüm kullanımı sıcak karışımların işlenebilirliğini arttırmıştır. Bu sonuç, daha önce viskozite test sonuçlarına göre modifiye bitüm kullanımının karışımların işlenebilirliği üzerindeki etkisi ile ilgili yorumlamayla da tutarlıdır ve yapılan yorumu destekler niteliktedir.

6.4. Yumuşama Noktası Test Sonuçları

Yumuşama noktası testi, orijinal bitüm ve çalışmada kullanılan farklı katkı maddelerini optimum oranda içeren modifiye bitümlere Bölüm 5.4.3’te açıklandığı şekilde uygulanmıştır. Çizelge 6.39’da farklı bitümler için deney sonunda elde edilen yumuşama noktaları görülmektedir. Çizelgede parantez içinde görülen değerler bitümdeki katkı maddesi oranını ifade etmektedir.

Çizelge 6.39. Orijinal ve modifiye bitümlere ait yumuşama noktaları

Bitüm	Yumuşama Noktası (°C)
Orijinal Bitüm	48,4
OEMAGB Modifiyeli Bitüm (%3)	46,3
OEABAB Modifiyeli Bitüm (%3)	44,2
OEMANB Modifiyeli Bitüm (%3)	45,8
OEÇB Modifiyeli Bitüm (%3)	44,9
OEKB Modifiyeli Bitüm (%3)	46,4
OEÇFB Modifiyeli Bitüm (%3)	47,0
TEGPB Modifiyeli Bitüm (%2)	49,5
DEGPB Modifiyeli Bitüm (%2)	48,8
MEGPB Modifiyeli Bitüm (%2)	48,3

Çizelge 6.39'deki değerler incelendiğinde çalışmada kullanılan katkı maddelerinin bitümün yumuşama noktasında meydana getirdikleri değişimler aşağıda özetlenmiştir;

- Bitümün organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilmesiyle yumuşama noktasında katkı maddesi cinsine göre değişen miktarlarda azalma oluşmaktadır. OEBAB ile modifikasyon bitümün yumuşama noktasında %8,7 ile en büyük azalmayı yaratmaktadır. En küçük azalma ise %2,9 oranıyla OEÇFB ile modifiye edildiğinde oluşmaktadır.
- Bitümün MEGPB ile modifikasyonu yumuşama noktasını çok az miktarda azaltmaktadır. Bu değişim %0,2 seviyesindedir.
- Bitümün TEGPB ve DEGPB ile modifikasyonu yumuşama noktasını arttırmaktadır. TEGPB ile modifikasyon sonucu bitümün yumuşama noktası %2,3 oranında artış göstermektedir. DEGPB kullanılması durumunda bu artış %0,83 oranında gerçekleşmektedir.

Yumuşama noktası, bitümün sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılığının bir ölçütüdür. Daha yüksek yumuşama noktasına sahip bitümlerin kıvamlılıkları sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenir. Yani sıcaklık arttığında daha az akıcı hale gelirler. SBS ve EVA polimerleri modifiye bitüm çalışmalarında iyi sonuçlar verebilmektedir. Bu tür polimerler ile bitümün yumuşama noktası artmaktadır [28] ve test sonuçları bu bitümlerin tekerlek izine karşı daha dirençli olduklarını göstermektedir [39, 44, 53]. Benzer sonuç bitüme kırıntı formlu kauçuk ilavesiyle de elde edilebilmektedir. Böyle bir çalışmada [32] bitüme eklenen kauçuk miktarı arttıkça bitüme ait yumuşama noktasının ve tekerlek izi direnç parametre değerinin arttığı ve bu durumun kendi içinde tutarlı olduğu ifade edilmektedir. Mevcut araştırmalardan elde edilen sonuçlar ışığında, yüksek standartlı esnek üstyapılar bu özellikte bitüm kullanılarak inşaa edildiklerinde yüksek hava sıcaklıklarında görülen tekerlek izi oluşumlarına karşı dirençleri artacaktır.

Yumuşama noktası düşük olan bitümler sıcaklık azaldığında fiziksel olarak daha az sertleşirler. Böylece daha fazla sünek (esnek) davranış özelliği gösterebilirler. Düşük sıcaklıklarda daha fazla sünek davranış gösterebilen bitüm kullanımı yüksek standartlı esnek üstyapıların düşük sıcaklıklar sebebiyle oluşan çatlaklara karşı dirençlerini artırır [4, 6]. Yukarıda verilen yumuşama noktası test sonuçlarında görülebileceği üzere organik esaslı metal bileşikler ile modifiye edilen bitümlerin yumuşama noktalarında azalma meydana gelmektedir. Bu sonuca göre bu tür bitümlerin düşük sıcaklıklarda daha sünek davranış göstereceği söylenebilir.

6.5. Düktilite Test Sonuçları

Düktilite testi, viskozite ve yumuşama noktası testlerinden elde edilen sonuçlara göre orijinal bitüm ve çalışmada kullanılan organik esaslı metal bileşiklerini optimum oranda (ağırlıkça %3) içeren bitümlere Bölüm 5.4.4'te açıklandığı şekilde uygulanmıştır. Test 15°C'de gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar Çizelge 6.40'ta sunulmuştur.

Çizelge 6.40. Düktilite test sonuçları

Bitüm	15°C'de Elde Edilen Düktilite Ölçümleri (cm)
Orijinal Bitüm	63,5
OEMAGB Modifiyeli Bitüm	+105
OEBAB Modifiyeli Bitüm	+105
OEMANB Modifiyeli Bitüm	+105
OEÇB Modifiyeli Bitüm	+105
OEKB Modifiyeli Bitüm	+105
OEÇFB Modifiyeli Bitüm	+105

Cihaz ile 105 cm'ye kadar ölçüm yapılabilmekte olup Çizelge 6.40'da görülen +105 değeri ile bitümün test esnasında kopmadığı ifade edilmektedir.

Test sonuçları incelendiğinde modifikasyonun bitümün düktilitesini arttırdığı görülmektedir. Düktilite testi, bitümün sünekliliğini ölçmek üzere gerçekleştirilir. Bitüm, düşük hava sıcaklıklarında yeteri kadar sünek olabildiği takdirde esnek üstyapılarda görülen düşük sıcaklık çatlaklarının oluşumu azalabilmektedir [4].

Test sonuçlarına göre, organik esaslı metal bileşikler ile modifiye edilen bitümün düşük sıcaklıklardaki sünek davranış özelliği artış göstermektedir. Elde edilen düktilite ölçümleri viskozite ve yumuşama noktası test sonuçlarıyla da tutarlıdır. Bu sonuçlara göre, soğuk iklimin hakim olduğu bölgelerdeki esnek üstyapılarda bu tür katkı maddeleriyle modifiye edilmiş bitüm kullanılarak üstyapıda düşük sıcaklık sebebiyle oluşan çatlaklar azaltılabilecektir.

6.6. Soyulma Direnci Test Sonuçları

Bitümlü karışımların soyulma özellikleri Nicholson testi ile değerlendirilmiştir. Nicholson soyulma testleri 110°C'lik karıştırma sıcaklığında bazalt türü agrega ile hazırlanan sıkıştırılmamış bitümlü karışımlara uygulanmıştır. Karışımlar, orijinal bitüm ve çalışmada kullanılan farklı katkı maddelerini optimum oranda içeren modifiye bitümler ile hazırlanmıştır. Böylece bitüm modifikasyonunun soyulma direnci üzerindeki etkisi değerlendirilebilmiştir. Test sonuçları hem soyulma direnci hem de soyulma miktarı cinsinden oransal olarak verilmiştir. Soyulma direnci, deney sonunda her bir bitümlü karışımdaki soyulma oluşmayan toplam agrega yüzey alanının karışımda bulunan toplam agrega yüzey alanına oranlanmasıyla elde edilmiştir. Soyulma oranı ise soyulma direncini %100'e tamamlayan değer olup karışımlara ait soyulma dirençlerine bağlı olarak belirlenmiştir. Soyulma testi sonunda karışımlarda farklı bitüm kullanımı (orijinal ve modifiye) ile elde edilen soyulma dirençleri ve soyulma oranları Çizelge 6.41'de sunulmuştur.

Çizelge 6.41. Bitümlü karışımların soyulma dirençleri ve soyulma oranları

Soyulma Testinde Kullanılan Bitüm Türü	Soyulma Direnci (%)	Soyulma Oranı (%)
Orijinal Bitüm	30	70
OEMAGB Modifiyeli Bitüm (%3)	90	10
OEBAB Modifiyeli Bitüm (%3)	90	10
OEMANB Modifiyeli Bitüm (%3)	95	5
OEÇB Modifiyeli Bitüm (%3)	90	10
OEKB Modifiyeli Bitüm (%3)	88	12
OEÇFB Modifiyeli Bitüm (%3)	95	5
TEGPB Modifiyeli Bitüm (%2)	30	70
DEGPB Modifiyeli Bitüm (%2)	30	70
MEGPB Modifiyeli Bitüm (%2)	40	60

Yukarıda verilen sonuçların elde edildiği deney numunelerine ait fotoğraflar EK-21’de sunulmuştur.

Çizelge 6.41 incelendiğinde özellikle organik esaslı metal bileşiği ile modifiye edilen bitümlerin kullanıldığı karışımlarda soyulma direncinin yaklaşık olarak 2 kat arttığı görülmektedir. Orijinal bitüm kullanımında karışımın soyulmaya karşı direnci %30 seviyesindeyken organik esaslı metal bileşikler ile bu oran %95’e kadar artabilmektedir. Oransal olarak incelendiğinde organik esaslı metal bileşiği ile modifiye edilen bitüm kullanımının soyulma direncinde meydana getirdiği artış seviyesi %200’den fazladır.

Deney sonuçları, karışımlarda meydana gelen soyulma oranı bakımından da değerlendirilebilir. Böyle bir değerlendirmede orijinal bitüm ile modifiye bitüm arasındaki farklılaşma 1/14 oranına kadar yükselmektedir. Buna göre karışımda orijinal bitüm kullanıldığında %70 oranında soyulma oluşurken organik esaslı metal bileşiği ile modifiye edilmiş bitüm kullanımı ile bu oran %5’e kadar düşürülebilmektedir. Bu sonuçlar, organik esaslı metal

bileşiklerinin bitümlü karışımlarda agregata ile bitüm arasındaki adezyon kuvvetini önemli miktarda arttırdığını göstermektedir. Agregata ile bitüm arasındaki bağ kuvvetinin (adezyon) ve bitümlü karışımda meydana gelen soyulmanın organik esaslı metal bileşikleriyle iyileşmesi aşağıda özetlenmiştir.

Orijinal bitüm düşük polariteye, agregata ise yüksek polariteye sahiptir. Bitümlü karışımlarda meydana gelen soyulma bitüm ve agreganın sahip oldukları farklı polarite özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Çalışma kapsamında sentezlenen ve bitüm modifikasyonunda kullanılan organik esaslı metal bileşikler polar uçlar ve apolar kısımlardan oluşmaktadır. Organik esaslı metal bileşiği bitüme eklendiğinde katkı maddesinin apolar kısımları bitüm merkezinde toplanırken polar uçlar bitümün yüzeyine doğru itilir. Bu durum bitümün polar bir yapı göstermesini sağlar ve böylece agregata ile bitüm arasında güçlü bağlar oluşur. Su ortamında katkı maddesinin molekülleri iyonlaşır. Katyonların su tarafından, anyonların ise bitüm tarafından absorbe edilmesiyle soyulma engellenir [45].

Soyulma, agregata ve bitüm arasındaki bağ kuvvetinin (yapışmanın) su tesiriyle kopması olarak tanımlanabilir. Agregata, bitümle kıyaslandığında su ile daha kolay bağlanabilmektedir. Su, gerek agreganın bitümle kaplanmasında gerekse kaplanmış agreganın bitümle arasındaki bağın devam ettirilmesinde sorunlar oluşturur.

Bitümle kaplı agregalarda soyulmaya karşı gösterilen direnç hem bitümün adezyon yeteneğinden hem de agreganın yapısal özelliklerinden etkilenmektedir. Agregalar, hidrofilik (su sever) veya hidrofobik (su sevmez) özellikte olabilirler. Bazalt ve kalker hidrofobik yapıdadır. Bu tür agregalarda soyulma problemi kuvars, granit gibi hidrofobik yapıda olmayan agregalara göre daha az oluşmaktadır [2, 11]. Bunun yanı sıra bitümün adezyon yeteneği çeşitli katkı maddeleri ile artırılarak soyulma problemi azaltılmaya çalışılmaktadır.

Soyulmaya karşı direnç, öncelikle agregata ile bitüm arasındaki bağlanmanın kalitesi ile ilişkilidir. Agregata ile bitüm arasındaki bağ kuvveti arttıkça soyulmaya karşı direnç de artmaktadır. Karıştırılma esnasında; agreganın yeterince sıcak, kuru, temiz olması ve bitümün uygun akıcılıkta olması oldukça önemlidir. Bu koşullara uyulmaması durumunda agregata ile bitüm arasındaki bağ kuvveti azalacağından soyulmaya karşı direnç de azalmaktadır.

Agreganın bitümü absorbe edebilmesi bağ kuvvetini etkilemektedir. Bu yüzden soyulma direnci üzerinde etkisi bulunmaktadır. Agreganın bitümü yeterli düzeyde absorbe etmesi agregata-bitüm bağlanmasını kuvvetlendireceğinden karışımın soyulmaya karşı direncini de artırır.

Katı bir yüzeyde mevcut bulunan bir sıvının başka bir sıvı tarafından yüzeyden uzaklaştırılması sisteme etkiyen fiziko-kimyasal kuvvetler ile gerçekleşmektedir. Agregaların çoğu iyonik olarak yüklüdür. Örnek olarak silika, zayıf negatif yüzeysel yük taşımaktadır. Bitümler, genellikle düşük miktarda polar özelliğe sahiptirler ve agregata ile aralarındaki kimyasal bağ esas olarak dağılım (dispersiyon) kuvvetlerinden kaynaklanır. Su ise oldukça polar özelliktedir ve yüklü agregata yüzeyi tarafından bitüme göre daha güçlü bir şekilde çekilirler. Başka bir deyişle; su, bitüme göre agregata yüzeyi tarafından tercih edilmektedir. Bitümün ıslak agregata ile karıştırılması durumunda agregaya yapışması mümkün değildir. Böyle bir koşulda, bitüm agregayı sarmaktan ziyade yüzeyde damlalar halinde toplanma eğilimi gösterir. Bununla birlikte; bitümle kaplı agregata suya maruz kaldığında su, bitüm tabakasına sızarak bitümü agregadan ayırabilmektedir [6, 11].

Agreganın sahip olduğu yüzey yükü soyulma direnci açısından önem taşır. Dengelenmemiş yüzey yükleri taşıyan agregalar yüzey enerjisine sahip olurlar. Agregata yüzeyinin, ters kutuplu bir sıvı ile kaplanmasıyla yüzey enerjisi dengelenir ve sonucunda sıvı ile adezyon sağlanır. Birden fazla sıvının olduğu durumlarda (bitüm ve su gibi) enerji dengelemesini en güçlü şekilde

sağlayabilen sıvı agregaya yüzeyine en güçlü şekilde yapışacaktır. Bu yaklaşıma göre, agregaya-bitüm karışımlarında meydana gelen soyulma, yüzey yükleri ile ilişkilendirilebilir. Yüzey yükünün bitüme kıyasla su ile daha iyi dengelendiği durumlarda; bitüm, agregaya yüzeyinden ayrılarak yerini suya bırakabilir [6].

Bitümlü karışımlarda görülen soyulmanın oluşum mekanizması şöyle özetlenebilir; su, sıvı veya buhar şeklinde agregayı çevreleyen bağlayıcı filme nüfuz ederek agregaya yüzeyine geçer ve agregaya ile bitüm arasında yayılarak bitüm filmini agregaya yüzeyinden ayırır. Agregaya yüzeyi ile bitüm filmi arasında yapışkan özellikte bir bağlantı kalmayınca trafik etkisi ile film tamamen sıyrılır ve soyulma oluşur [11].

Bitümlü karışımların soyulma dirençleri çeşitli katkı maddeleri ile artırılabilir [28, 42]. SBS ve EVA da bu amaçla kullanılabilir özellikte olup test sonuçlarına göre [28] SBS, EVA'ya göre daha çok direnç kazandırmaktadır. Çalışma kapsamında sentezlenen ve Çizelge 6.41'de görüldüğü üzere %30'luk soyulma direncini %90-95 seviyesine arttıran organik esaslı metal bileşikler literatürdeki sönmüş kireç [28], mangan abietat [45] gibi katkı maddeleri ile birlikte bu alanda önemli avantaj sağlamaktadır.

Çizelge 6.41'deki sonuçlar ışığında, organik esaslı metal bileşikler ile modifiye edilen bitümün esnek üstyapılarda kullanılmasıyla suyun üstyapıya verdiği zararlar önemli ölçüde azaltılabilecektir.

Test sonuçlarına göre TEGPB ve DEGPB'nin soyulma direnci üzerinde etkili olmadığı anlaşılmaktadır. Bitümün TEGPB veya DEGPB ile modifikasyonu karışımın soyulma direncini etkilememiştir.

Bitümün MEGPB ile modifikasyonu karışımın soyulma direncini %33,3 oranında arttırmaktadır. Buna göre bitümün bu katkı maddesi ile modifiye

edilerek esnek üstyapılarda kullanılması ile suyun üstyapıya verdiği zararların azalması sağlanacaktır.

6.7. BBR Test Sonuçları

BBR testi, önceki test sonuçları incelenerek orijinal, organik esaslı metal bileşikler ve MEGPB içeren bitümlere -12°C 'de uygulanmıştır ve -18°C 'de MEGPB için tekrarlanmıştır. Test sonuçları ile bitümün düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamalara karşı direnci üzerinde modifikasyonun etkisi değerlendirilmiştir. Modifiye bitümler daha önce belirlenen optimum oranlarda katkı maddesi içerecek şekilde üretilmişlerdir (Organik esaslı metal bileşikler için %3, MEGPB için %2). BBR testi, EK-22'de fotoğrafı görülen Cannon marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Testte, sünme rijitliği (S) ve sünme oranı (m) elde edilmektedir. -12°C 'de elde edilen test sonuçları Çizelge 6.42'de verilmiştir.

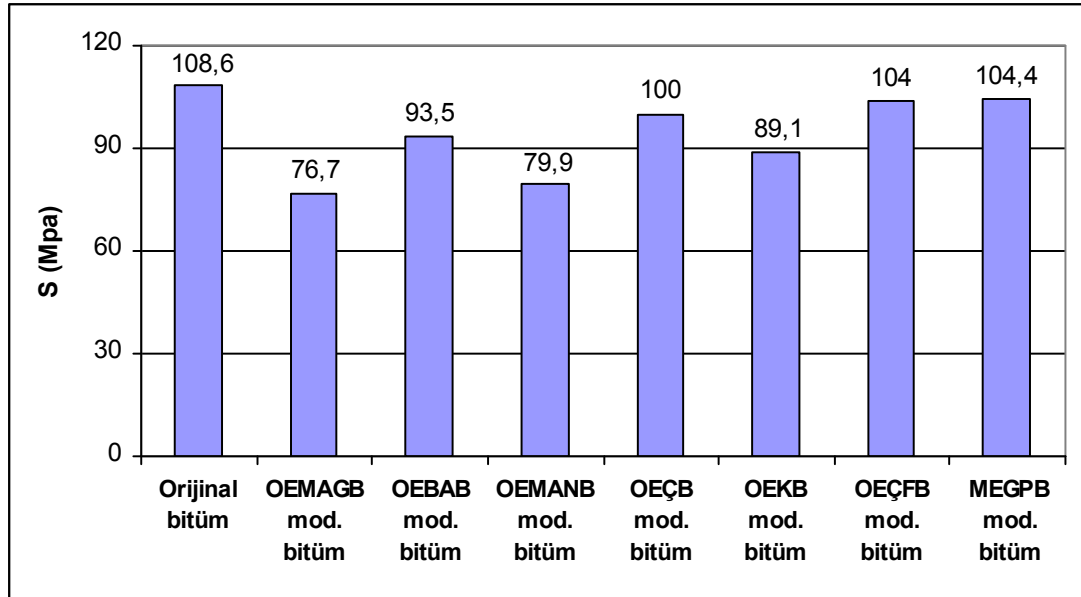
Çizelge 6.42. BBR test sonuçları

Bitüm türü	Test Sıcaklığı: -12°C	
	Sünme Rijitliği, S (MPa)	Sünme Oranı, m
Orijinal bitüm	108,6	0,396
OEMAGB modifiyeli bitüm	76,7	0,461
OEABAB modifiyeli bitüm	93,5	0,431
OEMANB modifiyeli bitüm	79,9	0,438
OEÇB modifiyeli bitüm	100	0,433
OEKB modifiyeli bitüm	89,1	0,422
OEÇFB modifiyeli bitüm	104	0,413
MEGPB modifiyeli bitüm	104,4	0,399

Superpave bağlayıcı şartnamesinde göre BBR testinde elde edilen sünme rijitliği 300 MPa'dan küçük, sünme oranı 0,3'ten büyük olmalıdır.

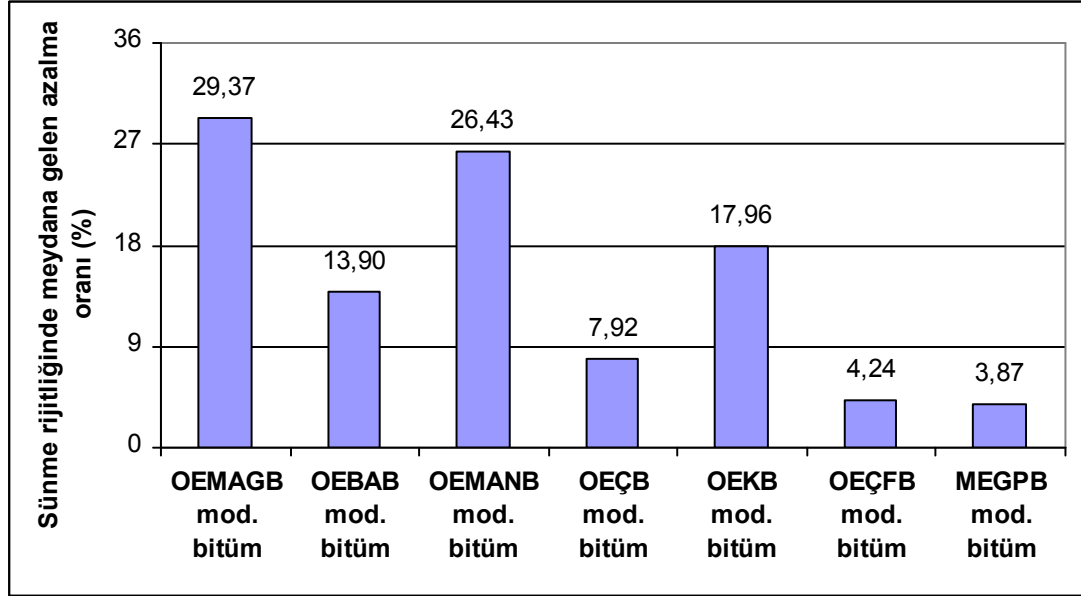
Sünme rijitliği, bitümün düşük sıcaklıklardaki çatlama direncinin göstergesi olarak kullanılabilir. Sünme rijitliği yüksek olan bitüm gevrek davranış göstereceğinden düşük sıcaklıklarda daha çok çatlama eğilimi gösterir [4] veya sünme rijitliğinin azalmasıyla bitümde daha küçük çekme gerilmeleri meydana gelir ve buna bağlı olarak düşük sıcaklıkta çatlama olasılığı azalır [30].

Bitümlerin -12°C 'deki sünme rijitlikleri Şekil 6.21'de grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 6.21. Sünme rijitliği (S) değerleri

Şekil 6.21 ve Çizelge 6.42'de görüldüğü üzere -12°C 'de uygulanan testte tüm numuneler sünme rijitliği ile ilgili şartı sağlamıştır. Bunun yanı sıra, organik esaslı metal bileşikler ve MEGPB modifikasyonu ile bitümün sünme rijitliği azalmıştır. Şekil 6.22'de orijinal bitümün modifiye edilmesi sonucu rijitliğinde meydana gelen azalma miktarları kullanılan katkı maddelerine göre oransal olarak sunulmuştur.

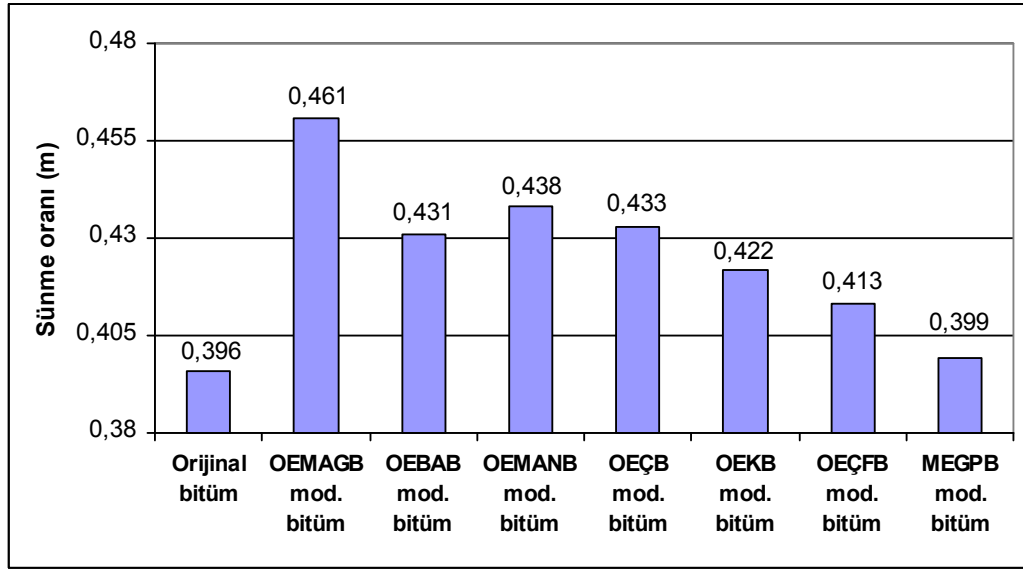


Şekil 6.22. Bitümün sünme rijitliğinde meydana gelen azalma oranları

Şekil 6.22’de görüldüğü üzere özellikle OEMAGB ve OEMANB modifikasyonu ile bitümün sünme rijitliği önemli oranda azalmaktadır.

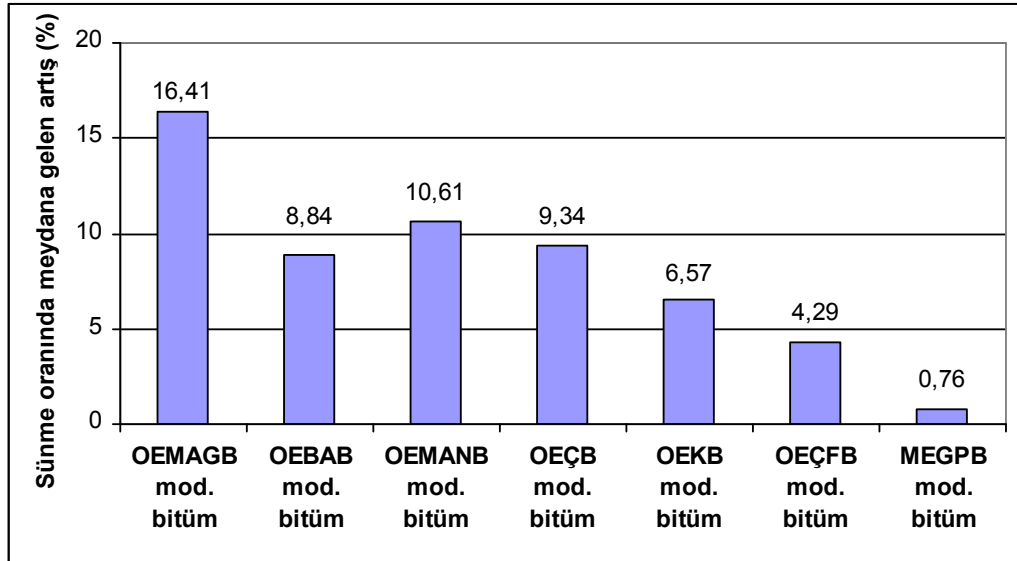
Bitümün düşük sıcaklıkta çatlamaya karşı direncinin göstergesi olarak sünme oranı (m) da kullanılmaktadır. Bitüme ait m değerinin yüksek olması arzu edilir. Daha yüksek m değerine sahip olan bitüm sıcaklık azalmasına daha düşük rijitlikle tepki verecektir. Böyle bir davranış özelliğine sahip bitüm düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamalara karşı daha dirençli olur [9]. Başka bir ifadeyle, yüksek m değerine sahip bitümler düşük sıcaklıklarda daha az çatlama riski taşırlar [37].

Çatlama direncini kıyaslamak için kullanılan m değerlerinin modifiye bitümlerde daha yüksek olduğu Çizelge 6.42’de görülmektedir. Bitümlere ait m değerleri Şekil 6.23’de grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 6.23. Sünme oranı (m) değerleri

Şekil 6.23 incelendiğinde görülebileceği üzere katkı maddeleri ile bitümün m değeri artmaktadır. Orijinal bitümün modifiye edilmesi sonucu m değerinde meydana gelen artış oranları Şekil 6.24'te verilmiştir.



Şekil 6.24. Bitümün m değerinde meydana gelen artış oranları

Şekil 6.24'te de görülebileceği üzere çalışmada kullanılan katkı maddeleri içinde OEMAGB, sünme oranında meydana getirdiği artış bakımından öne çıkmaktadır.

MEGPB, diğer katkı maddelerine kıyasla sünme rijitliği ve oranında daha az değişim yaratmıştır. Bu yüzden, BBR testi orijinal ve MEGPB modifiyeli bitümlere -18°C 'de de uygulanmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.43'te sunulmuştur.

Çizelge 6.43. -18°C 'deki BBR test sonuçları

Bitüm türü	Test Sıcaklığı: -18°C	
	Sünme Rijitliği, S (MPa)	Sünme Oranı, m
Orijinal bitüm	281	0,325
MEGPB modifiyeli bitüm	209	0,356

Çizelge 6.43'te görüldüğü üzere -18°C 'de uygulanan testte MEGPB modifikasyonu ile önemli değişiklik meydana gelmiştir. %2 oranında MEGPB ile modifiye edilen bitümün sünme rijitliği % 25,62 oranında azalmış, sünme oranı ise % 9,54 oranında artmıştır.

BBR test verilerine göre, organik esaslı metal bileşikler ve MEGPB modifikasyonu ile bitümün sünme rijitliği azalırken sünme oranı artmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar önceki testlerle de tutarlı olup bitümün düşük sıcaklık çatlamlarına karşı daha dirençli hale geldiğini göstermektedirler. Buna göre; bitüm, ağırlıkça %3 oranında organik esaslı metal bileşikler veya ağırlıkça %2 oranında MEGPB ile modifiye edildiğinde düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamlara karşı direnci artmaktadır.

6.8. DSR Test Sonuçları

DSR testi ile bitümün orta ve yüksek sıcaklıklardaki özellikleri ölçülür. Test esnasında, bitüm sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine maruz kalır. DSR testi ile bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) ölçülür. G^* ile kayma gerilmeleri sebebiyle oluşan deformasyona karşı bitümün gösterdiği toplam direnç ölçülür. Faz açısı (δ) ise viskoz ve elastik deformasyonun bağıl ölçüsüdür. Faz açısı küçüldükçe bitümün elastik davranış özelliği, büyüdükçe viskoz davranış özelliği artar. Faz açısının 0° olması malzemenin tamamıyla elastik özellikte olduğunu, 90° olması ise tamamıyla viskoz özellikte olduğunu ifade eder [18].

Test ölçümleri ile elde edilen G^* ve δ bitümün tekerlek izine karşı direncini değerlendirmek üzere $G^*/\sin\delta$ şeklinde kullanılır. $G^*/\sin\delta$, bitümün tekerlek izi direnç parametresidir. Bu değer daha yüksek olması bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı daha dirençli olduğunu gösterir. PG bağlayıcı şartnamesine göre $G^*/\sin\delta$ değeri yaşlandırılmış bitümler için en az 2,2 kPa, yaşlandırılmamış bitümler için en az 1 kPa olmalıdır.

TEGPB ve DEGPB'nin bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı direncinin artırılmasında kullanılabileceği önceki test sonuçlarına göre belirlenmişti. Bu sebeple DSR testi orijinal bitüm ve optimum oranda (ağırlıkça %2 oranında) TEGPB ve DEGPB ile modifiye edilen bitümlere 58°C , 64°C ve 70°C 'de uygulanmıştır. Test sonunda elde edilen değerlerle her bir bitüm için $G^*/\sin\delta$ değerleri hesaplanarak tekerlek izi direnci üzerinde modifikasyonun etkisi değerlendirilmiştir. DSR testi, EK-22'de fotoğrafı görülen Bohlin marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen DSR testlerinde elde edilen G^* ve δ değerleri Çizelge 6.44'te toplu halde sunulmuştur.

Çizelge 6.44. DSR test sonuçları

Bitüm türü	Test sıcaklığı: 58°C		Test sıcaklığı: 64°C		Test sıcaklığı: 70°C	
	G* (kPa)	δ (°)	G* (kPa)	δ (°)	G* (kPa)	δ (°)
Orijinal Bitüm	2,8253	86,28	1,1995	87,49	0,55969	88,22
TEGPB Modifiyeli Bitüm	3,3383	85,01	1,4732	86,53	0,67498	87,66
DEGPB Modifiyeli Bitüm	2,9230	86,16	1,2832	87,76	0,59064	88,35

Çizelge 6.44 incelendiğinde TEGPB ve DEGPB ilavesiyle bitümün kompleks kayma modülünün arttığı görülmektedir.

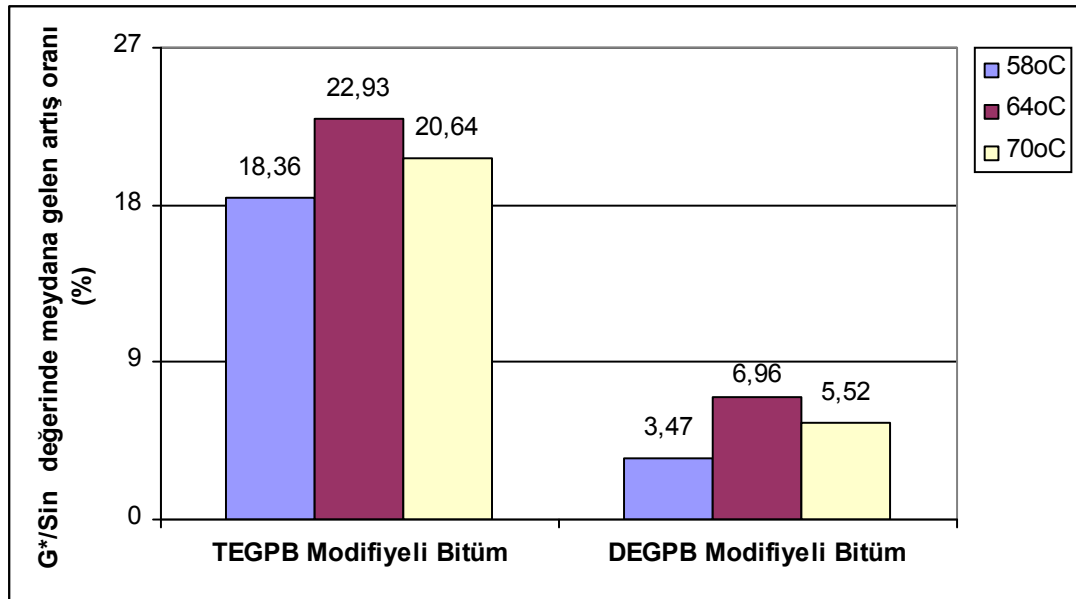
Çizelge 6.44'teki verilerle her bir bitüm için test sıcaklıklarında hesaplanan $G^*/\sin\delta$ değerleri Çizelge 6.45'te sunulmuştur.

Çizelge 6.45. $G^*/\sin\delta$ değerleri

Bitüm türü	$G^*/\sin\delta$ (kPa)		
	58°C	64°C	70°C
Orijinal Bitüm	2,8313	1,2006	0,55996
TEGPB Modifiyeli Bitüm	3,3510	1,4759	0,67554
DEGPB Modifiyeli Bitüm	2,9296	1,2842	0,59088

Çizelge 6.45'te de görüldüğü üzere $G^*/\sin\delta$ değeri modifikasyon sonucu artmaktadır. Orijinal ve modifiye bitümler şartname sınırlaması olan 1 kPa değerini 58°C ve 64°C'de sağlamaktadır. 70°C için şart sağlanmasa da bu sıcaklıktaki test değerleri modifikasyonun tekerlek izi direnci üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılabilir niteliktedir.

Şekil 6.25'te TEGPB ve DEGPB ile modifikasyonun tekerlek izi direnç parametre değerinde ($G^*/\sin\delta$) meydana getirdiği artışlar oransal olarak görülmektedir.



Şekil 6.25. Bitümde TEGPB ve DEGPB modifikasyonu ile $G^*/\sin\delta$ değerinde meydana gelen artış oranları

Şekil 6.25'te görüldüğü üzere ağırlıkça %2 oranında TEGPB eklenmesi bitümün tekerlek izi direnç parametresini 58°C'de %18,36, 64°C'de %22,93, 70°C'de %20,64 oranında arttırmaktadır. Ağırlıkça %2 oranında DEGPB eklendiğinde ise artış oranları aynı test sıcaklıkları için sırasıyla %3,47, %6,96 ve %5,52 olmaktadır. Bu sonuçlar her iki katkı maddesinin de esnek üstyapılarda meydana gelen tekerlek izi oluşumunu azaltacağını göstermektedir. Bunun yanı sıra, TEGPB'nin bu yönde daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.

TEGPB ve DEGPB ile elde edilen sonuçlar, bitüm modifikasyonunda epoksi reçinesi kullanılan çalışma ile [33] paralellik göstermektedir. İki çalışmada da bitüme ilave edilen katkı maddesi miktarı düşük tutulmuştur (%2). Epoksi reçinesi modifiyeli bitümle 64°C'de elde edilen DSR test sonuçları bitümün

tekerlek izi oluşumuna karşı %22 oranında direnç kazandığını göstermektedir. Mevcut çalışmamızda ise benzer direnç kazanımları TEGPB ve DEGPB ile sağlanmaktadır.

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bitüm, esnek üstyapılarda kullanılan önemli bir malzemedir ve sahip olduğu özellikler üstyapı performansını yakından etkiler. Bu çalışmada çeşitli katkı maddeleri ilave edilerek bitümün özellikleri geliştirilmiştir. Özellikleri geliştirilmiş bitümlerin kullanılmasıyla esnek üstyapıların performansının artması sağlanmıştır.

Çalışmada kullanılan katkı maddeleri sentezlenerek elde edilmiş yeni malzemelerdir. Sentezleme işlemi basit ve kolaylıkla temin edilebilen cihaz grubuyla laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Katkı maddeleri, sentezde kullanılan malzemelere göre organik esaslı metal bileşiği veya etilen glikol esaslı polibor bileşiği olmak üzere hem genel olarak hem de her biri ayrı ayrı olmak üzere özel olarak isimlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında toplam dokuz farklı katkı maddesi sentezlenmiş ve bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Katkı maddelerinin altı tanesi organik esaslı metal bileşiği (OEMAGB, OEBAB, OEMANB, OEÇB, OEKB, OEÇFB), üç tanesi etilen glikol esaslı polibor bileşiğidir (TEGPB, DEGPB, MEGPB). Katkı maddelerinin bitüm ve agrega-bitüm karışım özelliklerinde meydana getirdiği değişimler viskozite testleri, yumuşama noktası testleri, düktilite testleri, DSR (Dynamic Shear Rheometer) testleri, BBR (Bending Beam Rheometer) testleri, Marshall testleri ve Nicholson soyulma testiyle değerlendirilmiştir. Uygulanan testler neticesinde her bir katkı maddesinin bitüm ve bitümlü karışım (agrega-bitüm karışımı) özelliklerinde etkili değişimler meydana getirerek esnek üstyapı performansını arttırdığı belirlenmiştir. Orijinal bitümün organik esaslı metal bileşikleriyle modifikasyonu sonucu meydana gelen değişimler Çizelge 7.1'de, etilen glikol esaslı polibor bileşikleriyle modifikasyonu sonucu meydana gelen değişimler ise Çizelge 7.2'de özet halinde sunulmuştur.

Çizelge 7.1. Organik esaslı metal bileşiklerinin bitüm ve bitümlü karışım özelliklerinde meydana getirdikleri değişimler

Katkı Maddesi	İlave Oranı	Viskozite	Yumuşama Noktası	Düktilite	BBR		Marshall Stabilesi	Soyulma Direnci	Plent Sıcaklığı
					Sünme rijitliği (S)	Sünme oranı (m)			
OEMAGB	%3	%18,0-%47,0 arasında azalma	2,1°C azalma	artma	%29,40 azalma	%16,41 artma	%10,14-%19,38 arasında artma	%200 artma	5,4°C azalma
OEBA	%3	%10,3-%15,3 arasında azalma	4,2°C azalma	artma	%13,90 azalma	%8,84 artma	%2,23-%9,69 arasında artma	%200 artma	2,0°C azalma
OEMANB	%3	%12,1-%18,3 arasında azalma	2,6°C azalma	artma	%26,43 azalma	%10,61 artma	%4,05-%10,50 arasında artma	%216,7 artma	2,6°C azalma
OEÇB	%3	%11,3-%16,9 arasında azalma	3,5°C azalma	artma	%7,92 azalma	%9,34 artma	%4,98-%8,91 arasında artma	%200 artma	2,8°C azalma
OEKB	%3	%7,3-%12,6 arasında azalma	2,0°C azalma	artma	%17,96 azalma	%6,57 artma	%6,32-%19,59 arasında artma	%193,3 artma	1,4°C azalma
OEÇFB	%3	%9,3-%20,0 arasında azalma	1,4°C azalma	artma	%4,24 azalma	%4,29 artma	%6,08-%10,74 arasında artma	%216,7 artma	3,5°C azalma

Çizelge 7.2. Etilen glikol esaslı polibor bileşiklerinin bitüm ve bitümlü karışım özelliklerinde meydana getirdikleri değişimler

Katkı Maddesi	İlave Oranı	Viskozite	Yumuşama Noktası	DSR			BBR		Marshall Stabilitesi	Soyulma Direnci
				58°C	64°C	70°C	Sünme rijitliği (S)	Sünme oranı (m)		
TEGPB	%2	%2,4-%15,8 arasında artma	1,1°C artma	%18,36 artma	%22,93 artma	%20,64 artma	-	-	%3,45-%12,11 arasında artma	Etkisiz
DEGPB	%2	%2,1-%12,5 arasında artma	0,4°C artma	%3,47 artma	%6,96 artma	%5,52 artma	-	-	%1,99-%12,41 arasında artma	Etkisiz
MEGPB	%2	%11,7-%19,8 arasında azalma	0,1°C azalma	-	-	-	<u>-12°C</u> %3,87 azalma <u>-18°C</u> %25,62 azalma	<u>-12°C</u> %0,76 artma <u>-18°C</u> %9,54 artma	%6,10-%12,98 arasında artma	%33 artma

Orijinal ve organik esaslı metal bileşikleri ile modifiye edilen bitümlerle gerçekleştirilen ve modifikasyon sonucu meydana gelen değişimlerin Çizelge 7.1’de özetlendiği deneysel araştırmalar sonucunda katkı maddelerinin bitüm ve bitümlü karışımlarda farklı oranlarda olmak üzere benzer iyileştirmeler sağladığı belirlenmiştir. Buna göre, her bir farklı organik esaslı metal bileşiği ile bitümün viskozitesi, yumuşama noktası, sünme rijitliği azalmakta; duktilitesi ve sünme oranı artmaktadır. Bu tür katkı maddeleri ile bitümün sünek davranış özelliği gelişmiştir. Bu suretle, soğuk havanın hakim olduğu bölgelerde organik esaslı metal bileşikleri esnek üstyapıların düşük sıcaklık çatlamlarına karşı direncini arttırarak yapı performansını iyileştirmiştir. Düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlaklara karşı direnç artışının yanı sıra tüm organik esaslı metal bileşikleri bitümlü karışımların Marshall stabilitesini ve soyulma direncini arttırmakta ve bitümlü sıcak karışımların imal edildiği plantlerdeki sıcaklığın azalmasına imkan vermektedir. Plant sıcaklığının azalması hem bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerjinin hem de bitümde meydana gelen kısa dönem yaşlanmanın azalmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu katkı maddeleri ile bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği artmakta, yol inşaatında serme ve sıkıştırma işlemleri daha kolay ve daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmektedir.

Etilen glikol esaslı polibor bileşiklerinin bitüm ve bitümlü karışım özelliklerinde meydana getirdikleri değişimler Çizelge 7.2’de özetlenmiştir. Çizelge 7.2 incelendiğinde TEGPB ve DEGPB modifikasyonunun bitümde benzer değişiklikler meydana getirdiği anlaşılmaktadır. Her iki katkı maddesi de bitümün viskozitesini, yumuşama noktasını, tekerlek izi oluşumuna karşı direncini ve bitümlü karışımların Marshall stabilitesini arttırmıştır. Artış, TEGPB ile daha yüksek oranlarda gerçekleşmektedir. Test sonuçlarına göre hem TEGPB hem de DEGPB bitümün fiziksel sertliğini arttırmaktadır. Bitümde bu yönde meydana gelen değişiklik esnek üstyapıların tekerlek izi, kuma ve lastik deseni oluşumlarına karşı direncini arttırır. Bu yüzden her iki katkı maddesinin de sıcak iklimin hakim olduğu bölgelerdeki esnek üstyapılarda kullanılması ile üstyapının performansı artmaktadır. Ayrıca her

iki katkı maddesi de pratik olarak bitümlü sıcak karışımların işlenebilirlik özelliğinde azalmaya ve plent sıcaklığında artmaya yol açmamaktadır.

Çizelge 7.2’de görüldüğü üzere ağırlıkça %2 oranında MEGPB modifikasyonu bitümün viskozitesini, yumuşama noktasını ve sünme rijitliğini azaltmakta; sünme oranını ise arttırmaktadır. Bu sonuçlar MEGPB modifikasyonu ile bitümün sünek davranış özelliğinin geliştiğini gösterir. Test sonuçları incelendiğinde MEGPB’nin ve organik esaslı metal bileşiklerinin bitüm davranışında benzer değişimler meydana getirdiği görülmektedir. Yani organik esaslı metal bileşikleri ile sağlanan avantajlar aynı zamanda MEGPB ile de sağlanmaktadır. Buna göre bitümün MEGPB ile modifikasyonu esnek üstyapıların düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamalara karşı direncini artırır. Böylece soğuk iklimin hakim olduğu bölgelerdeki esnek üstyapı performansı MEGPB ile iyileşmektedir. MEGPB, bitümlü karışımların Marshall stabilitesini ve soyulma direncini de arttırmıştır. Bunların yanı sıra, MEGPB modifikasyonlu bitüm kullanımı bitümlü sıcak karışımların imal edildikleri plentlerdeki sıcaklığın azaltılmasına imkan sağlar. Plent sıcaklığının azalması bitümlü sıcak karışım imalatında harcanan enerjiyi ve bitümde meydana gelen kısa dönem yaşlanmayı azaltır. Ayrıca MEGPB kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği arttığından yol inşaatında serme ve sıkıştırma işlemleri daha kolay ve daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir.

Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2’deki test sonuçları ve yukarıda belirtilen hususlara bağlı olarak katkı maddeleri için tavsiye edilen kullanım alanları Çizelge 7.3’te sunulmuştur.

Çizelge 7.3. Katkı maddelerinin tavsiye edilen kullanım alanları

Katkı Maddesi		Tavsiye Edilen Kullanım Alanları
Adı	İlave Oranı	
OEMAGB OEBAB OEMANB OEÇB OEKB OEÇFB MEGPB	%3 %3 %3 %3 %3 %3 %2	• Soğuk iklimin hakim olduğu bölgeler, • Yağışlı iklimin hakim olduğu bölgeler, • Ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu karayolu kesimleri, • Otoyollar, • Yatay kurplar, • Motorlu araç park alanları, • Şehir içlerinde toplu taşımaya ayrılan şeritler ve durak alanları, • Kavşak yaklaşım alanları.
TEGPB DEGPB	%2 %2	• Sıcak iklimin hakim olduğu bölgeler, • Ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu karayolu kesimleri, • Otoyollar, • Yatay kurplar, • Motorlu araç park alanları, • Şehir içlerinde toplu taşımaya ayrılan şeritler ve durak alanları, • Kavşak yaklaşım alanları.

Sentezlenerek elde edilmiş olan ve çalışmada kullanılan katkı maddelerinin maliyetleri ve bitüme ilave edilme oranları düşüktür. Her iki sebebe bağlı olarak modifikasyonun bitüm maliyetinde meydana getirdiği artışlar düşük seviyelerde kalmaktadır. Bunların yanı sıra esnek üstyapılarda kullanılan bitüm oranlarının fazla olmaması bu katkı maddelerinin esnek üstyapı maliyetini oldukça az miktarda etkilemesini sağlamaktadır. Bu hususlara bağlı olarak organik esaslı metal bileşiklerinin (OEMAGB, OEBAB, OEMANB, OEÇB, OEKB, OEÇFB) ve etilen glikol esaslı polibor bileşiklerinin (TEGPB,

DEGPB, MEGPB) sahip oldukları maliyet özellikleri esnek üstyapılarda kullanımları bakımından avantaj yaratmaktadır.

Modifiye bitüm üretiminde bitüm ve katkı maddesinden oluşan homojen bir karışımın elde edilmesi esastır. Bu sebeple bitümün katkı maddesi ile karıştırıldığı sıcaklık ve karıştırma süresi oldukça önemlidir. Karıştırma sıcaklığının ve süresinin mümkün olduğunca düşük olması tercih edilir. Bu suretle modifiye bitüm üretimi esnasında harcanan enerji ve bitümde meydana gelen yaşlanma miktarı azalır. Çalışmada kullanılan organik esaslı metal bileşikler ile modifiye bitüm üretimi 140°C'de 10 dakikalık karıştırma ile gerçekleştirilmektedir. Etilen glikol esaslı polibor bileşiklerinin kullanılması durumunda ise modifikasyon için ihtiyaç duyulan sıcaklık ve karıştırma süresi 110°C ve 5 dakikadır. Mevcut literatür çalışmalarıyla kıyaslandığında organik esaslı metal bileşikler ve etilen glikol esaslı polibor bileşikler ile modifiye bitüm üretimi enerji sarfiyatı ve bitümde meydana gelen yaşlanma miktarında azalma sağlamaktadır.

Çalışmada kullanılan katkı maddeleri ile bitümün farklı koşullar altında sergilediği davranış özellikleri geliştirilmiştir. Farklı iklim ve trafik koşullarına sahip bölgelerde bu çalışmada sentezlenen uygun katkı maddesi kullanılarak esnek üstyapının mevcut/olası bozulmalara karşı direncinde artış sağlanmak suretiyle üstyapı performansında gelişme sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Karayolları Genel Müdürlüğü “Yol Ağı Bilgileri” <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx> (2010).
2. 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, 33, 37-50, 53, 56-58, 60-62, 90, 93 (2001).
3. Kett, I., “Asphalt Materials and Mix Design Manual”, **Noyes Publications**, New Jersey, 2-3 (1998).
4. Tunç, A., “Yol Malzemeleri ve Uygulamaları”, **Atlas Yayın Dağıtım Ltd. Şti.**, İstanbul, 57-62, 64-67, 72, 76-83, 98, 101, 107-111, 116, 130-131, 140, 142, 147, 168-169, 222-231 (2001).
5. Asphalt Institute, “Asfalt El Kitabı”, Mehmet Uluçayırılı, Ayla Yavuz, **İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.**, İstanbul, 38, 44, 64, 74-77, 86, 548 (2002).
6. Whiteoak, D., “Shell Bitüm El Kitabı”, Abdullah Hilmi Lav, M.Ayşen Lav, **İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.**, İstanbul 28-29, 48-49, 57, 86-88, 92, 101-113, 122, 133-136, 145-149, 152-155, 161, 243-248 (2004).
7. Tunç, A., “Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı”, **Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti.**, Ankara, 90, 98-99, 105, 107, 165-166 (2004).
8. Atkinson, K., “Highway Maintenance Handbook”, **Thomas Telford Ltd.**, London, 92-93, (1990).
9. Lavin, P. G., “Asphalt Pavements”, **Spon Press**, London and New York, 2, 8, 21-27, 188 (2003).
10. O’Flaherty, C.A., “ Highways 4th ed.”, **Butterworth-Heinemann**, Woburn, 124-125, 133 (2002).
11. Yağız, F., Işıksalan, C., Keçeciler, A. F., Akkol, G., “Bitümlü Malzemeler”, **İş Matbaacılık ve Ticaret**, Ankara, 49-51, 54, 71, 75, 77-82, 302 (1967).
12. TS 1081 EN 12591, “Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar- Kaplama sınıfı bitümler – Özellikler”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2003).

13. TS 1082, "Yol Üst Yapılarında Kullanılan Asfalt Emülsiyonları", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (1972).
14. TS 1083, "Yol Üst Yapılarında Kullanılan Sıvı Petrol Asfaltları", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (1972).
15. TS 1084, "Yol Üst Yapılarında Kullanılan Katranlar", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (1972).
16. TS 1093 EN 12595, "Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – Kinematik Viskozite Tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2003).
17. Öztürk, E.A., Çubuk, M.K., "Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama", **Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi**, 19 (2): 175-184 (2004).
18. Dinç, E., "Performans Sınıfı Asfaltlar-Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyleri", **T.C. Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü**, Sivas, 11, 17-35 (1999).
19. İnternet: European Asphalt Pavement Association (EAPA) "Asphalt In Figures 2008" http://www.eapa.org/default_news.htm (2010).
20. İnternet: European Asphalt Pavement Association (EAPA) "Asphalt In Figures 2007", http://www.eapa.org/default_news.htm (2010).
21. İnternet: European Asphalt Pavement Association (EAPA) "Asphalt In Figures 2006", http://www.eapa.org/default_news.htm (2010).
22. İnternet: European Asphalt Pavement Association (EAPA) "Asphalt In Figures 2005" http://www.eapa.org/default_news.htm (2010).
23. İnternet: European Asphalt Pavement Association (EAPA) "Asphalt In Figures 2004" http://www.eapa.org/default_news.htm (2010).
24. İnternet: European Asphalt Pavement Association (EAPA) "Asphalt In Figures 2003" http://www.eapa.org/default_news.htm (2010).
25. İnternet: European Asphalt Pavement Association (EAPA) "Asphalt In Figures 2002" http://www.eapa.org/default_news.htm (2010).
26. İnternet: European Asphalt Pavement Association (EAPA) "Asphalt In Figures 2001" http://www.eapa.org/default_news.htm (2010).
27. Cao, W., "Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process", **Construction and Building Materials**, 21 (5): 1011-1015 (2007).

28. Gökem, Ç., Şengöz, B., "Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime", ***Construction and Building Materials***, 23 (6): 2227-2236 (2009).
29. Zhang, F., Yu, J., "The research for high-performance SBR compound modified asphalt", ***Construction and Building Materials***, 24 (3): 410-418 (2010).
30. Shahabadi, A.Z., Shokuhfar, A., Nejad, S.E., "Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles", ***Construction and Building Materials***, 24 (7): 1239-1244 (2010).
31. Al-Hadidy, A.I., Tan, Y., "Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements", ***Construction and Building Materials***, 23 (8): 2941-2950 (2009).
32. Liu, S., Cao, W., Fang, J., Shang, S., "Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt", ***Construction and Building Materials***, 23 (7): 2701-2708 (2009).
33. Çubuk, M., Gürü, M., Çubuk, M.K., "Improvement of bitumen performance with epoxy resin", ***Fuel***, 88 (7): 1324-1328 (2009).
34. Chen, H., Xu, Q., "Experimental study of fibers in stabilizing and reinforcing asphalt binder", ***Fuel***, 89 (7): 1616-1622 (2010).
35. Haddadi, S., Ghorbel, E., Laradi, N., "Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA", ***Construction and Building Materials***, 22 (6): 1212-1219 (2008).
36. Şengöz, B., Işıkyakar, G., "Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen", ***Construction and Building Materials***, 22 (9): 1897-1905 (2008).
37. Jun, L., Yuxia, Z., Yuzhen, Z., "The research of GMA-g-LDPE modified Qinhuangdao bitumen", ***Construction and Building Materials***, 22 (6): 1067-1073 (2008).
38. Lee, S.J., Akisetty, C.K., Amirkhanian, S.N., "The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements", ***Construction and Building Materials***, 22 (7): 1368-1376 (2008).

39. 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).
40. Edwards, Y., Taşdemir, Y., Isacsson, U., "Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220 - low temperature performance", **Fuel**, 85 (7-8): 989-997 (2006).
41. Edwards, Y., Taşdemir, Y., Isacsson, U., "Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220 – high and medium temperature performance", **Construction and Building Materials**, 21 (10): 1899-1908 (2007).
42. Aksoy, A., Şamlıoğlu, K., Tayfur, S., Özen, H., "Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures", **Construction and Building Materials**, 19 (1): 11-18 (2005).
43. Abo-Qudais, S., Al-Shweily, H., "Effect of antistripping additives on environmental damage of bituminous mixtures", **Building and Environment**, 42 (8): 2929-2938 (2007).
44. Gonzalez, 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).
45. Gürü, M., "Improvement of adhesion of bitumen-aggregate coatings by additives", **Cellulose Chemistry and Technology**, 38 (1-2): 129-140 (2004).
46. Navarro, F.J., Partal, P., Martinez-Boza, F., Valencia, C., Gallegos, C., "Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens", **Chemical Engineering Journal**, 89 (1-3): 53-61 (2002).
47. Metcalf, J.B., Gopalakrishnan, K., Waters, M.D., "An initial investigation of the use of a rubber waste (EPDM) in asphalt concrete mixtures", **Waste Management Series**, 1: 940-952 (2000).
48. Önal, M.A., Kahramangil, M., " Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı", **T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı**, Ankara, 26, 31-32 (1993).
49. Kök, B.V., Yılmaz, M., "The effects of using lime and styrene–butadiene–styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt", **Construction and Building Materials**, 23 (5): 1999-2006 (2009).

50. ASTM D 4402-02, "Standart Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using A Rotational Viscometer", **American Standard for Testing Materials**, West Conshohocken (2002).
51. Zhang, J., Wang, J., Wu, Y., Wang, Y., Wang, Y., "Evaluation of the improved properties of SBR/weathered coal modified bitumen containing carbon black", **Construction and Building Materials**, 23 (7): 2678-2687 (2009).
52. Airey, G.D., "Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens", **Fuel**, 82 (14): 1709-1719 (2003).
53. Galooyak, S.S., Dabir, B., Nazarbeygi, A.E., Moeini, A., "Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites", **Construction and Building Materials**, 24 (3): 300-307 (2010).
54. Taşdemir, Y., Açar, E., "Bitümlü kaplamalarda düşük sıcaklık çatlaklarının incelenmesi", **itüdergisi/d mühendislik**, 4 (1): 59-70 (2005).
55. Marasteanu, M.O., Li, X., Clyne, T.R., Voller, V.R., Timm, D.H., Newcomb, D.E., "Low Temperature Cracking Of Asphalt Concrete Pavements", **University of Minnesota MN/RC-2004-23, Minnesota** (2004).
56. Verhaeghe, B.M.J.A., Myburgh, P.A., Denneman, E., "Asphalt rutting and its prevention", **9th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa**, Botswana (2007).

EKLER

EK-1 Agregada ve bitüm özgül ağırlık tayini

Agregada özgül ağırlık tayini

Çalışmada agregada özgül ağırlıkları deneysel olarak aşağıda belirtildiği şekilde belirlenmiştir.

Kaba agreganın özgül ağırlık tayini

- Kaba agregadan karışım gradasyonunu temsil edecek şekilde ve karışımında bulunan maksimum dane boyutuna göre belirli miktarda hazırlanır.
- Numune yıkanır, tepsiye konur ve 24 saat suda bekletilir.
- 24 saatin sonunda numune su emici özellikteki bez üzerine yayılır. Numune, daneler üzerinde gözle görülebilecek su filmi kalmayınca kadar kurularak doygun-yüzey kuru hale getirilir. Bu aşamada danelerin gözeneklerindeki suyun buharlaşmamasına dikkat edilmelidir.
- Doygun-yüzey kuru hale gelmiş numune tartılır ve sonuç kaydedilir (B).
- Tartımdan sonra numune hemen tel sepete koyulur ve $25\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki ve $977\pm2 \text{ kg/m}^3$ yoğunluktaki suya daldırılır. Su içerisindeki tel sepet sallanarak agregada daneleri arasına suyun dolması sağlandıktan sonra tartım yapılır ve ölçüm kaydedilir (C).
- Daha sonra numune bir tepsiye boşaltılır ve $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde sabit ağırlığa gelene kadar kurutulur. Kurutma işleminden sonra numune oda sıcaklığında soğutulur. Kuru hale gelen numune tartılır ve ölçüm kaydedilir (A).

Elde edilen ölçüm değerleri ile kaba agregaya ait özgül ağırlıklar ve absorpsiyon yüzdesi aşağıdaki formüller ile hesaplanır;

EK-1 (Devam) Agregata ve bitüm özgül ağırlık tayini

- Hacim Özgül Ağırlığı = $\frac{A}{B - C}$
- Yaş Hacim Özgül Ağırlığı = $\frac{B}{B - C}$
- Zahiri Özgül Ağırlık = $\frac{A}{A - C}$
- Absorpsiyon (%) = $\frac{B - A}{A} \times 100$

Çalışmada Tip 2 gradasyonuna ait ortalama değerler kullanılmıştır. Tip 2 gradasyonunda maksimum dane boyutu ½” olduğundan ölçümler 2 kg kaba agregata ile yukarıda belirtilen koşullarda yapılmıştır. Kaba agregata ait hacim ve zahiri özgül ağırlıklar elde edilen ölçüm değerleri ile hesaplanmıştır.

İnce agreganın özgül ağırlık tayini

- Karışım gradasyonunu temsil edecek şekilde yaklaşık 1000 g numune alınır.
- Numune, 200 no.'lu elekten yıkanıp bir tepsiye alınır. Tepsi, numune seviyesini geçecek kadar su ile doldurulur. Numune bu şekilde 24 saat suda bekletilir.
- 24 saatin sonunda numunede kayıp oluşturmada n tepsideki su süzölür. Numune, absorpsif olmayan düz bir yüzeye yayılır ve doymun-yüzey kuru hale getirmek üzere sıcak hava uygulayarak sürekli karıştırılır. Numune karıştırılırken serbest dökülebilir hale gelene kadar karıştırma işlemine devam edilir.
- Doymun-yüzey kuru hale gelmiş numuneden yaklaşık 500 g alınır, piknometre içine konur ve tartılır. Tartım kaydedilir (C).

EK-1 (Devam) Agrega ve bitüm özgül ağırlık tayini

- Piknometreye numune seviyesini geçecek kadar su konur ve çalkalanarak hava kabarcıklarının çıkması sağlanır. Daha sonra piknometreye işaret çizgisine kadar su ilave edilerek $25\pm1^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosuna yerleştirilir. Piknometre ve içindeki malzemenin 25°C ulaşması sağlandıktan sonra su banyosundan çıkarılıp piknometre içindeki su seviyesi kontrol edilir. Hemen kurulanır ve tartılır. Tartım kaydedilir (D).
- Numune piknometreden bir kaba alınıp $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'deki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur. Kurutma işleminden sonra numune oda sıcaklığında soğutulur ve tartılır. Tartım kaydedilir (E).
- Elde edilen ölçüm değerleri ile ince agregaya ait özgül ağırlıklar ve absorpsiyon yüzdesi aşağıdaki formüller ile hesaplanır;

$$\circ \text{Hacim Özgül Ağırlığı} = \frac{E}{B + C - A - D}$$

$$\circ \text{Yaş Hacim Özgül Ağırlığı} = \frac{C - A}{B + C - A - D}$$

$$\circ \text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{E}{B + E - D}$$

$$\circ \text{Absorpsiyon (\%)} = \frac{C - A - E}{E} \times 100$$

A: Piknometre ağırlığı, g

B: 25°C 'deki su dolu piknometre ağırlığı, g

Çalışmada, ince agregaya ait hacim ve zahiri özgül ağırlıklar yukarıda belirtilen koşullarda yapılan ölçümler sonucu elde edilen değerlerle hesaplanmıştır.

EK-1 (Devam) Agrega ve bitüm özgül ağırlık tayini

Fillerin özgül ağırlık tayini

- Özgül ağırlık şişesi ve kapağı tartılır, tartım kaydedilir (A).
- Şişe, damıtık veya kaynatılıp soğutulmuş su ile ağzına kadar doldurulur, $25\pm0,1^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosunda en az 1 saat bekletilir, kapağı kapatılır, su banyosundan çıkarılıp kurulanır ve hemen tartılır. Tartım kaydedilir (B).
- Filler, $105\pm5^{\circ}\text{C}$ 'deki etüvde 4 saat kurutulup ardından oda sıcaklığında soğutulur. Özgül ağırlık şişesi ve kapağı da kurutulur. Filler, şişenin 1/3'ü dolacak şekilde şişeye boşaltılır, şişenin kapağı kapatılıp tartılır. Tartım kaydedilir (C).
- Ardından özgül ağırlık şişesi yarısına kadar su ile doldurulur, kapağı kapatılıp içindeki hava çıkartılır (birkaç kez yavaşça şişeyi tezgaha vurup en az 5 dakika bir vakum desikatör içinde veya su trombu ile düşürülmüş basınca maruz bırakılarak). Bu işleme hava kabarcığı kalmayana kadar devam edilir.
- Daha sonra özgül ağırlık şişesi tamamen su ile doldurulup $25\pm0,1^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosunda en az 1 saat bekletilir. Kapağı kapatılır, su banyosundan çıkarılıp kurulanır ve tartılır. Tartım kaydedilir (D).
- Elde edilen ölçüm değerleri ile fillere ait zahiri özgül ağırlık aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

Çalışmada, fillere ait zahiri özgül ağırlık yukarıda belirtilen koşullarda yapılan ölçümler sonucu elde edilen değerlerle hesaplanmıştır.

EK-1 (Devam) Agrega ve bitüm özgül ağırlık tayini

Bitümün özgül ağırlık tayini

- Özgül ağırlık şişesi ve kapağı tartılır, tartım kaydedilir (A).
- Şişe, damıtık veya kaynatılıp soğutulmuş su ile ağzına kadar doldurulur, $25\pm0,1^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosunda en az 1 saat bekletilir, kapağı kapatılır, su banyosundan çıkarılıp kurulanır ve hemen tartılır. Tartım kaydedilir (B).
- Bitüm, etüvde ısıtılarak akıcı hale getirilir. Özgül ağırlık şişesi ve kapağı kurutulur. Bitüm, şişenin 1/3'ü dolacak şekilde şişeye boşaltılır, şişenin kapağı kapatılıp tartılır. Tartım kaydedilir (C).
- Ardından özgül ağırlık şişesi yarısına kadar su ile doldurulur, kapağı kapatılıp içindeki hava çıkartılır (birkaç kez yavaşça şişeyi tezgaha vurup en az 5 dakika bir vakum desikatör içinde veya su trombu ile düşürülmüş basınca maruz bırakılarak). Bu işleme hava kabarcığı kalmayana kadar devam edilir.
- Daha sonra özgül ağırlık şişesi tamamen su ile doldurulup $25\pm0,1^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosunda en az 1 saat bekletilir. Kapağı kapatılır, su banyosundan çıkarılıp kurulanır ve tartılır. Tartım kaydedilir (D).
- Elde edilen ölçüm değerleri ile bitüme ait özgül ağırlık aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$\circ \text{ Özgül Ağırlık} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

Çalışmada, orijinal bitümün özgül ağırlığı yukarıda belirtilen koşullarda yapılan ölçümler sonucu elde edilen değerlerle hesaplanmıştır.

EK-2 Viskozite test cihazı



Resim 2.1. Brookfield DV III Ultra Marka programlanabilir viskozimetre



Resim 2.2. Brookfield DV III Ultra Marka programlanabilir viskozimetre

EK-3 Briket yüksekliğine bağlı düzeltme faktörleri

Çizelge 3.1. Briket yüksekliğine bağlı düzeltme faktörleri

Boy	Katsayı	Boy	Katsayı	Boy	Katsayı	Boy	Katsayı
51	1,46	55,3	1,263	59,6	1,112	63,9	0,99
51,1	1,455	55,4	1,259	59,7	1,109	64	0,988
51,2	1,45	55,5	1,254	59,8	1,106	64,1	0,985
51,3	1,445	55,6	1,25	59,9	1,103	64,2	0,983
51,4	1,44	55,7	1,246	60	1,099	64,3	0,98
51,5	1,435	55,8	1,243	60,1	1,096	64,4	0,978
51,6	1,43	55,9	1,239	60,2	1,093	64,5	0,975
51,7	1,425	56	1,235	60,3	1,09	64,6	0,973
51,8	1,42	56,1	1,231	60,4	1,087	64,7	0,97
51,9	1,415	56,2	1,228	60,5	1,084	64,8	0,968
52	1,41	56,3	1,224	60,6	1,081	65	0,963
52,1	1,405	56,4	1,22	60,7	1,078	65,1	0,96
52,2	1,4	56,5	1,216	60,8	1,074	65,2	0,958
52,3	1,395	56,6	1,213	60,9	1,071	65,3	0,956
52,4	1,39	56,7	1,209	61	1,068	65,4	0,954
52,5	1,386	56,8	1,205	61,1	1,065	65,5	0,953
52,6	1,381	56,9	1,201	61,2	1,062	65,6	0,951
52,7	1,377	57	1,198	61,3	1,059	65,7	0,949
52,8	1,373	57,1	1,194	61,4	1,056	65,8	0,947
52,9	1,368	57,2	1,19	61,5	1,053	65,9	0,945
53	1,364	57,3	1,187	61,6	1,049	66	0,943
53,1	1,359	57,4	1,184	61,7	1,046	66,1	0,941
53,2	1,355	57,5	1,181	61,8	1,043	66,2	0,939
53,3	1,351	57,6	1,178	61,9	1,04	66,3	0,938
53,4	1,346	57,7	1,174	62	1,038	66,4	0,936
53,5	1,342	57,8	1,171	62,1	1,035	66,5	0,934
53,6	1,338	57,9	1,168	62,2	1,033	66,6	0,932
53,7	1,333	58	1,165	62,3	1,03	66,7	0,93
53,8	1,329	58,1	1,162	62,4	1,028	66,8	0,928
53,9	1,324	58,2	1,159	62,5	1,025	66,9	0,925
54	1,32	58,3	1,156	62,6	1,023	67	0,923
54,1	1,316	58,4	1,153	62,7	1,02	67,1	0,92
54,2	1,311	58,5	1,149	62,8	1,018	67,2	0,918
54,3	1,307	58,6	1,146	62,9	1,015	67,3	0,915
54,4	1,303	58,7	1,143	63	1,013	67,4	0,913
54,5	1,298	58,8	1,137	63,1	1,01	67,5	0,91
54,6	1,294	58,9	1,134	63,2	1,008	67,6	0,908
54,7	1,289	59	1,131	63,3	1,005	67,7	0,905
54,8	1,285	59,1	1,128	63,4	1,003	67,8	0,903
54,9	1,281	59,2	1,124	63,5	1	67,9	0,9
55	1,276	59,3	1,121	63,6	0,998	68	0,898
55,1	1,272	59,4	1,118	63,7	0,995	68,1	0,895
55,2	1,268	59,5	1,115	63,8	0,993	68,2	0,893

EK-4 Briket hacmine bağı düzeltme faktörleri

Çizelge 4.1. Briket hacmine bağı düzeltme faktörleri

Briket Hacmi (cm ³)	Düzeltilme Faktörü
277-289	3,33
290-301	3,03
302-316	2,78
317-328	2,5
329-340	2,27
341-353	2,08
354-367	1,92
368-379	1,79
380-392	1,67
393-405	1,56
406-420	1,47
421-431	1,39
432-443	1,32
444-456	1,25
457-470	1,19
471-482	1,14
483-495	1,09
496-508	1,04
509-522	1,00
523-535	0,96
536-546	0,93
547-559	0,89
560-573	0,86
574-585	0,83
586-598	0,81
599-610	0,78
611-625	0,76

EK-5 Marshall briketleri



Resim 5.1. Marshall briketlerine ait örnekler

EK-6 Yumuşama noktası ve düktilite ölçümleri



Resim 6.1. Yumuşama noktası ölçümü

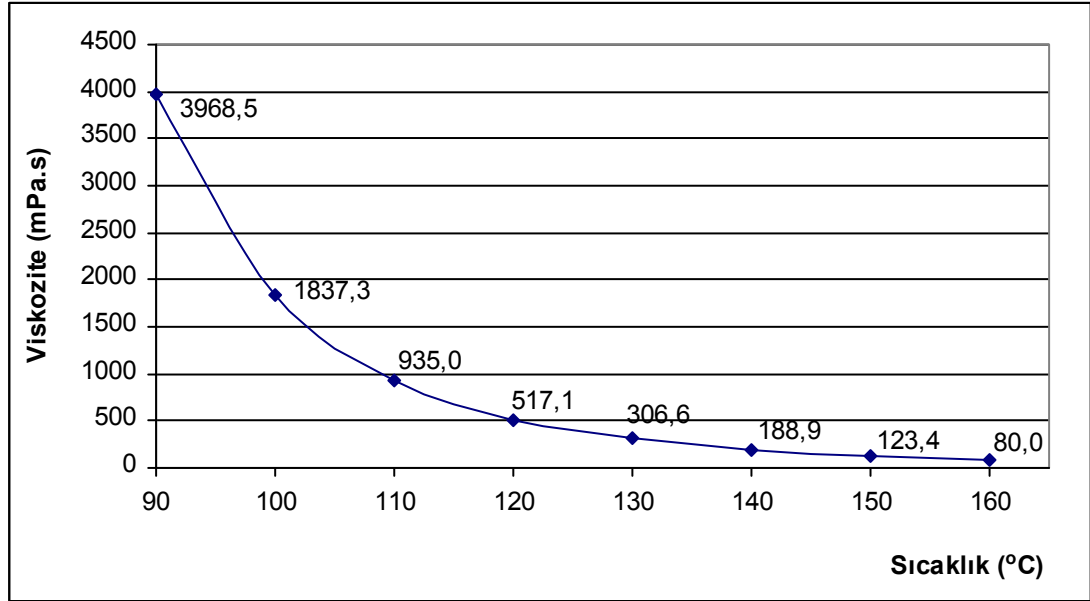


Resim 6.2. Düktilite ölçümü

EK-7A Organik esaslı magnezyum bileşiği (OEMAGB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 7.1. %1 OEMAGB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)								Ortalama viskozite (mPa.s)
160	80	80	80	80	80				80,0
150	126,7	126,7	126,7	126,7	120	120	120	120	123,4
140	193,3	190	186,7	190	186,7	186,7			188,9
130	310	306,7	306,7	303					306,6
120	520	520	515	513,3					517,1
110	946,7	933,3	920	940					935,0
100	1863	1833	1820	1833					1837,3
90	4047	3960	3927	3940					3968,5

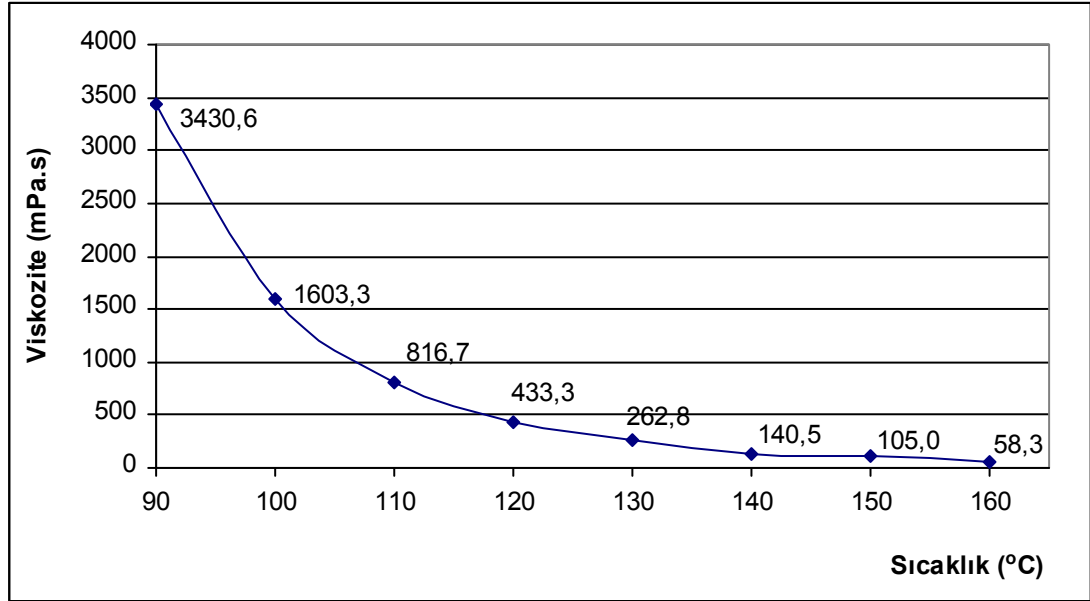


Şekil 7.1. %1 OEMAGB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-7A (Devam) Organik esaslı magnezyum bileşiği (OEMAGB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 7.2. %2 OEMAGB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama viskozite (mPa.s)
160	53,33	53,33	60	66,67		58,3
150	106,7	106,7	86,67	120		105,0
140	153,3	133,3	135			140,5
130	275	253,3	260			262,8
120	440	413,3	446,7			433,3
110	806,7	826,7				816,7
100	1687	1603	1573	1550		1603,3
90	3553	3450	3350	3440	3360	3430,6

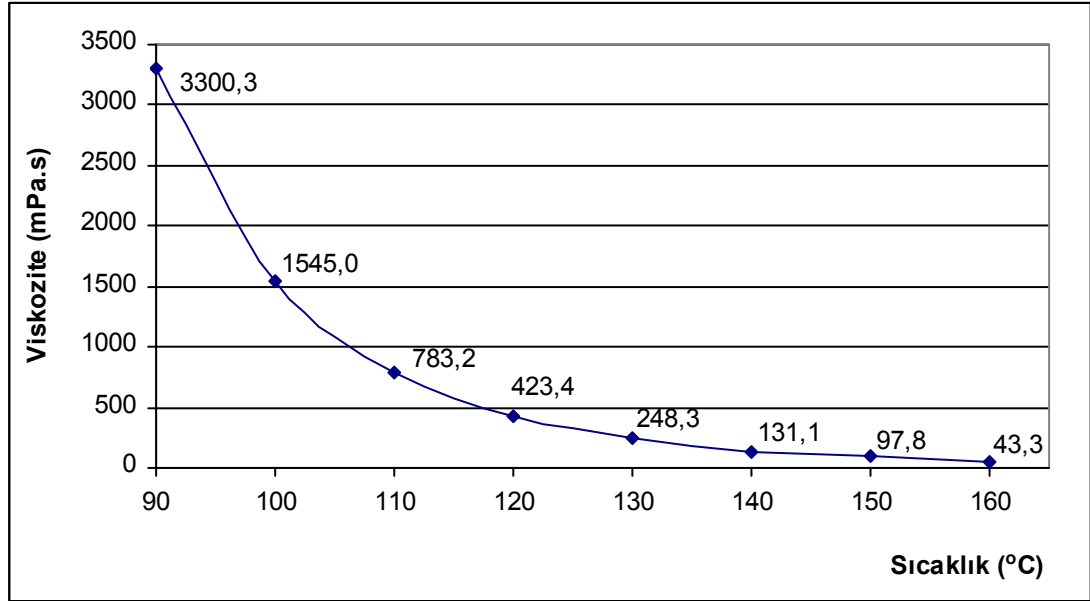


Şekil 7.2. %2 OEMAGB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-7A (Devam) Organik esaslı magnezyum bileşiği (OEMAGB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 7.3. %3 OEMAGB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)				Ortalama viskozite (mPa.s)
160	46,67	46,67	40	40	43,3
150	100	86,67	106,7		97,8
140	133,3	126,7	133,3		131,1
130	260	253,3	233,3	246,7	248,3
120	420	406,7	440	426,7	423,4
110	783	793,3	773,3		783,2
100	1553	1560	1480	1587	1545,0
90	3227	3367	3307		3300,3

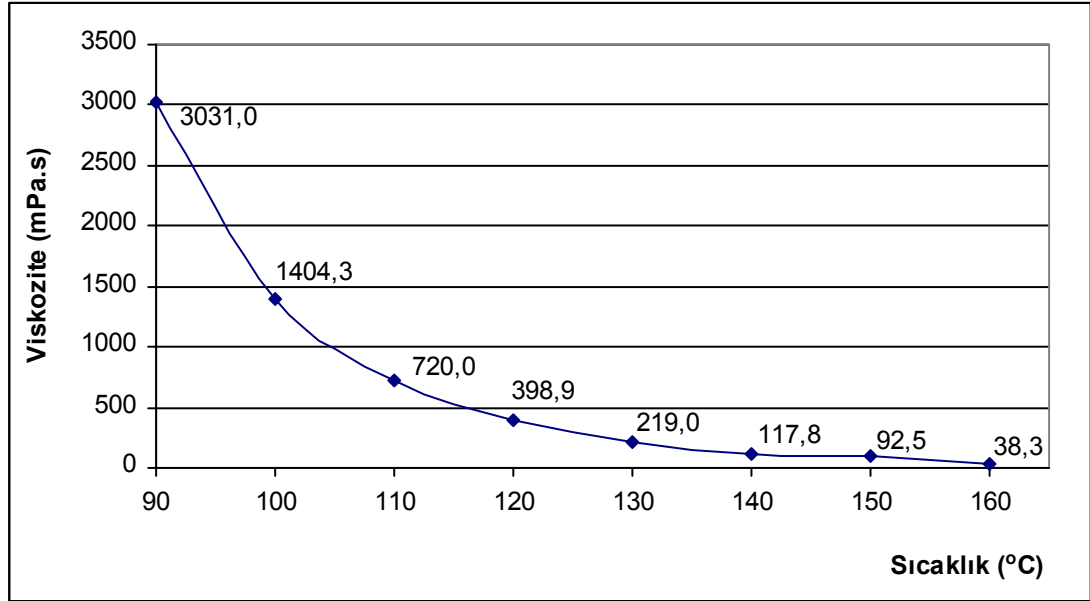


Şekil 7.3. %3 OEMAGB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-7A (Devam) Organik esaslı magnezyum bileşiği (OEMAGB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 7.4. %5 OEMAGB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)						Ortalama viskozite (mPa.s)
160	46,67	40	33,33	33,33			38,3
150	106,7	86,67	90	86,67			92,5
140	113,3	120	120				117,8
130	226,7	215	226,7	213,3	213,3		219
120	426,7	400	413,3	386,7	366,7	400	398,9
110	720	713,3	726,7	720			720,0
100	1420	1393	1400				1404,3
90	3087	3033	2973				3031,0

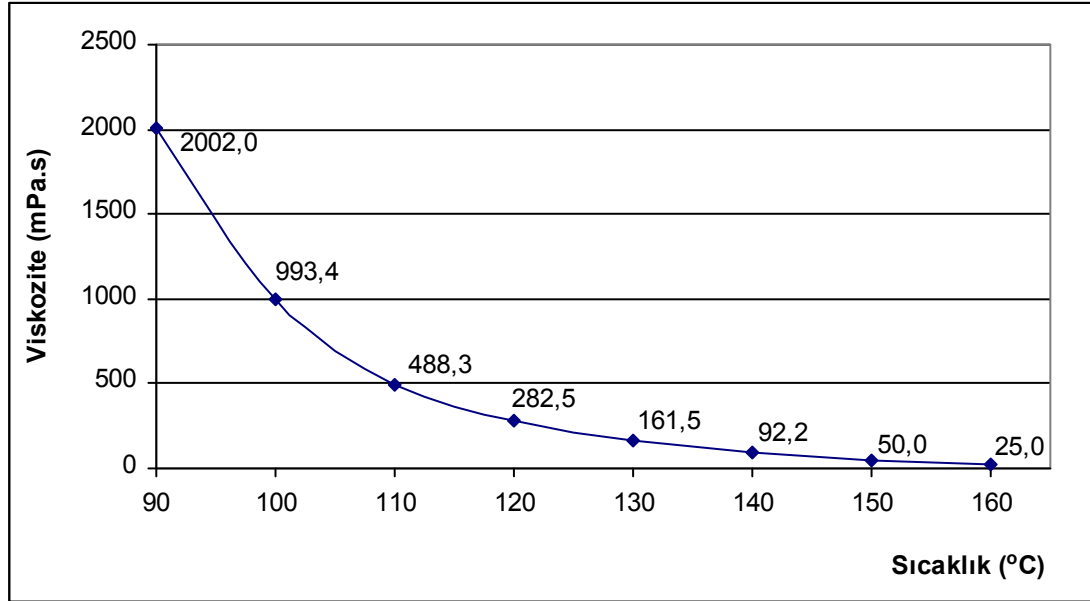


Şekil 7.4. %5 OEMAGB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-7A (Devam) Organik esaslı magnezyum bileşiği (OEMAGB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

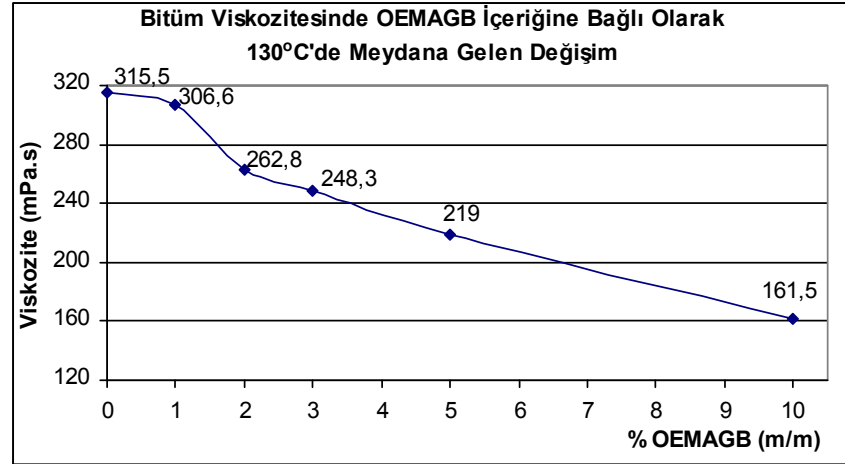
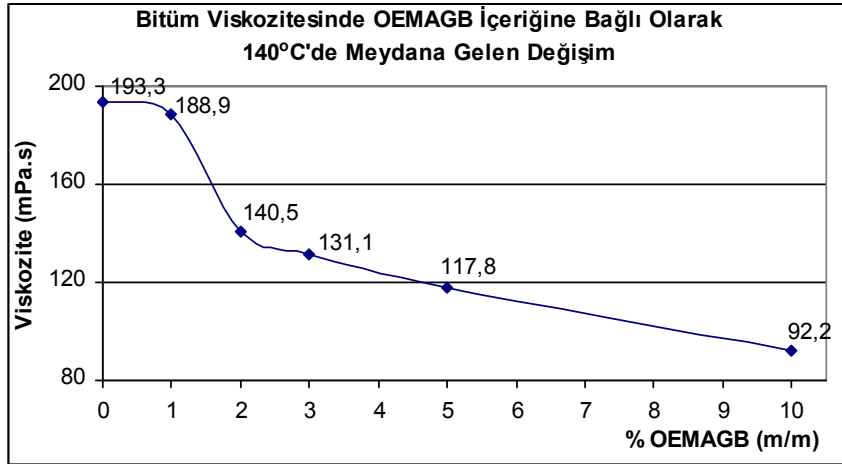
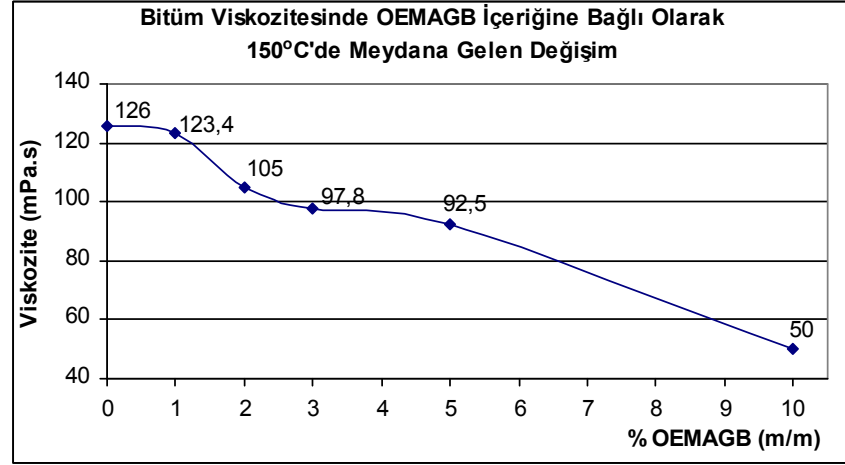
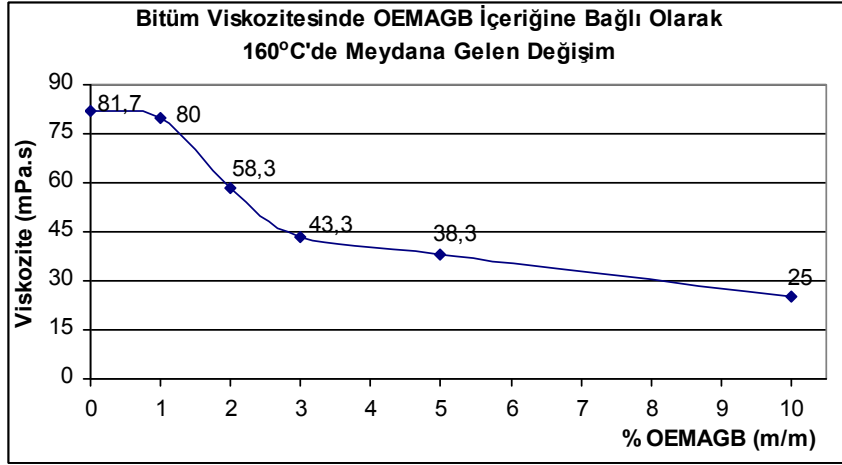
Çizelge 7.5. %10 OEMAGB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama viskozite (mPa.s)
160	26,67	33,33	20	20		25,0
150	46,67	53,33	46,67	53,33		50,0
140	90	100	86,67			92,2
130	163	173,3	143	166,7		161,5
120	283	313,3	266,7	246,7	303	282,5
110	526,7	493,3	493,3	440		488,3
100	1027	1013	1007	926,7		993,4
90	2053	1973	1980			2002,0

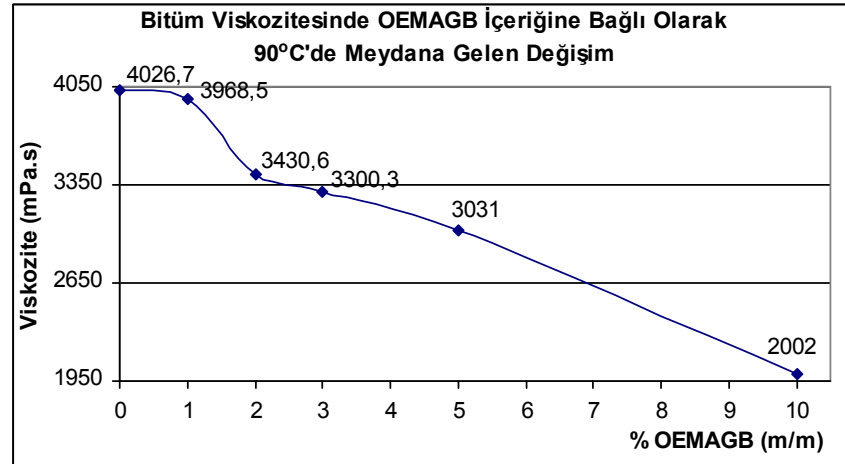
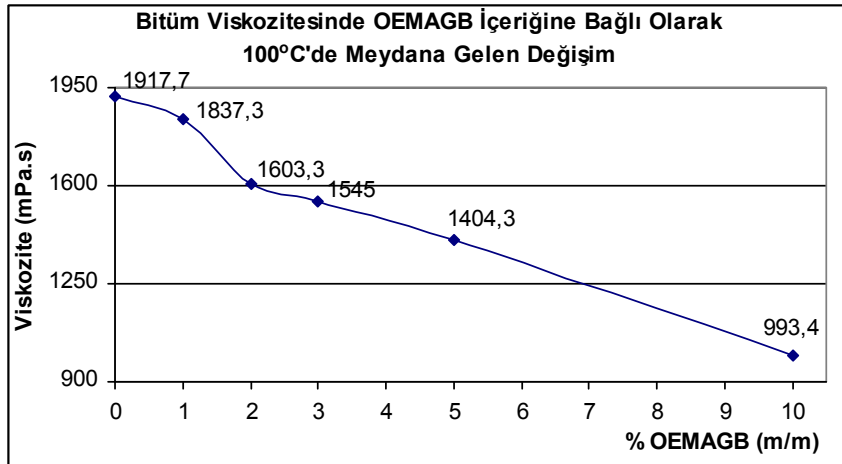
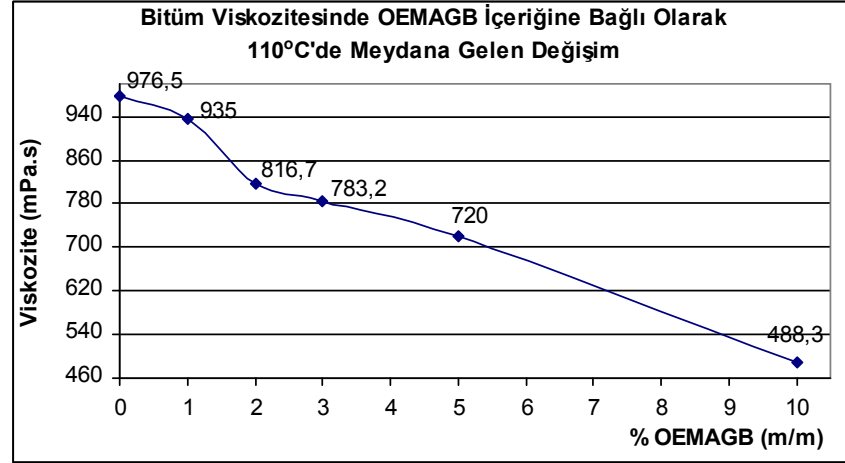
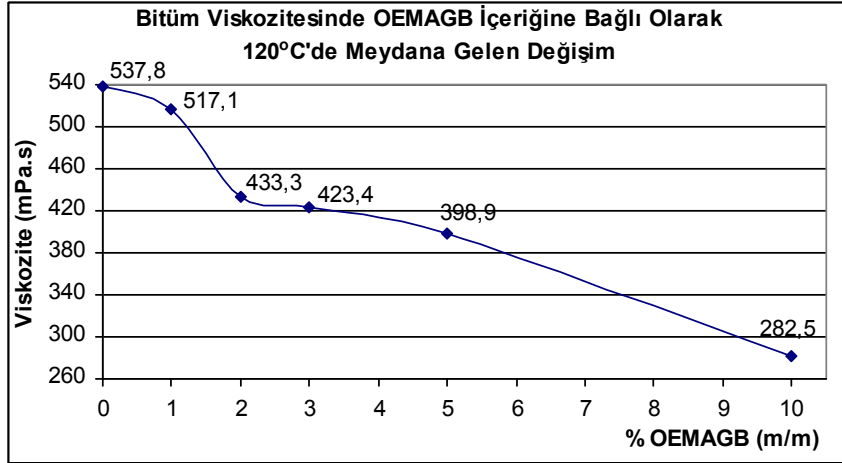


Şekil 7.5. %10 OEMAGB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-7B OEMAGB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



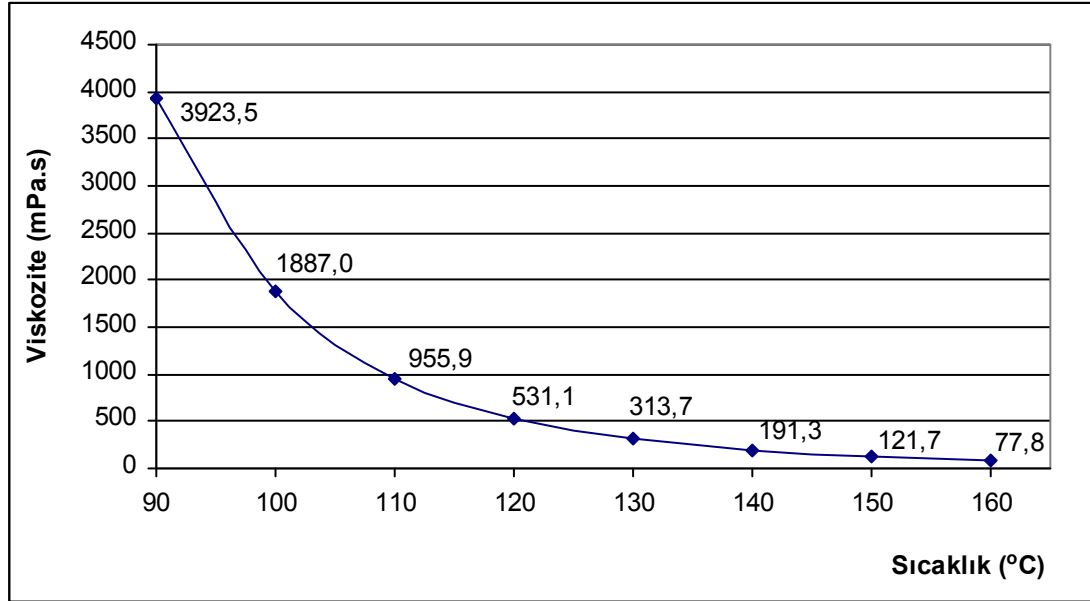
EK-7B (Devam) OEMAGB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



EK-8A Organik esaslı borik asit bileşği (OEBAB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 8.1. %1 OEBAB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)									Ortalama viskozite (mPa.s)
160	80	80	73,33	73,33	73,33	86,67				77,8
150	126,7	120	120	120						121,7
140	200	186,7	193,3	190	186,7					191,3
130	326,7	315	300	313,3	313,3					313,7
120	533,3	526,7	533,3							531,1
110	973,3	966,7	946,7	950	953,3	960	953,3	940	960	955,9
100	1895	1913	1893	1867	1867					1887
90	3967	3887	3927	3913						3923,5

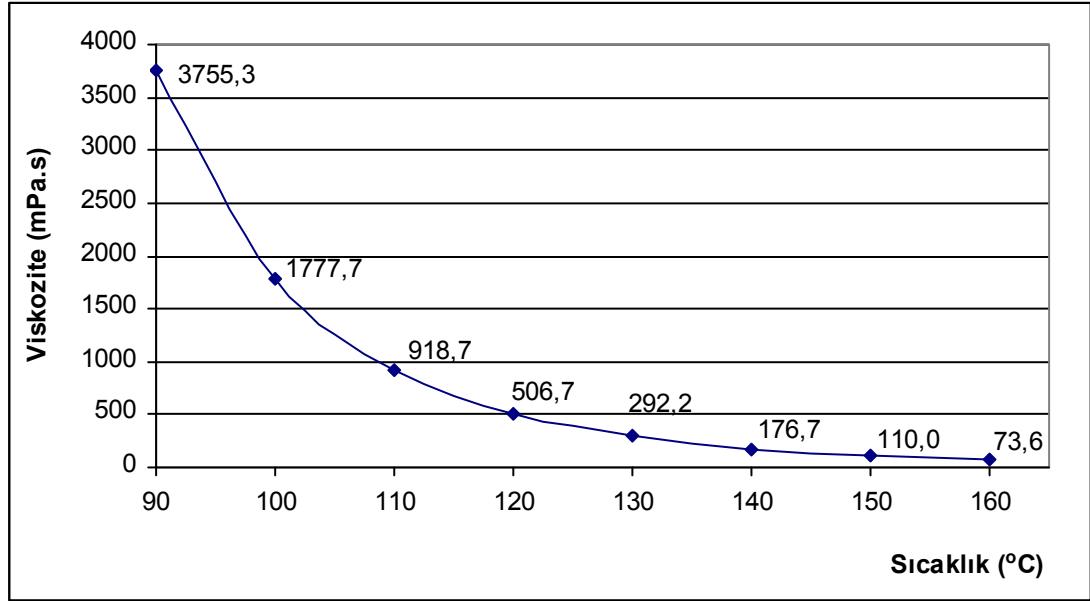


Şekil 8.1. %1 OEBAB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-8A (Devam) Organik esaslı borik asit bileşigi (OEBAB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 8.2. %2 OEBAB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)							Ortalama viskozite (mPa.s)
160	66,67	73,33	75	75	70	80	75	73,6
150	120	113,3	106,7	110	106,7	106,7	106,7	110,0
140	180	173,3	180	173,3				176,7
130	295	295	290	293,3	286,7	293,3		292,2
120	513,3	506,7	506,7	506,7	500			506,7
110	933,3	926,7	913,3	906,7	913,3			918,7
100	1787	1773	1773					1777,7
90	3773	3773	3720					3755,3

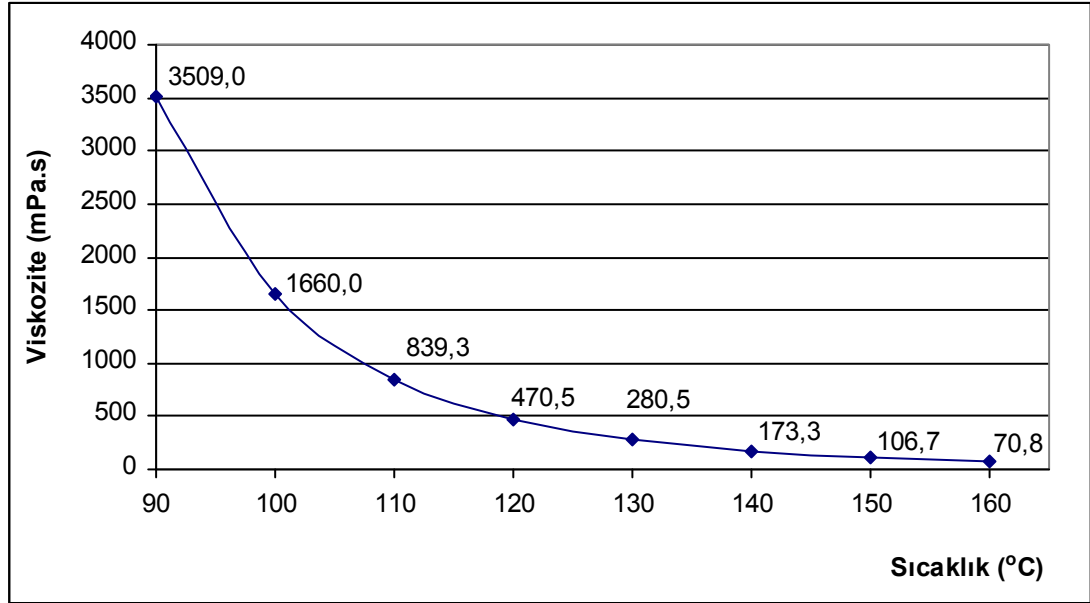


Şekil 8.2. %2 OEBAB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-8A (Devam) Organik esaslı borik asit bileşiği (OEBAB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 8.3. %3 OEBAB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)									Ortalama viskozite (mPa.s)
160	73,33	73,33	66,67	66,67	70	75				70,8
150	106,7	106,7	106,7	106,7	106,7					106,7
140	173,3	173,3	173,3	173,3	173,3					173,3
130	283	280	280	280	280	280				280,5
120	486,7	473,3	473,3	473,3	460	460	466,7			470,5
110	820	813,3	826,7	840	840	853,3	853,3	860	846,7	839,3
100	1673	1667	1640							1660,0
90	3507	3513	3507							3509,0

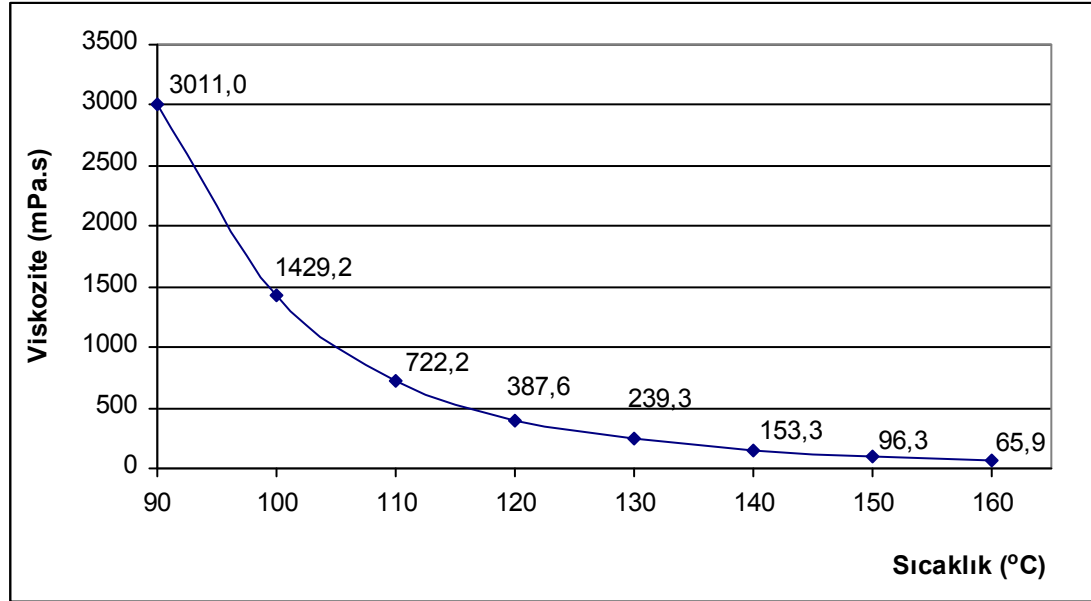


Şekil 8.3. %3 OEBAB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-8A (Devam) Organik esaslı borik asit bileşiği (OEBAB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 8.4. %5 OEBAB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)							Ortalama viskozite (mPa.s)
160	66,67	70	66,67	63	63			65,9
150	100	95	100	93,33	93,33			96,3
140	160	153,3	150	150				153,3
130	250	246,7	226,7	240	233,3			239,3
120	366,7	346,7	413,3	413,3	393,3	386,7	393,3	387,6
110	726,7	693,3	706,7	740	740	726,7		722,2
100	1513	1420	1400	1400	1413			1429,2
90	3020	2993	3020					3011,0

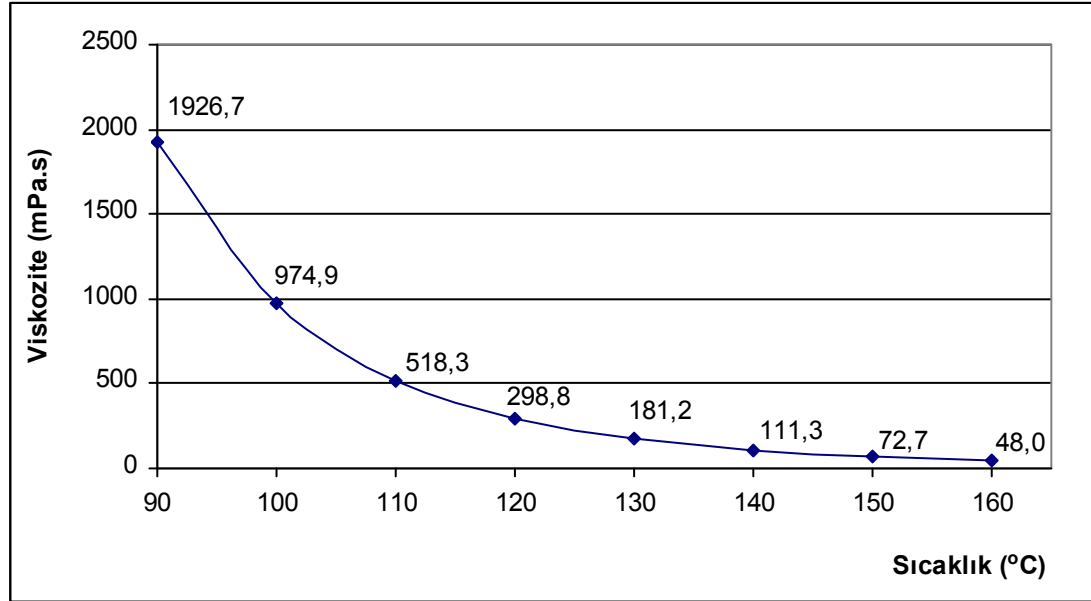


Şekil 8.4. %5 OEBAB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-8A (Devam) Organik esaslı borik asit bileşiği (OEBAB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

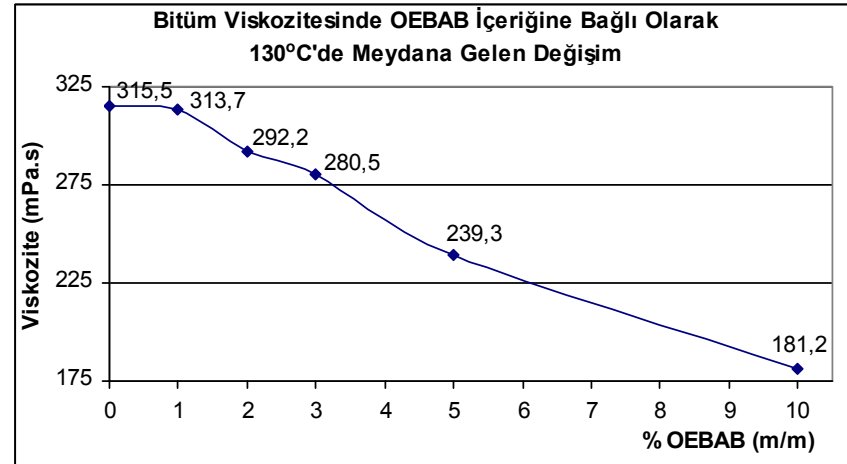
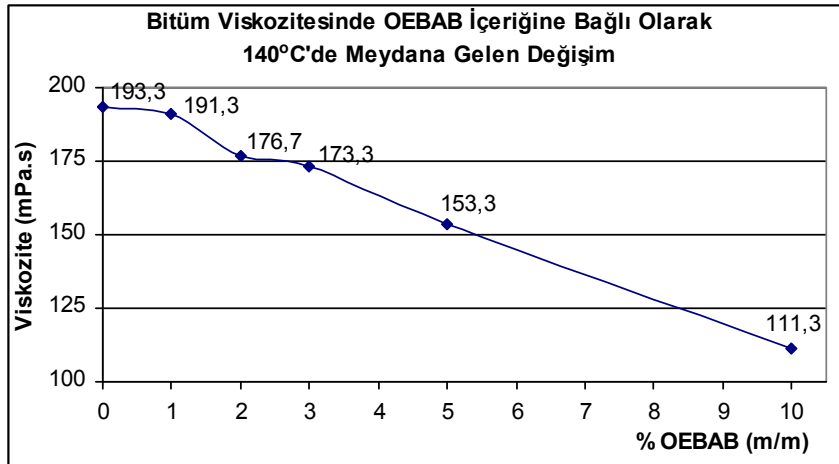
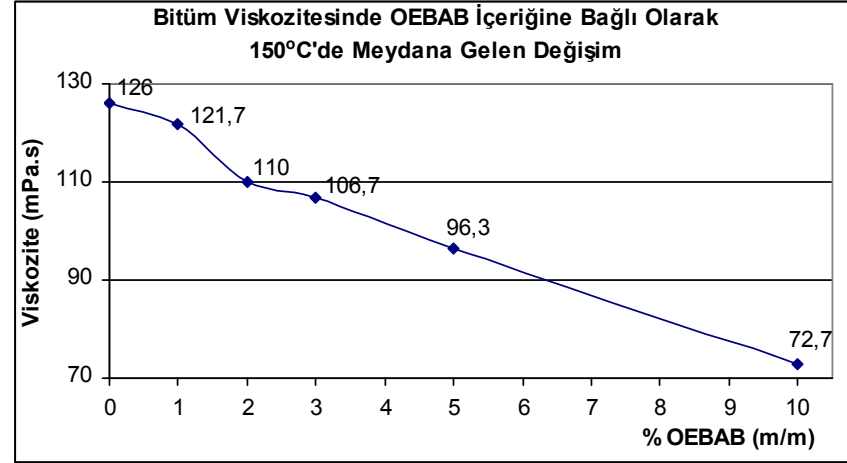
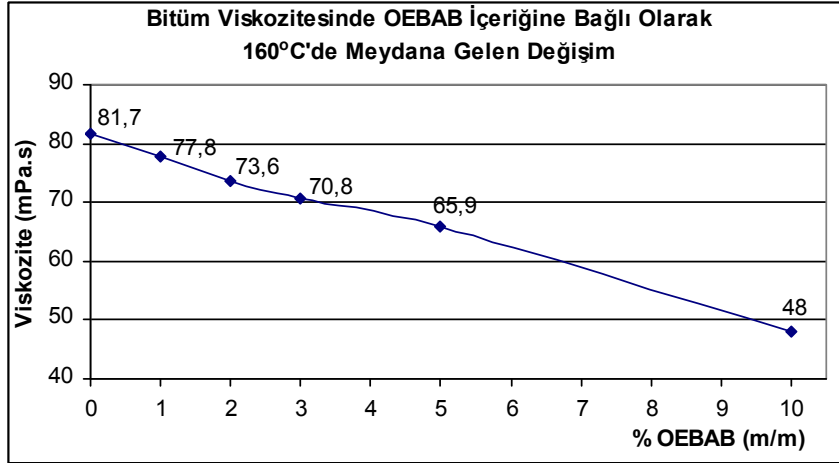
Çizelge 8.5. %10 OEBAB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama viskozite (mPa.s)
160	50	46,67	50	46,67	46,67	48,0
150	73,33	73,33	73,33	73,33	70	72,7
140	126,7	106,7	100	110	113,3	111,3
130	183	180	175	186,7		181,2
120	300	295	300	300		298,8
110	523	515	515	520		518,3
100	983	975	966,7			974,9
90	1947	1920	1913			1926,7

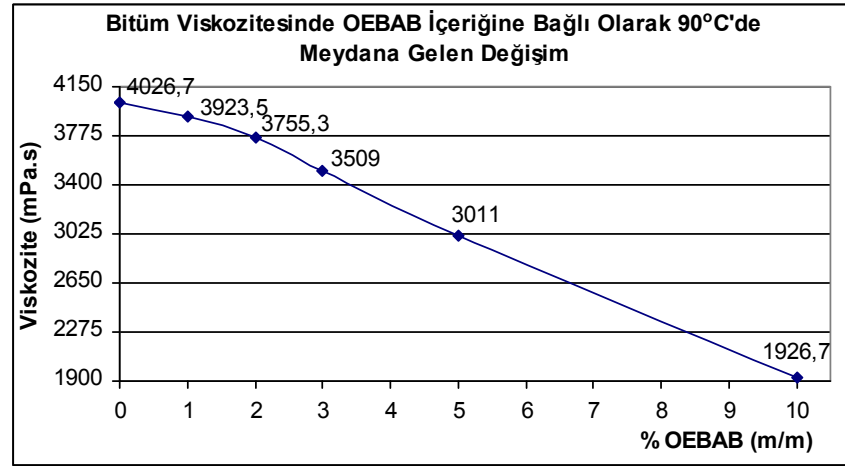
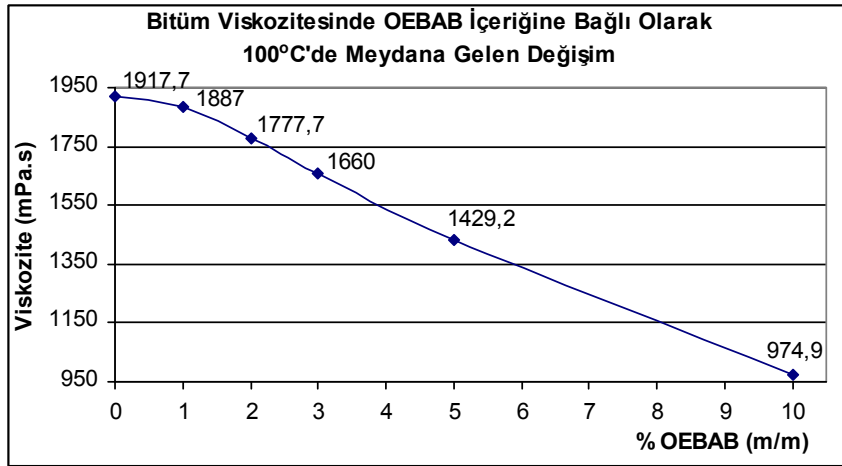
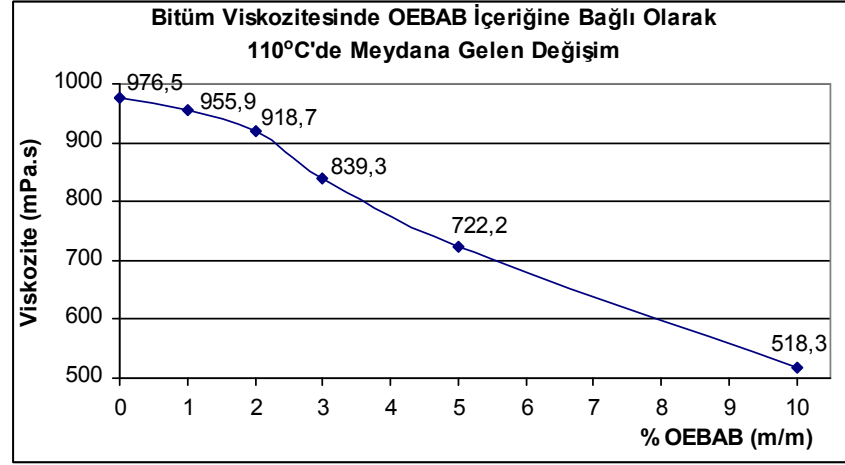
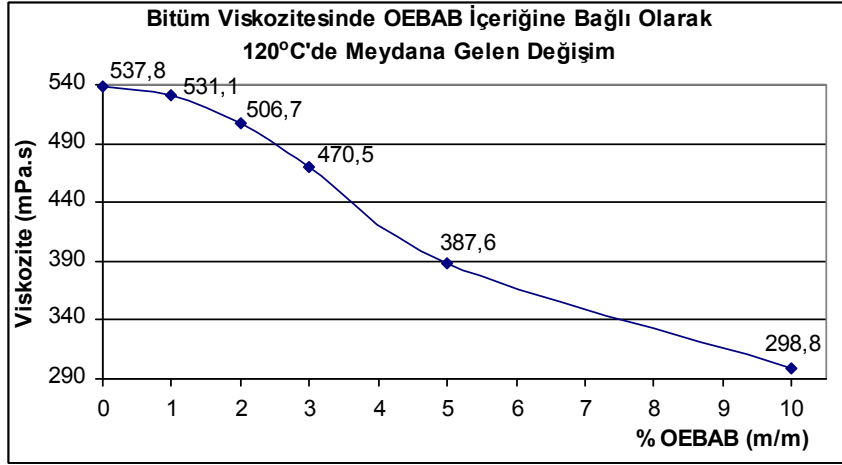


Şekil 8.5. %10 OEBAB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-8B OEABAB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



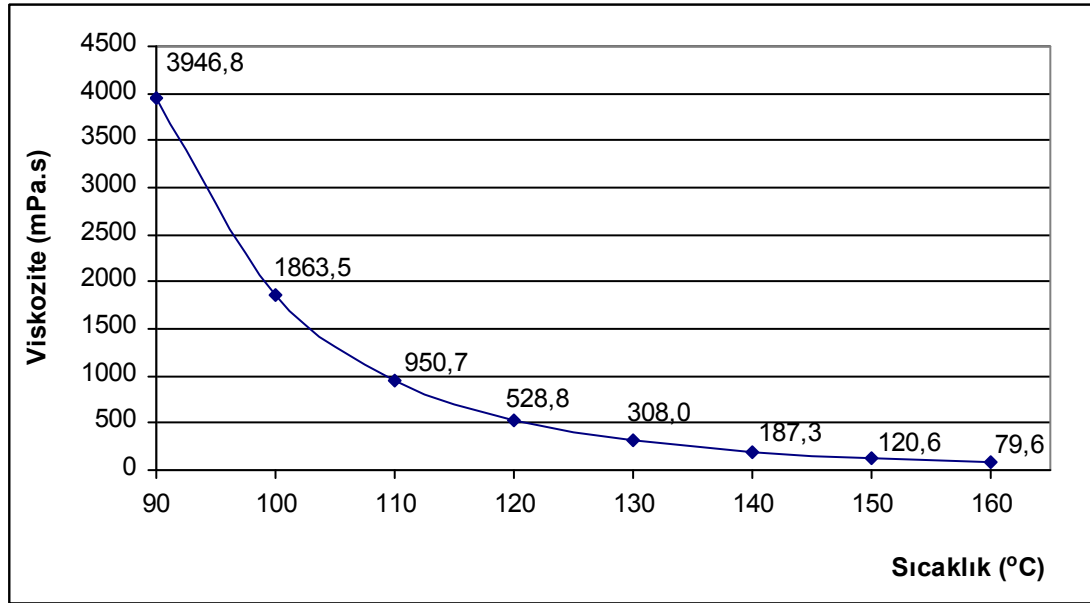
EK-8B (Devam) OEBAB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



EK-9A Organik esaslı mangan bileşiği (OEMANB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 9.1. %1 OEMANB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama viskozite (mPa.s)
160	80	75	80	80	83	79,6
150	120	123	120	120	120	120,6
140	193,3	186,7	186,7	186,7	183	187,3
130	320	306,7	306,7	300	306,7	308,0
120	535	526,7	526,7	526,7		528,8
110	953,3	946,7	953,3	960	940	950,7
100	1880	1867	1867	1840		1863,5
90	3947	3973	3940	3927		3946,8

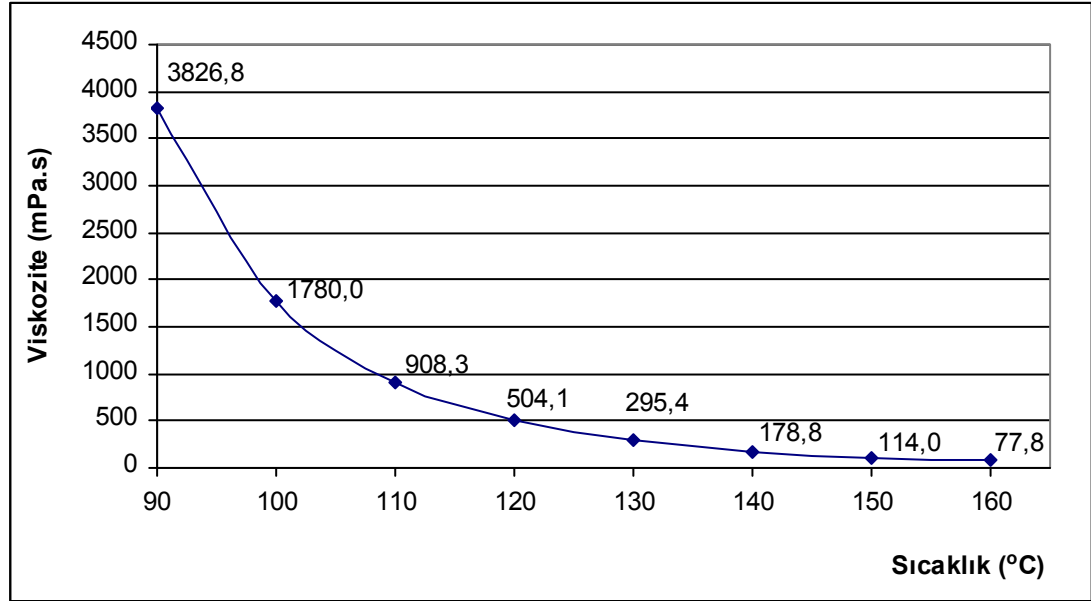


Şekil 9.1. %1 OEMANB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

Ek-9A (Devam) Organik esaslı mangan bileşiği (OEMANB) katkılı bitümlerin
viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 9.2. %2 OEMANB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama viskozite (mPa.s)
160	80	73,33	80			77,8
150	113,3	113,3	113,3	120	110	114,0
140	180	180	180	175		178,8
130	300	295	293,3	293,3		295,4
120	506,7	506,7	500	503		504,1
110	900	913,3	906,7	913,3		908,3
100	1800	1780	1760			1780,0
90	3867	3780	3840	3820		3826,8

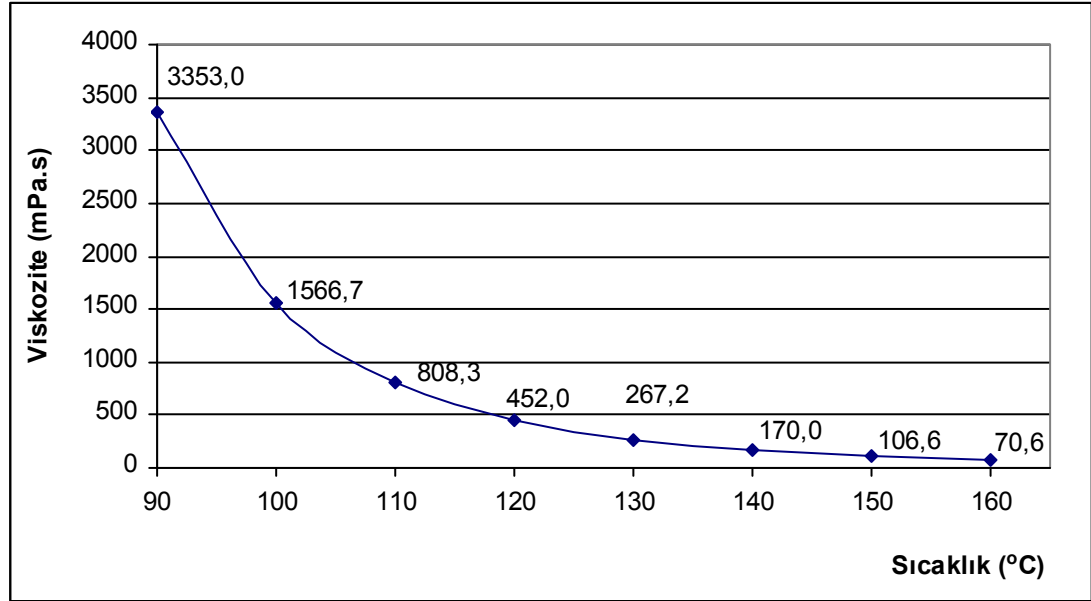


Şekil 9.2. %2 OEMANB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-9A (Devam) Organik esaslı mangan bileşği (OEMANB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 9.3. %3 OEMANB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)						Ortalama viskozite (mPa.s)
160	73,33	73,33	66,67	73,33	66,67	70	70,6
150	106,7	110	106,7	103	106,7		106,6
140	173,3	166,7	166,7	173,3			170,0
130	273,3	266,7	266,7	266,7	270	260	267,2
120	450	450	446,7	453,3	460		452,0
110	813,3	806,7	795	813,3	813,3		808,3
100	1553	1580	1567				1566,7
90	3393	3353	3313				3353,0

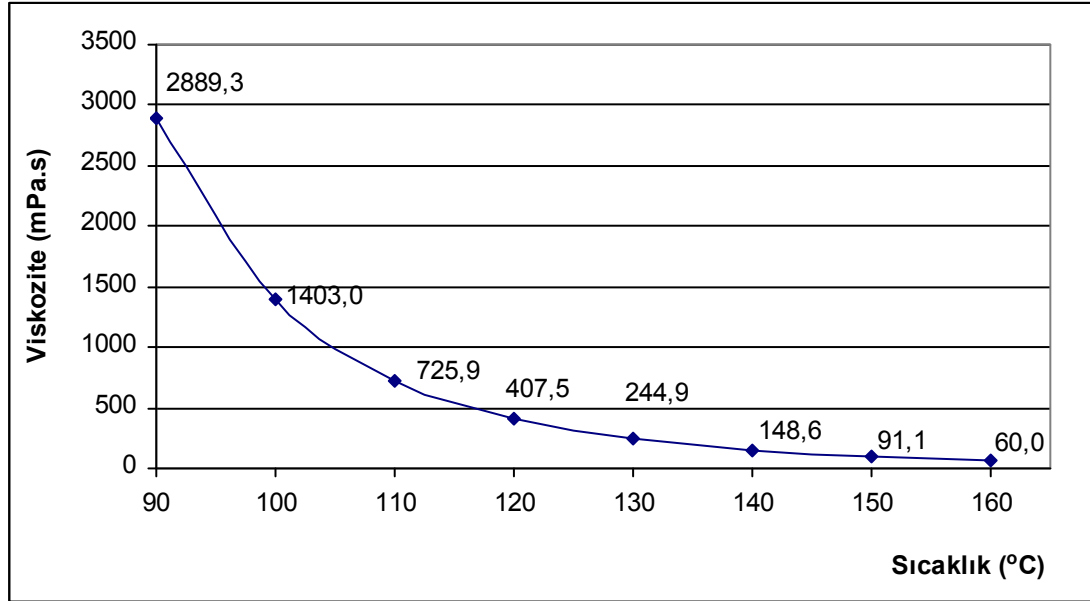


Şekil 9.3. %3 OEMANB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-9A (Devam) Organik esaslı mangan bileşği (OEMANB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 9.4. %5 OEMANB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)						Ortalama viskozite (mPa.s)
160	60	60	60	60	60		60,0
150	86,67	93,33	93,33	86,67	93,33	93,33	91,1
140	146,7	146,7	153,3	143	153,3		148,6
130	250	243	240	246,7			244,9
120	410	406,7	406,7	406,7			407,5
110	740	720	720	726,7	723		725,9
100	1427	1407	1395	1393	1393		1403,0
90	2927	2890	2887	2853			2889,3

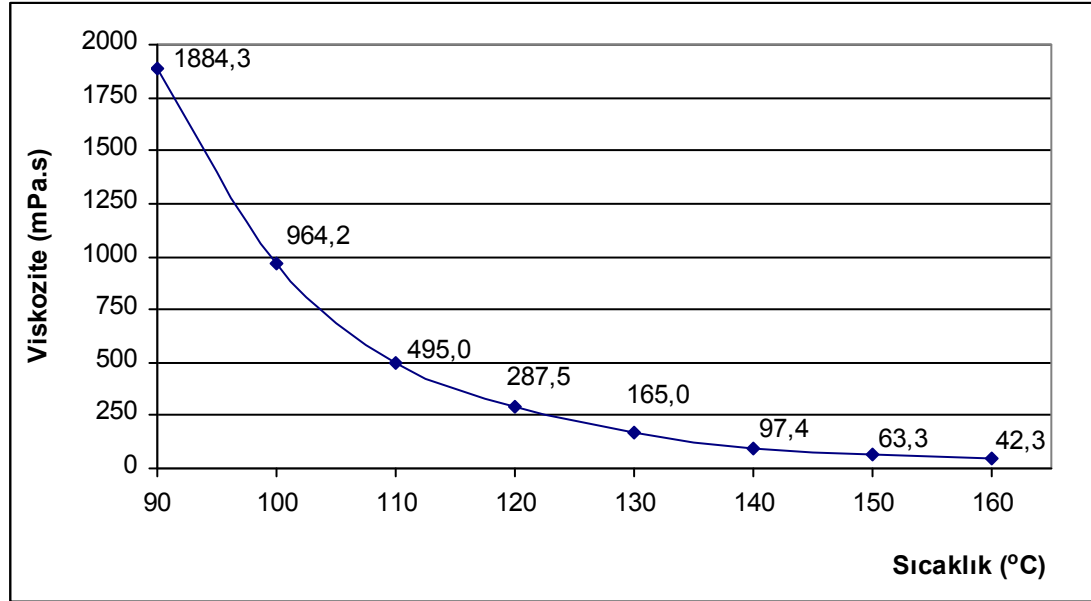


Şekil 9.4. %5 OEMANB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-9A (Devam) Organik esaslı mangan bileşiği (OEMANB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

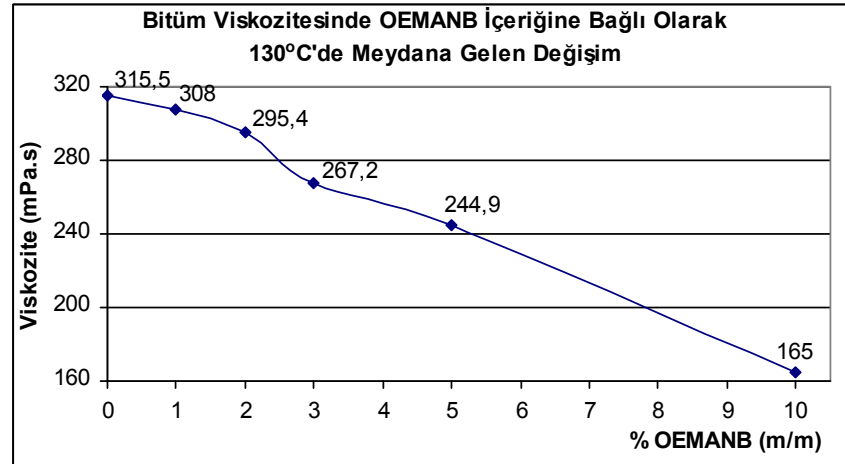
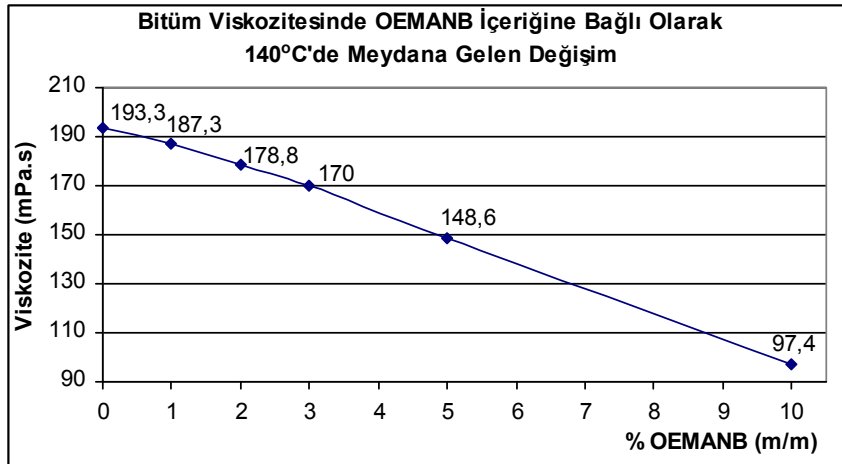
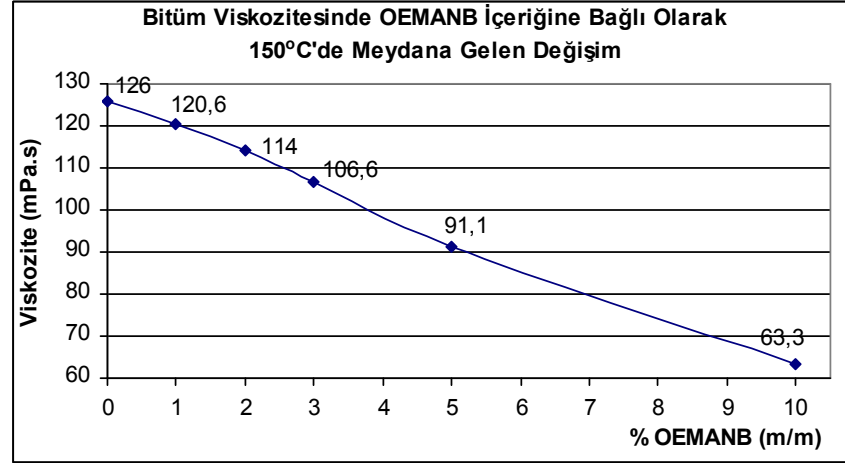
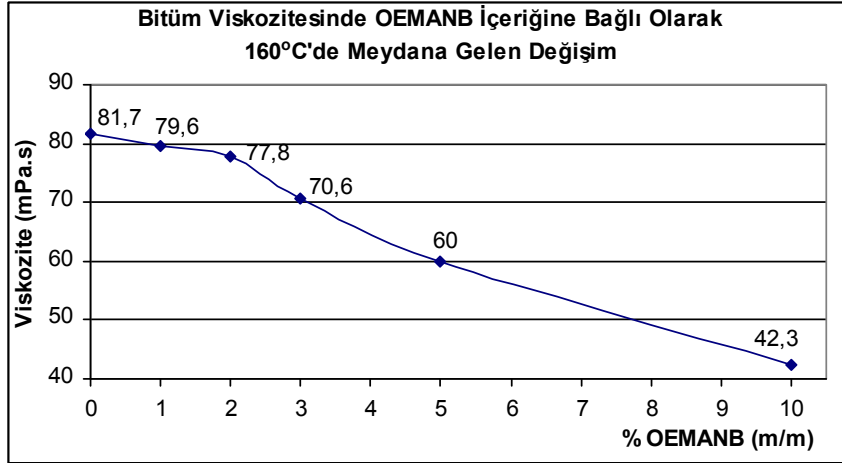
Çizelge 9.5. %10 OEMANB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)							Ortalama viskozite (mPa.s)
160	40	46,67	43	46,67	40	40	40	42,3
150	60	66,67	60	66,67				63,3
140	100	103	100	95	93,33	93,33		97,4
130	160	166,67	160	173,3				165,0
120	286,7	286,7	286,7	290				287,5
110	506,7	493,3	493,3	486,7				495,0
100	963	966,7	963					964,2
90	1940	1873	1840					1884,3

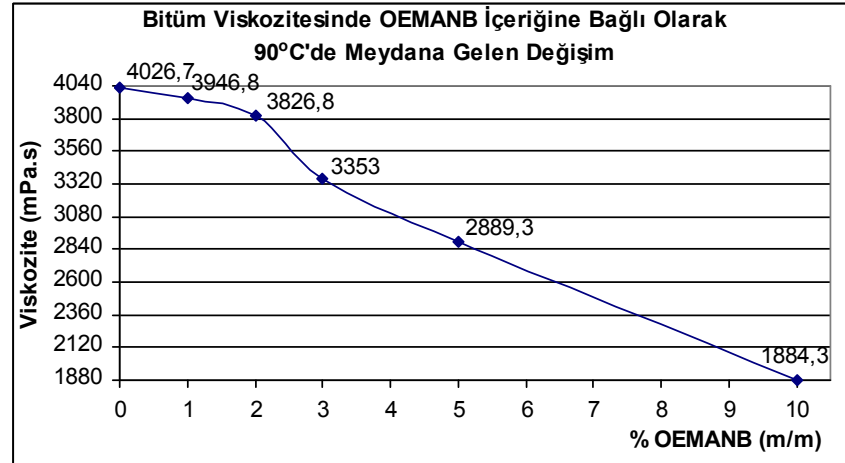
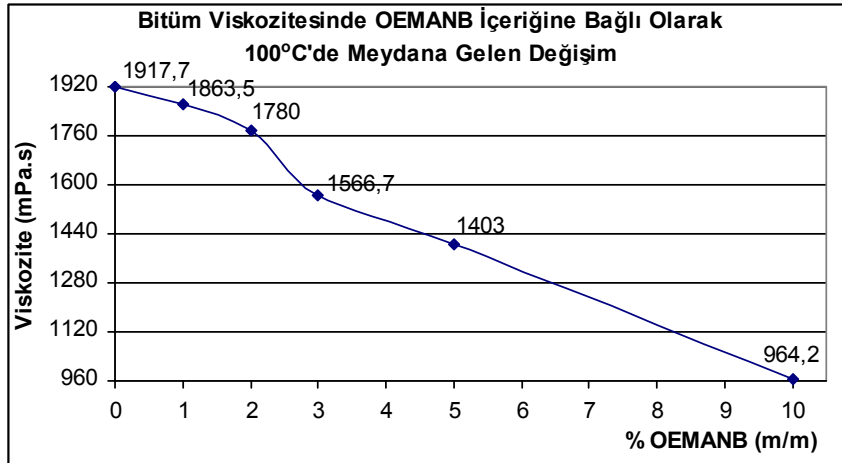
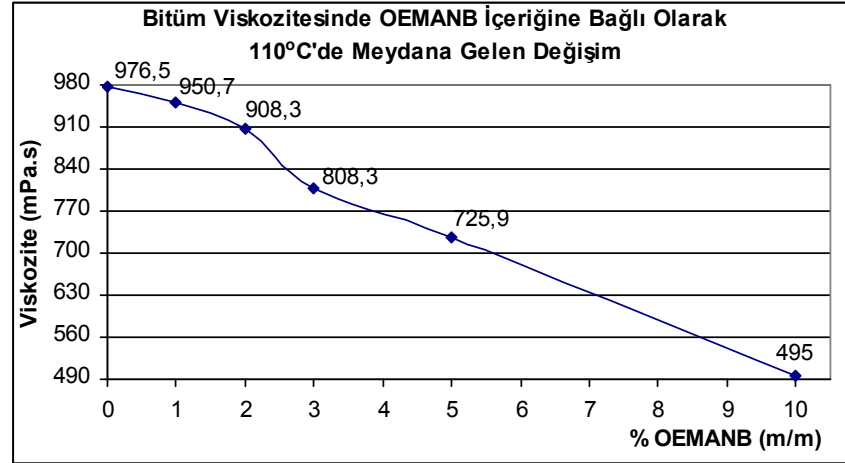
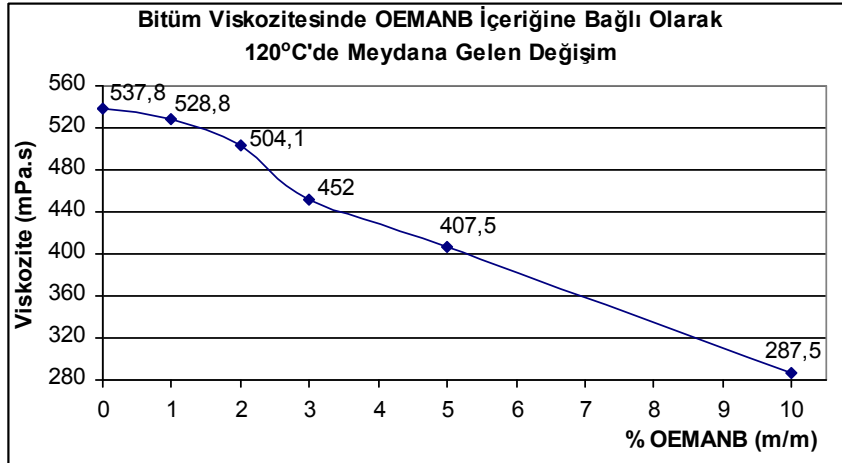


Şekil 9.5. %10 OEMANB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-9B OEMANB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



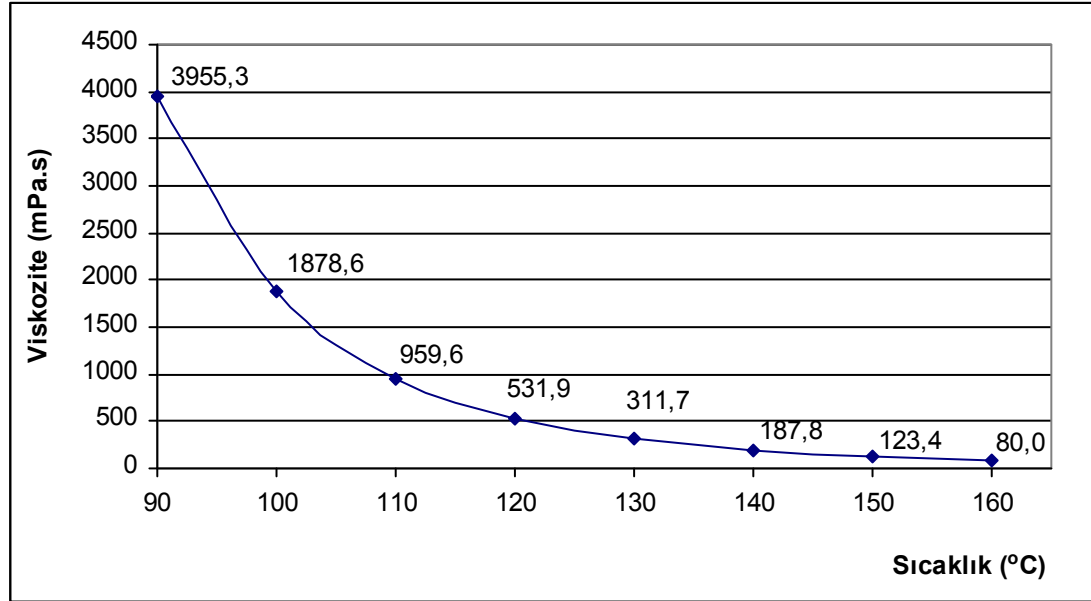
Ek-9B (Devam) OEMANB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



EK-10A Organik esaslı çinko bileşiği (OEÇB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 10.1. %1 OEÇB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)						Ortalama viskozite (mPa.s)
160	80	80	80				80,0
150	126,7	120	120	126,7			123,4
140	186,7	186,7	190				187,8
130	306,7	313,3	313,3	313,3			311,7
120	526,7	533,3	530	535	533,3	533,3	531,9
110	955	966,7	953,3	963	960		959,6
100	1920	1900	1880	1893	1800		1878,6
90	3953	3973	3940				3955,3

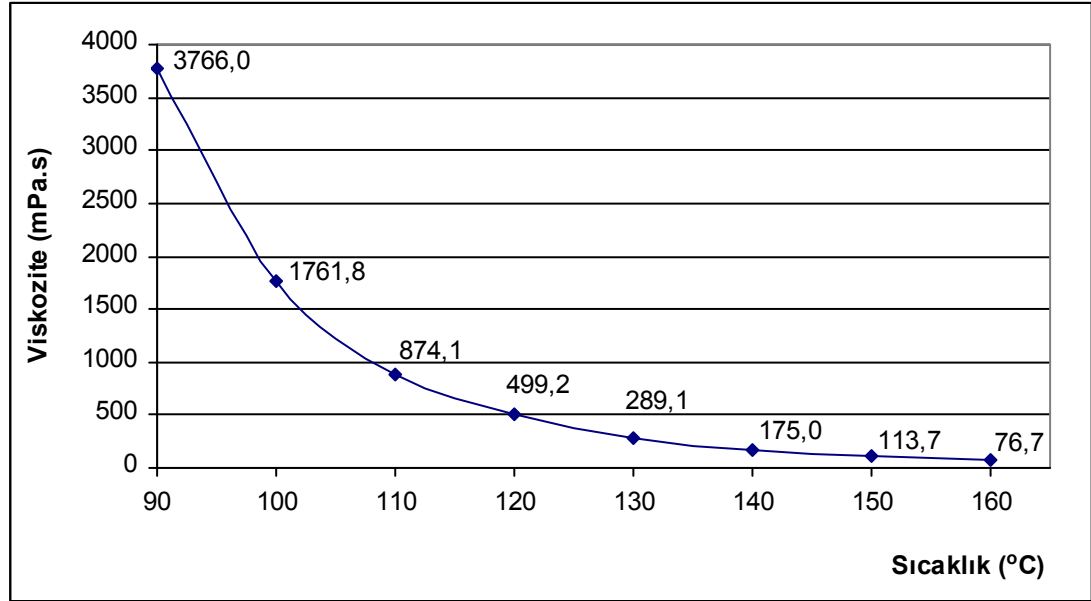


Şekil 10.1. %1 OEÇB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-10A (Devam) Organik esaslı çinko bileşiği (OEÇB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 10.2. %2 OEÇB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)								Ortalama viskozite (mPa.s)
160	80	73,33	80	73,33	80	73,33	80	73,33	76,7
150	113,3	115	113,3	113,3					113,7
140	180	166,7	175	173,3	180				175,0
130	303	280	280	293,3					289,1
120	493,3	493,3	510	500					499,2
110	886,7	866,7	863	880					874,1
100	1787	1767	1740	1753					1761,8
90	3800	3790	3733	3740	3767				3766,0

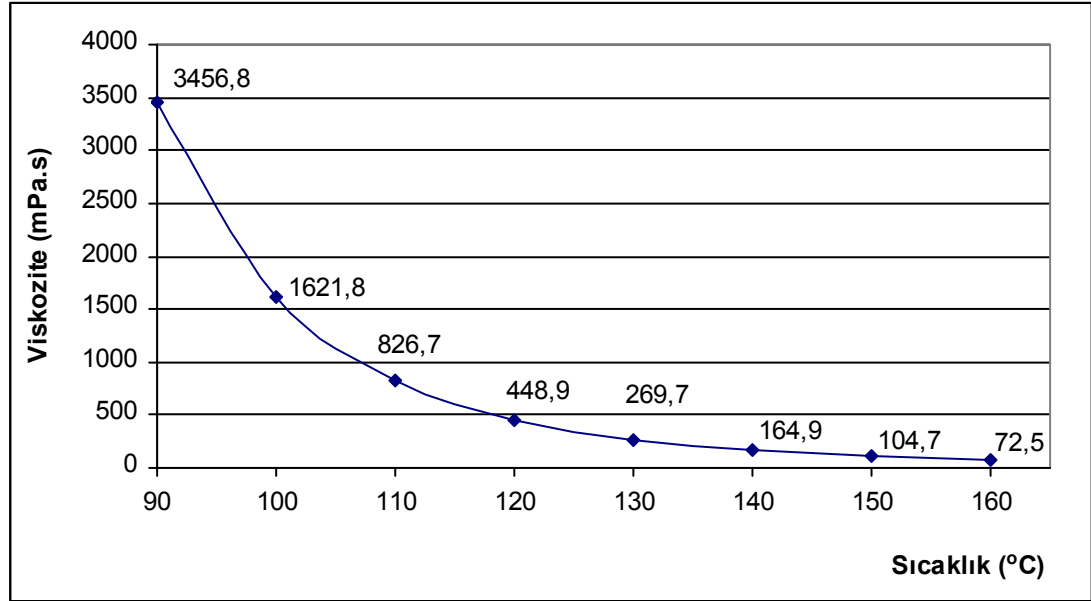


Şekil 10.2. %2 OEÇB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-10A (Devam) Organik esaslı çinko bileşiği (OEÇB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 10.3. %3 OEÇB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)							Ortalama viskozite (mPa.s)
160	73,33	73,33	73,33	70				72,5
150	106,7	100	110	100	103	106,7	106,7	104,7
140	166,7	163	170	160				164,9
130	280	280	255	280	263	270	260	269,7
120	446,7	440	460					448,9
110	833,3	833,3	806,7	833,3				826,7
100	1600	1660	1647	1580				1621,8
90	3440	3460	3500	3427				3456,8

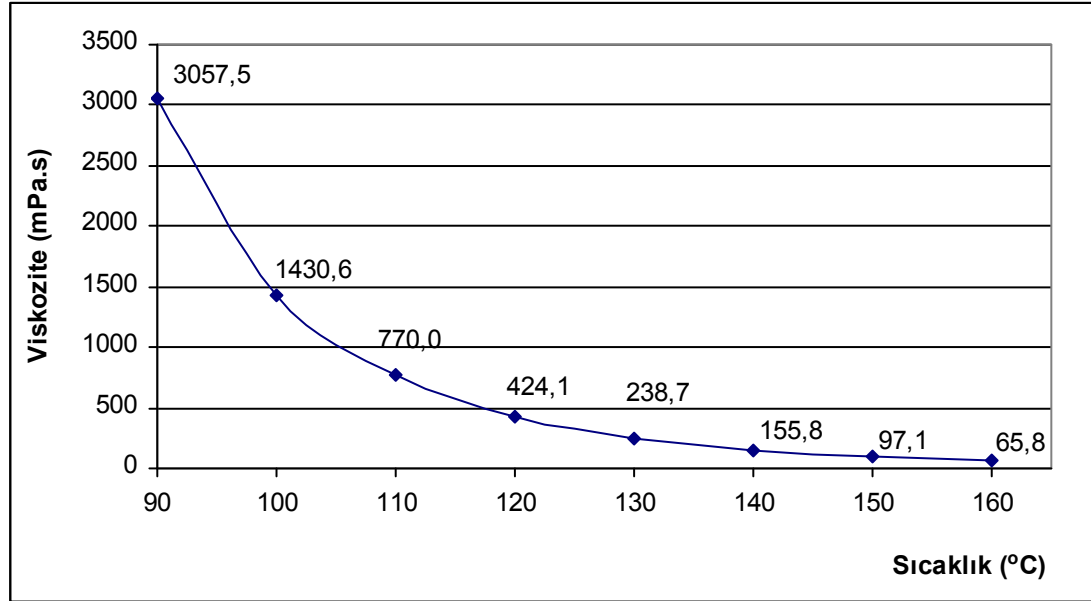


Şekil 10.3. %3 OEÇB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-10A (Devam) Organik esaslı çinko bileşiği (OEÇB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 10.4. %5 OEÇB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)											Ortalama viskozite (mPa.s)
160	66,67	66,67	66,67	63								65,8
150	100	95	100	93,33								97,1
140	160	160	160	146,7	155	160	160	155	153,3	153,3	150	155,8
130	246,7	253,3	240	233,3	220							238,7
120	420	426,7	420	426,7	433,3	426,7	415					424,1
110	770	770	760	780								770,0
100	1453	1453	1407	1400	1440							1430,6
90	3050	3080	3093	3007								3057,5

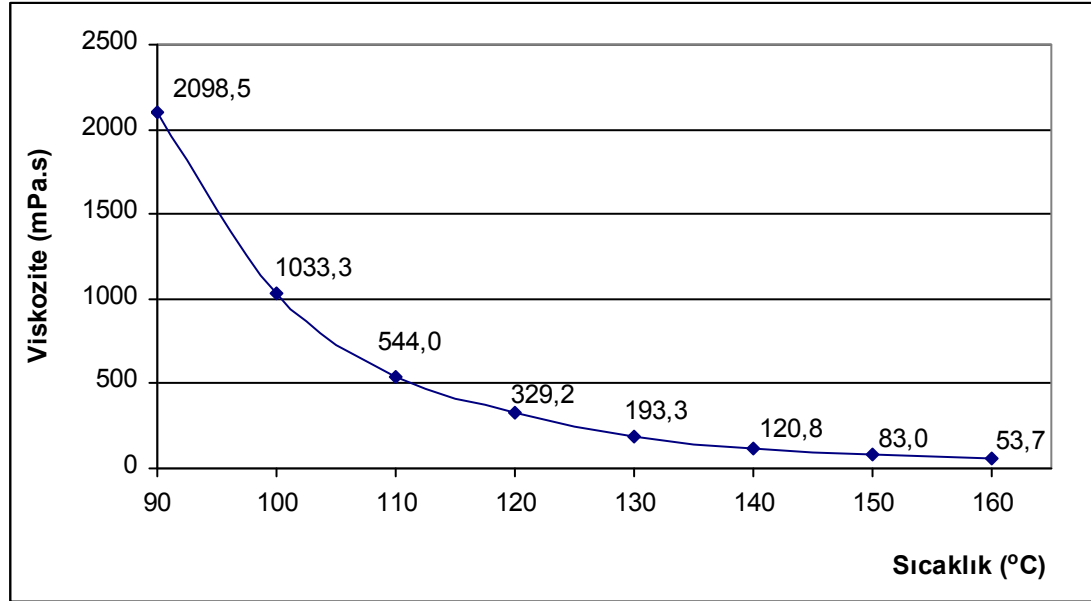


Şekil 10.4. %5 OEÇB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-10A (Devam) Organik esaslı çinko bileşiği (OEÇB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

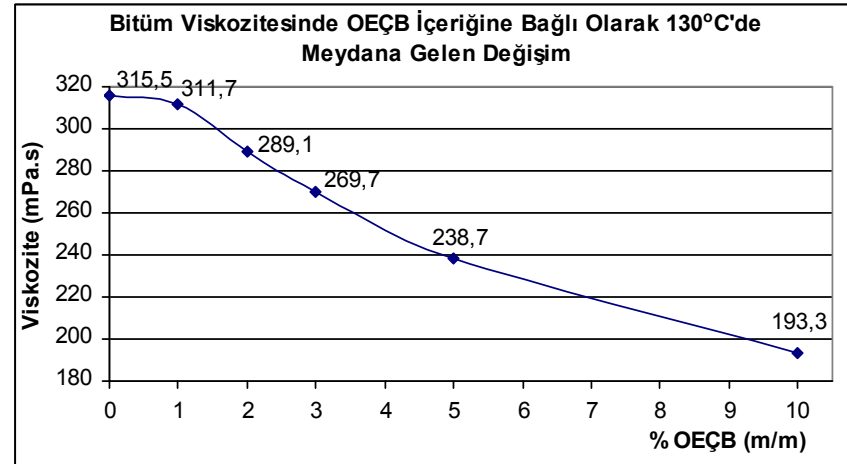
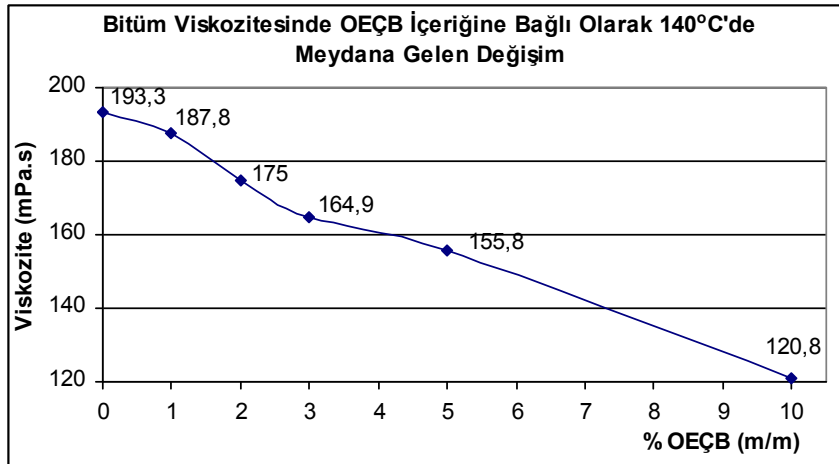
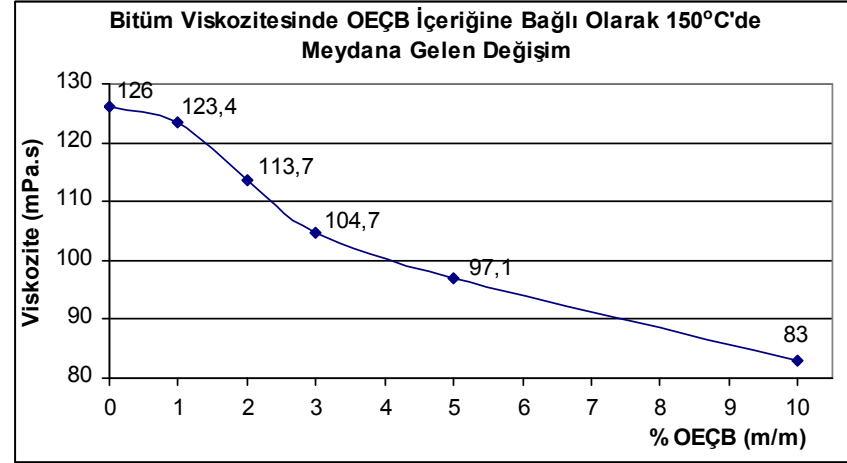
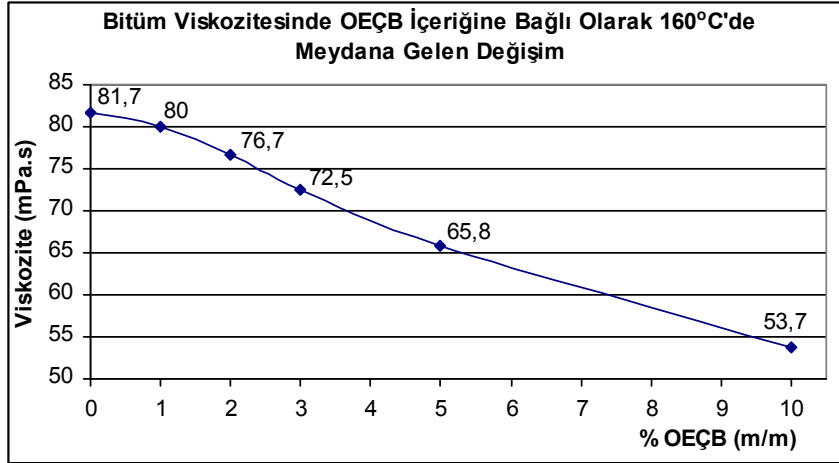
Çizelge 10.5. %10 OEÇB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama viskozite (mPa.s)
160	53,33	53,33	55	53,33		53,7
150	83	83	83	83		83,0
140	120	120	123	120		120,8
130	200	193,3	193,3	186,7	193,3	193,3
120	343	333,3	326,7	323	320	329,2
110	553,3	526,7	533,3	553,3	553,3	544,0
100	1060	1033	1013	1027		1033,3
90	2120	2087	2060	2127		2098,5

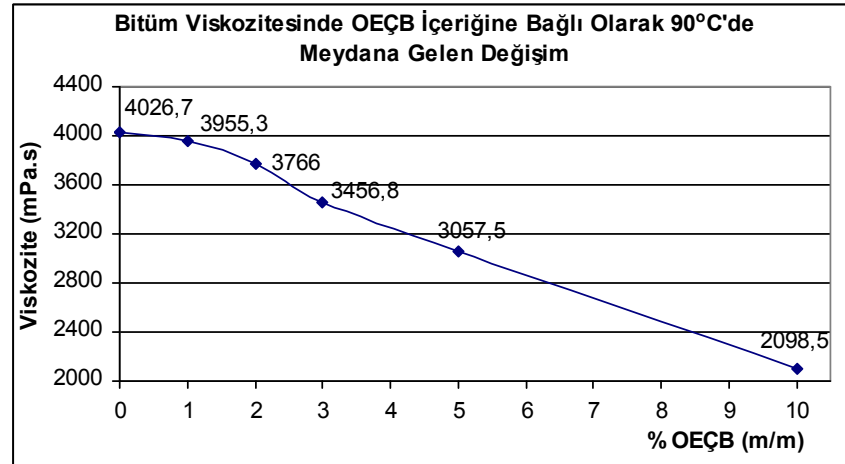
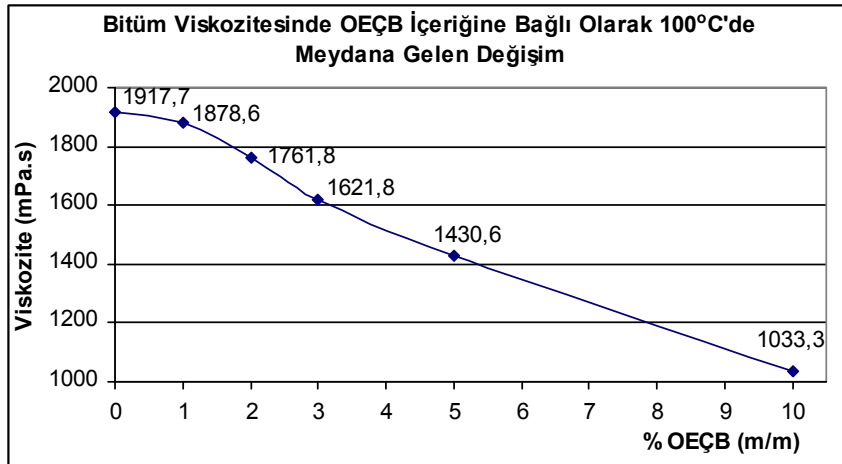
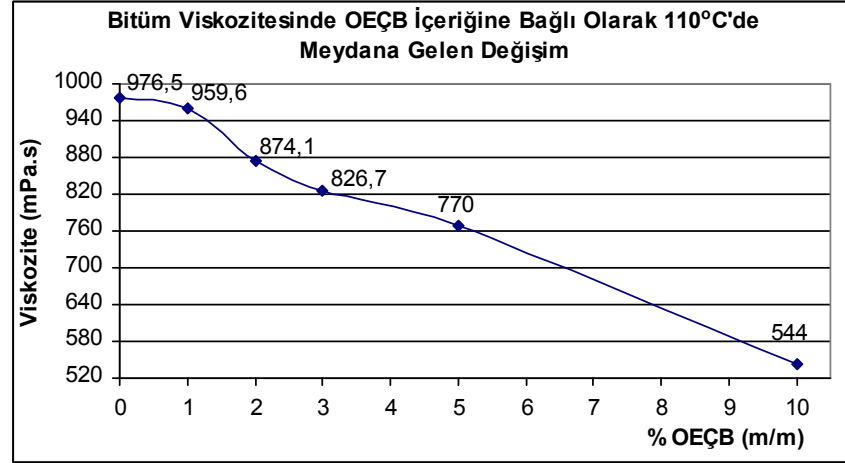
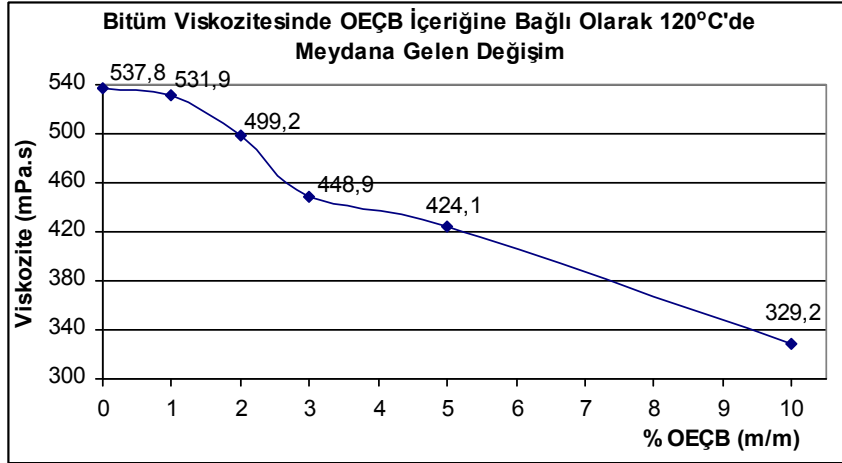


Şekil 10.5. %10 OEÇB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-10B OEÇB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



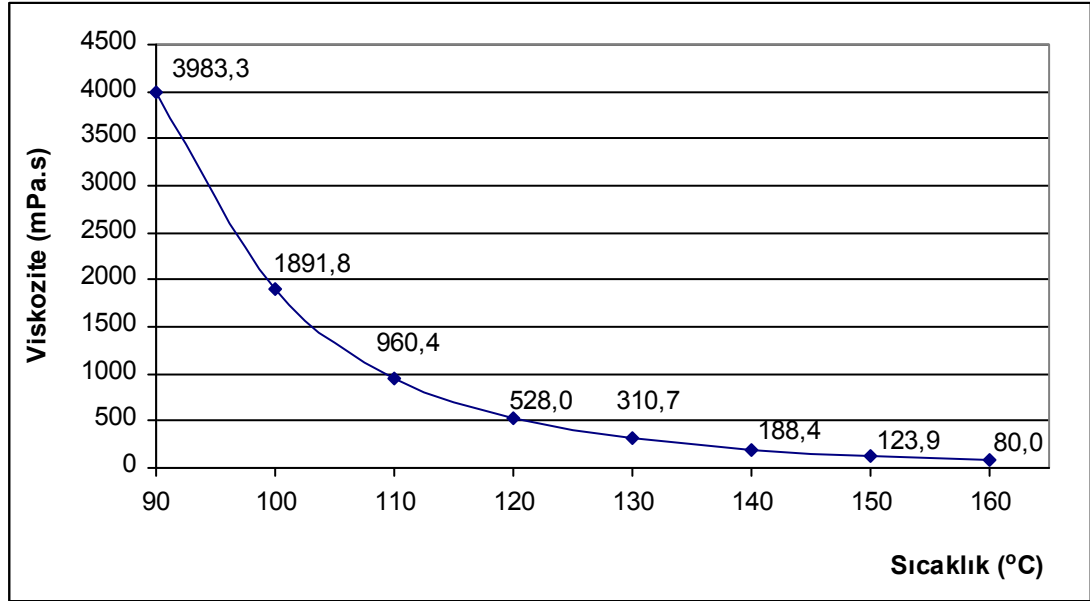
EK-10B (Devam) OEÇB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



EK-11A Organik esaslı kalsiyum bileşiği (OEKB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 11.1. %1 OEKB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)						Ortalama viskozite (mPa.s)
160	80	80	80				80,0
150	123	120	123	126,7	126,7		123,9
140	190	190	186,7	186,7	186,7	190	188,4
130	310	310	306,7	313,3	313,3		310,7
120	526,7	530	530	526,7	526,7		528,0
110	960	960	955	966,7			960,4
100	1887	1900	1893	1887			1891,8
90	3973	3987	3990				3983,3

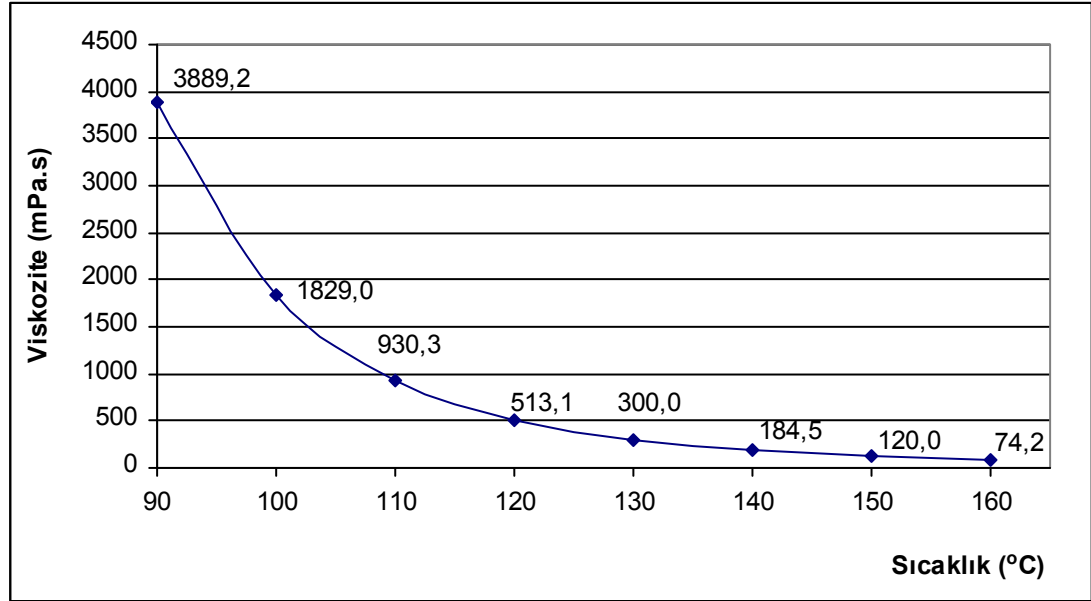


Şekil 11.1. %1 OEKB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-11A (Devam) Organik esaslı kalsiyum bileşiği (OEKB) katkılı bitümlerin
viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 11.2. %2 OEKB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)										Ortalama viskozite (mPa.s)
160	75	73,33	73,33	75							74,2
150	120	120	120	120	120						120,0
140	190	186,7	180	180	186,7	183	186,7	183			184,5
130	306,7	300	293,3	300	300	300					300,0
120	513,3	506,7	520	520	512	514	520	512	506,7	506,7	513,1
110	926,7	933,3	935	923	933,3						930,3
100	1820	1847	1813	1815	1850						1829,0
90	3853	3947	3853	3900	3893						3889,2

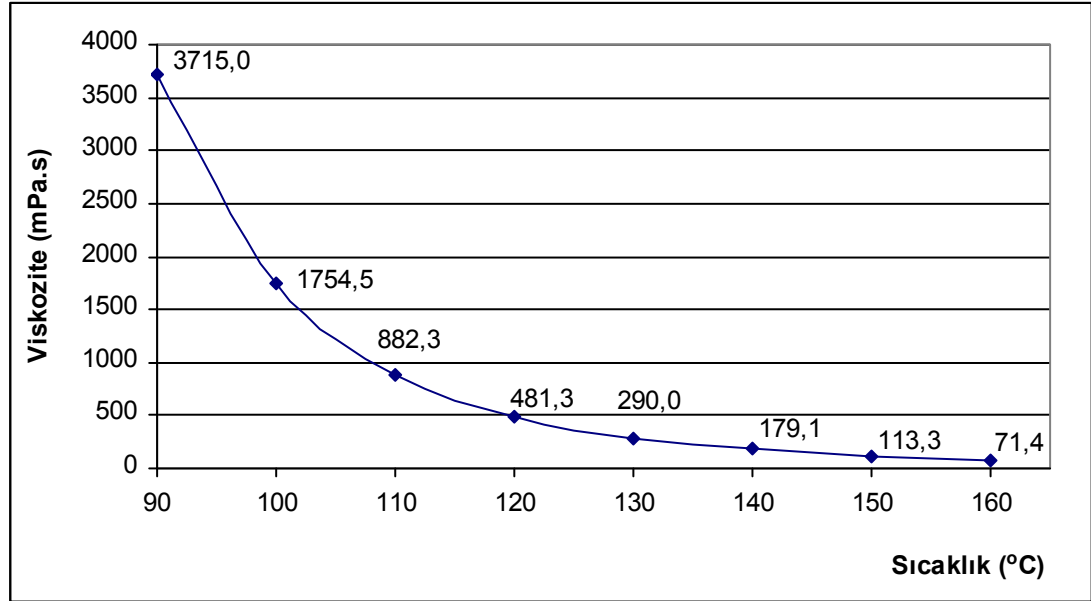


Şekil 11.2. %2 OEKB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-11A (Devam) Organik esaslı kalsiyum bileşiği (OEKB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 11.3. %3 OEKB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)							Ortalama viskozite (mPa.s)
160	70	66,67	73,33	70	73,33	73,33	73,33	71,4
150	113,3	113,3	113,3	113,3	113,3	113,3	113,3	113,3
140	180	183	180	175	177,5			179,1
130	293,3	290	290	286,7	290			290,0
120	473,3	480	480	486,7	486,7			481,3
110	883	886,7	893,3	873,3	873,3	893,3	873,3	882,3
100	1787	1787	1733	1740	1753	1727		1754,5
90	3740	3727	3680	3713				3715,0

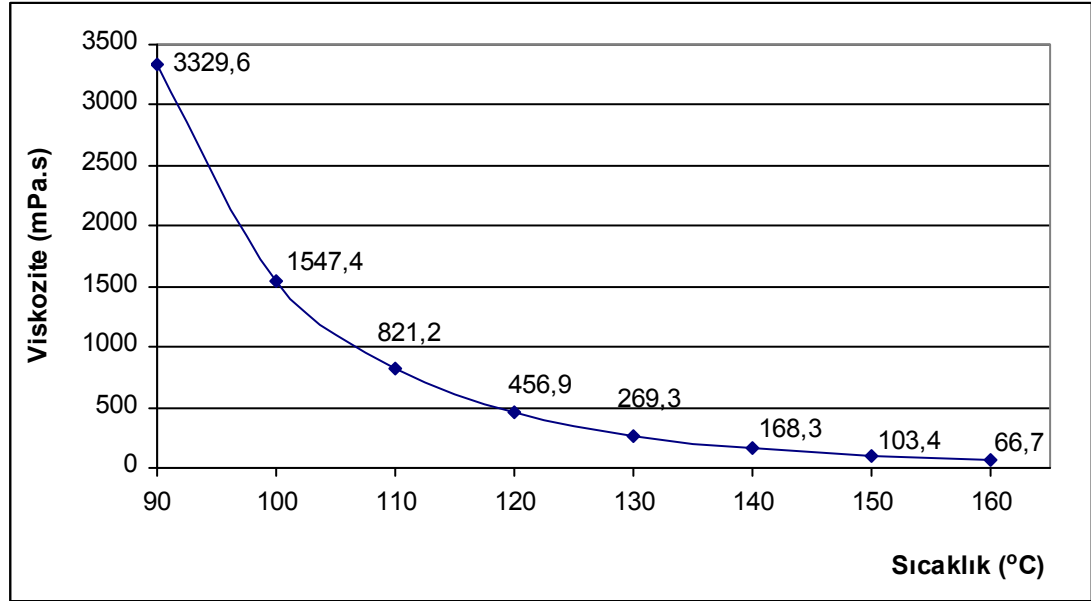


Şekil 11.3. %3 OEKB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-11A (Devam) Organik esaslı kalsiyum bileşiği (OEKB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 11.4. %5 OEKB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)								Ortalama viskozite (mPa.s)
160	70	66,67	66,67	60	66,67	66,67	66,67	70	66,7
150	106,7	101,5	103	103	103				103,4
140	166,7	173,3	163	166,7	172				168,3
130	266,7	273,3	270	270	266,7				269,3
120	448	455	461,5	460	460				456,9
110	835	823	820	806,7					821,2
100	1547	1567	1540	1550	1533				1547,4
90	3320	3307	3367	3327	3327				3329,6

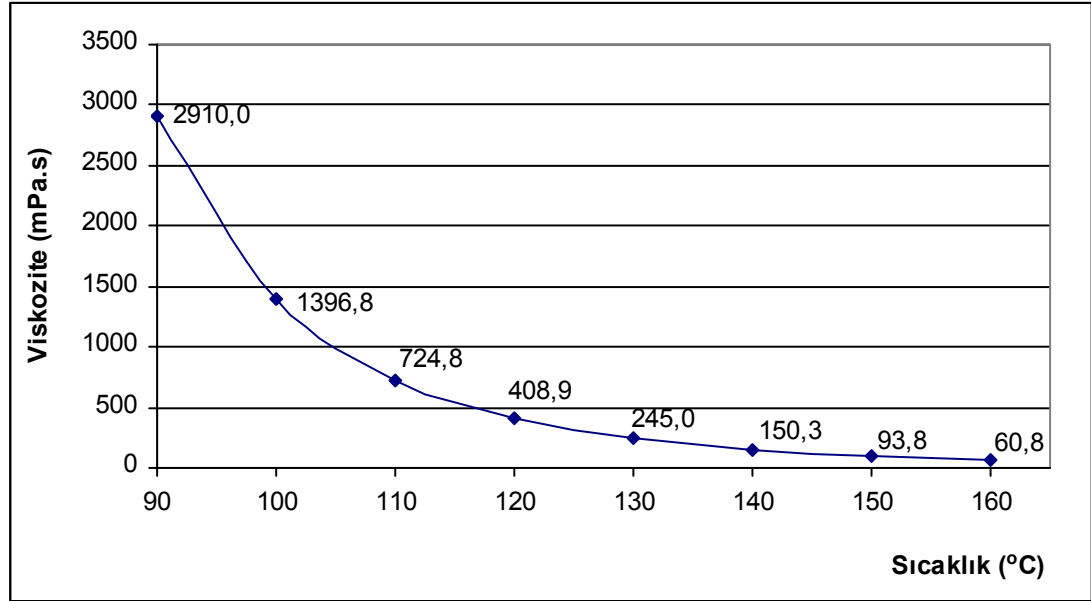


Şekil 11.4. %5 OEKB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-11A (Devam) Organik esaslı kalsiyum bileşiği (OEKB) katkılı bitümlerin
viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

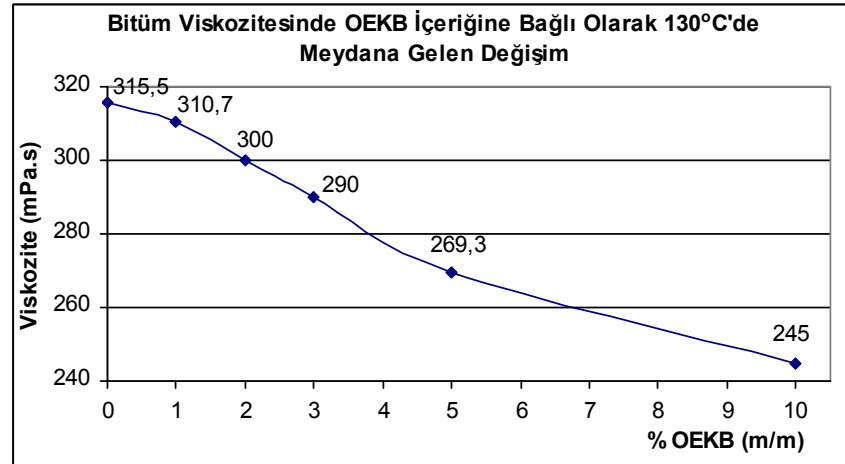
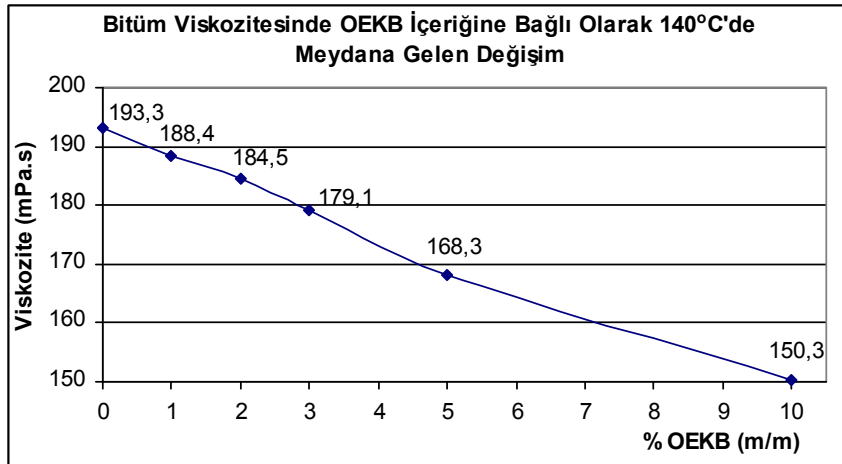
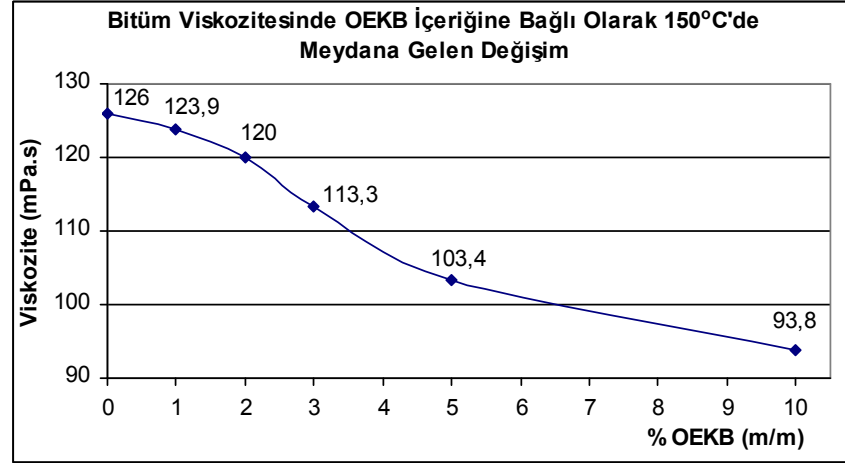
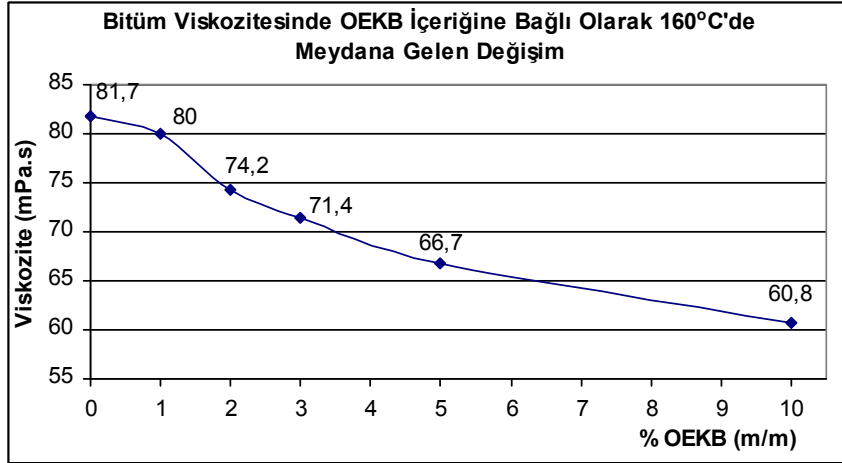
Çizelge 11.5. %10 OEKB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)									Ortalama viskozite (mPa.s)
160	57,5	61,5	60	54	61,5	60	65	63	65	60,8
150	95	97,5	93,33	92	90	95				93,8
140	150	146,7	160	146,7	148					150,3
130	246,7	240	246,7	246,7						245,0
120	423	408	400	406,7	406,7					408,9
110	741,5	728	720	708	726,7					724,8
100	1387	1387	1413	1400						1396,8
90	2907	2960	2873	2920	2900	2900				2910,0

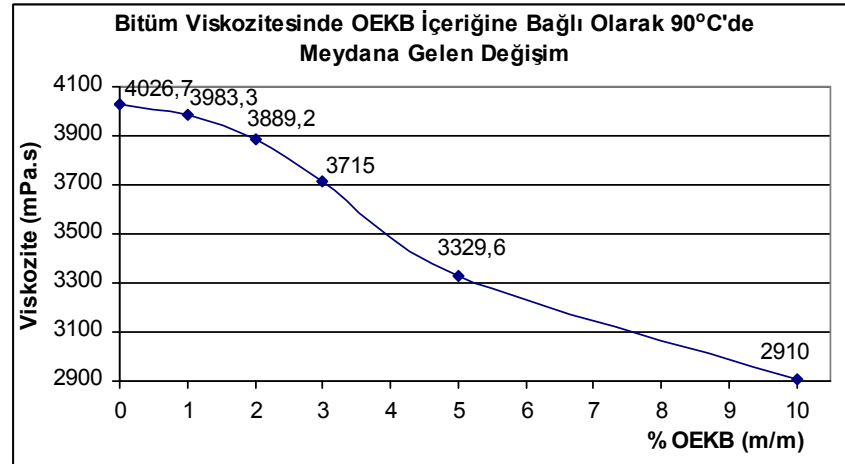
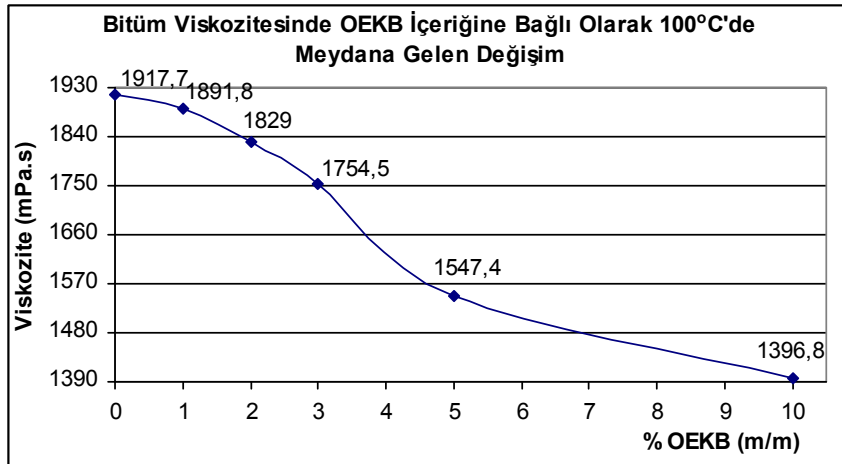
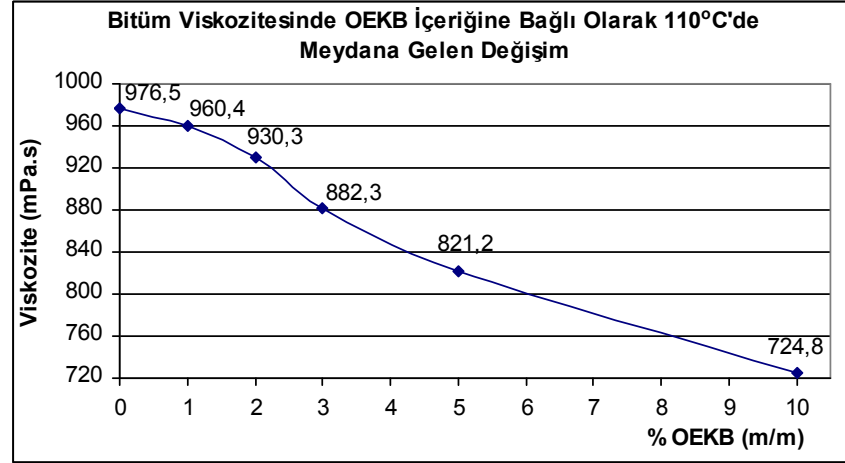
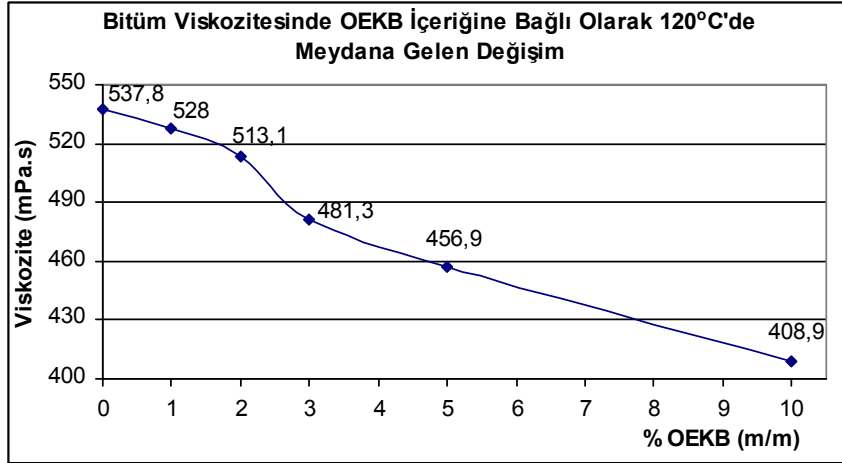


Şekil 11.5. %10 OEKB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-11B OEKB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



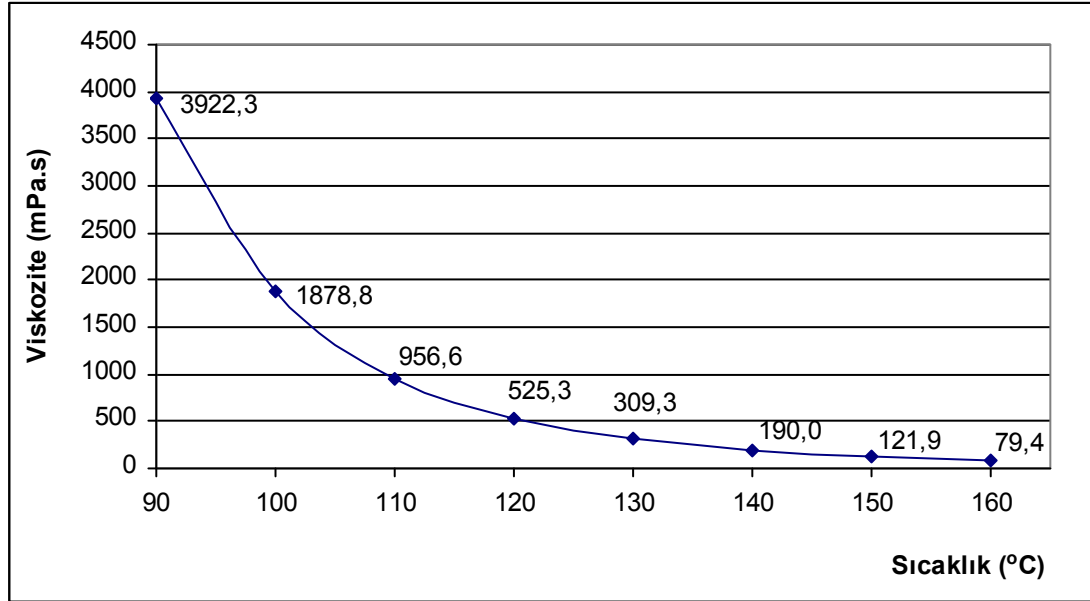
EK-11B (Devam) OEKB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



EK-12A Organik esaslı çinkofosfat bileşiği (OEÇFB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 12.1. %1 OEÇFB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)						Ortalama viskozite (mPa.s)
160	80	80	80	73,33	80	83	79,4
150	123	126,7	120	120	120		121,9
140	190	193,3	186,7	190			190,0
130	313,3	306,7	310	310	306,7		309,3
120	526,7	520	526,7	530	523		525,3
110	946,7	963	953,3	960	960		956,6
100	1900	1847	1867	1880	1900		1878,8
90	3900	3967	3900				3922,3

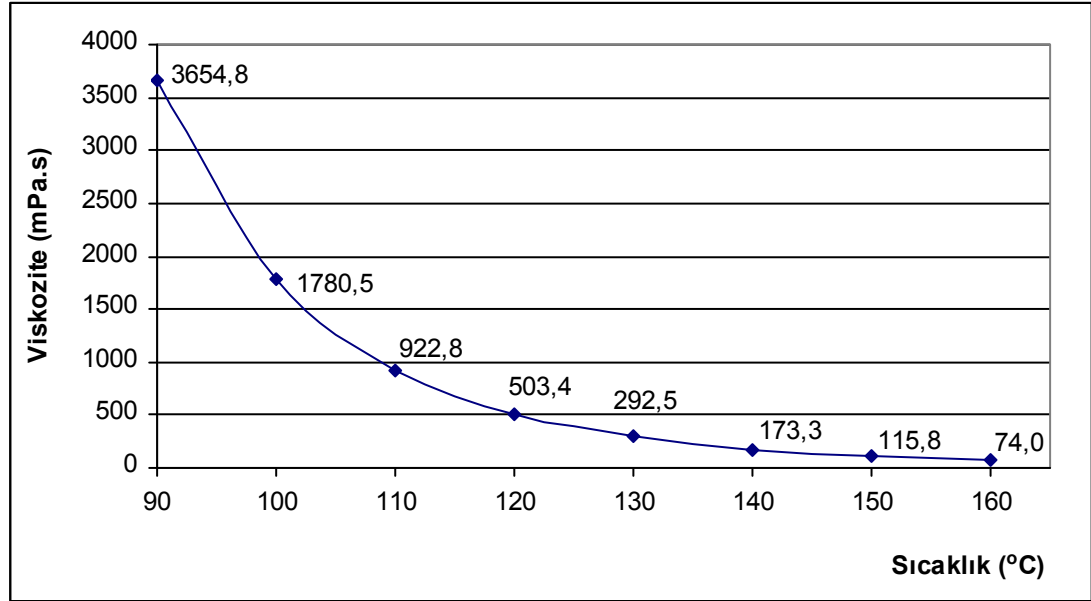


Şekil 12.1. %1 OEÇFB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-12A (Devam) Organik esaslı çinkofosfat bileşiği (OEÇFB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 12.2. %2 OEÇFB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama viskozite (mPa.s)
160	73,33	70	73,33	73,33	80	74,0
150	115	120	113,3	115		115,8
140	173,3	173,3	173,3			173,3
130	286,7	293,3	295	295		292,5
120	486,7	506,7	513,3	506,7		503,4
110	933,3	920	915	923		922,8
100	1780	1800	1755	1787		1780,5
90	3553	3820	3733	3513		3654,8

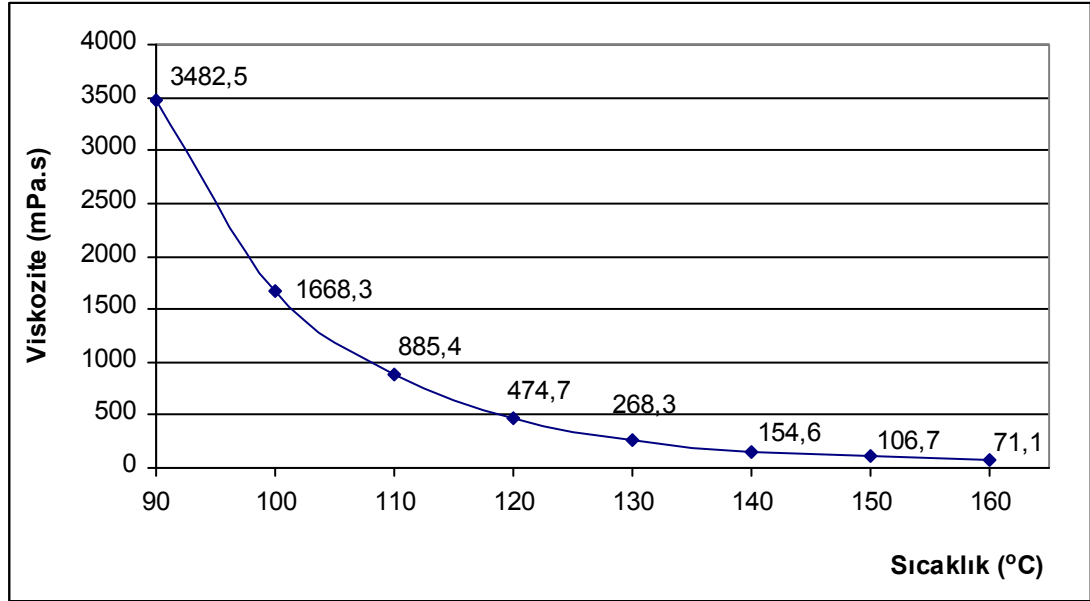


Şekil 12.2. %2 OEÇFB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-12A (Devam) Organik esaslı çinkofosfat bileşiği (OEÇFB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 12.3. %3 OEÇFB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)						Ortalama viskozite (mPa.s)
160	73,33	73,33	73,33	66,67	66,67	73,33	71,1
150	106,7	106,7	106,7				106,7
140	153,3	153,3	160	153,3	153,3		154,6
130	266,7	266,7	260	273,3	275		268,3
120	466,7	473,3	480	475	473,3	480	474,7
110	893,3	875	880	893,3			885,4
100	1687	1640	1673	1673			1668,3
90	3460	3513	3507	3450			3482,5

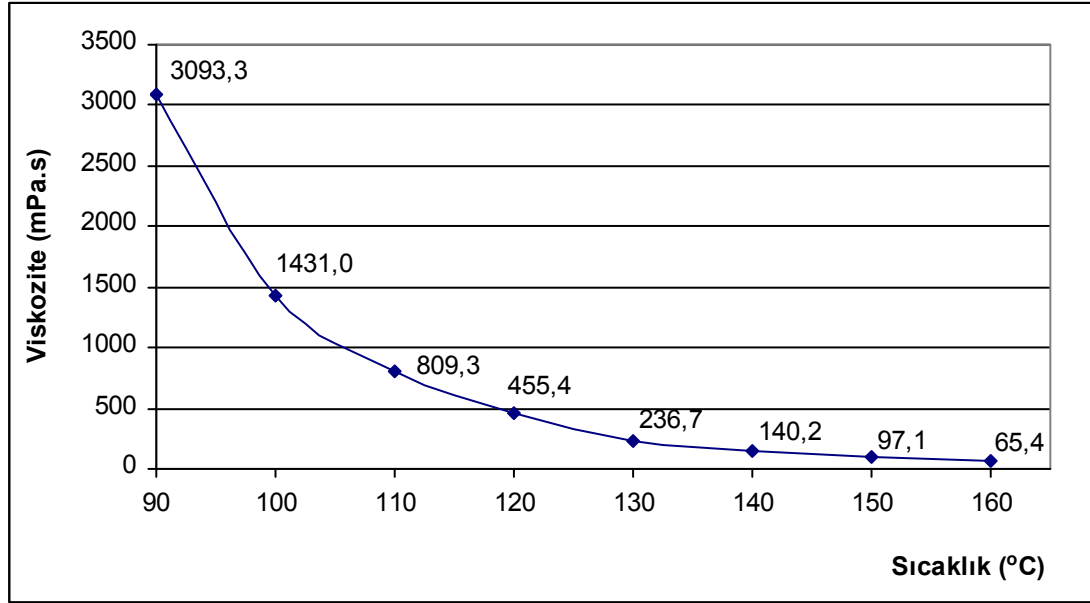


Şekil 12.3. %3 OEÇFB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-12A (Devam) Organik esaslı çinkofosfat bileşiği (OEÇFB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 12.4. %5 OEÇFB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)						Ortalama viskozite (mPa.s)
160	66,67	63	66,67	66,67	66,67	63	65,4
150	100	95	93,33	100			97,1
140	140	140	143	135	143		140,2
130	233,3	220	233,3	246,7	240	246,7	236,7
120	455	460	446,7	460			455,4
110	806,7	800	820	810	810		809,3
100	1395	1453	1420	1440	1447		1431,0
90	3080	2973	3227				3093,3

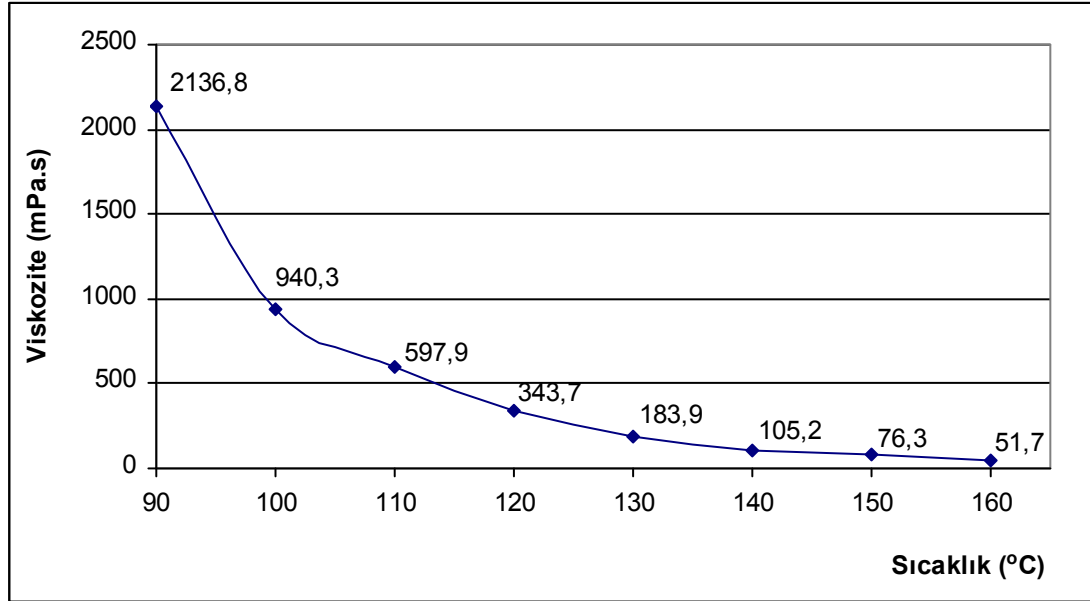


Şekil 12.4. %5 OEÇFB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-12A (Devam) Organik esaslı çinkofosfat bileşiği (OEÇFB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

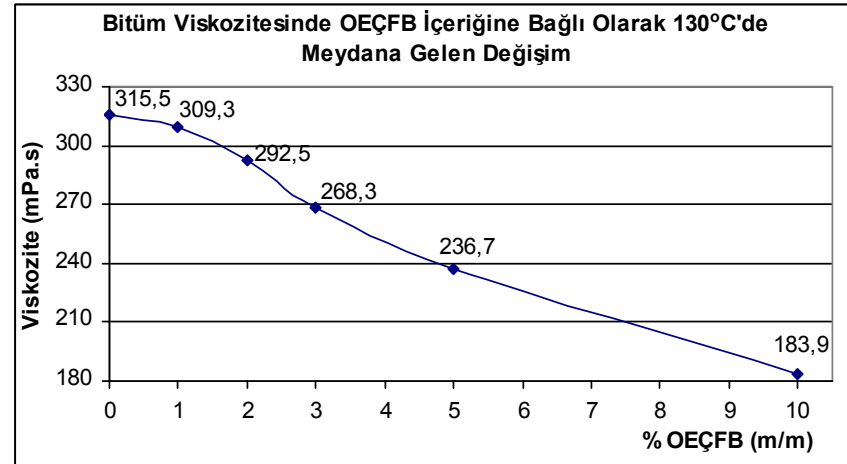
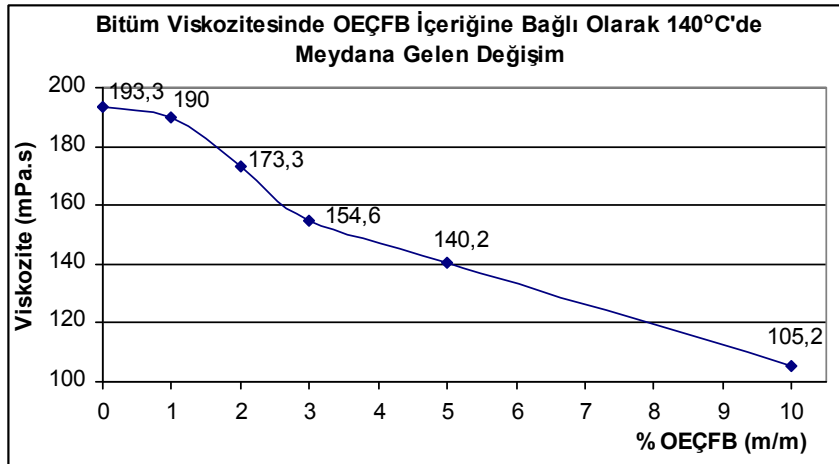
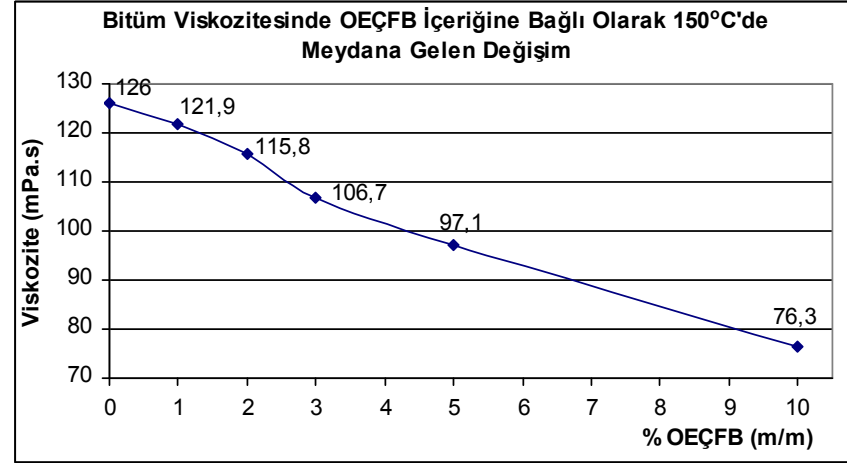
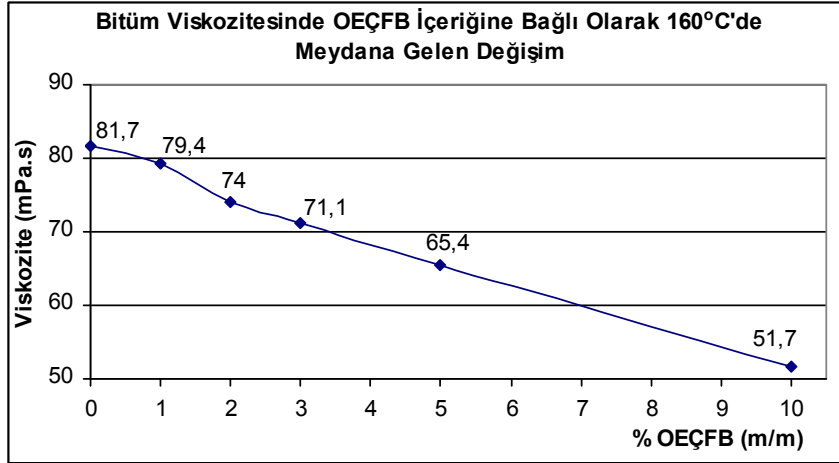
Çizelge 12.5. %10 OEÇFB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)					Ortalama viskozite (mPa.s)
160	53,33	50	50	53,33		51,7
150	75	80	75	75		76,3
140	106,7	106,7	103	106,7	103	105,2
130	186,7	183	183	183		183,9
120	340	335	346,7	350	346,7	343,7
110	586,7	600	593,3	603	606,7	597,9
100	933,3	895	953,3	966,7	953,3	940,3
90	2120	2147	2133	2147		2136,8

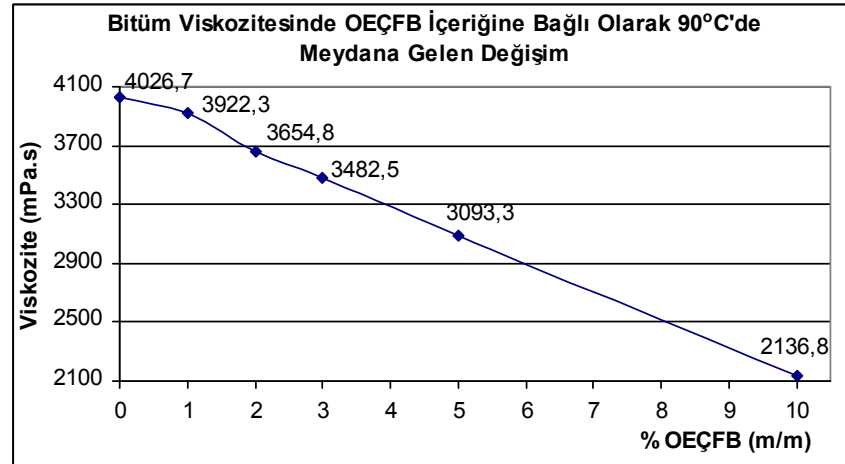
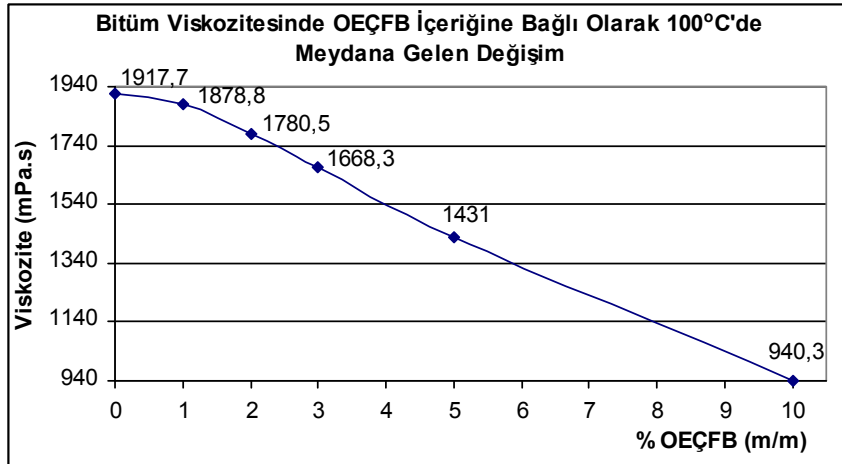
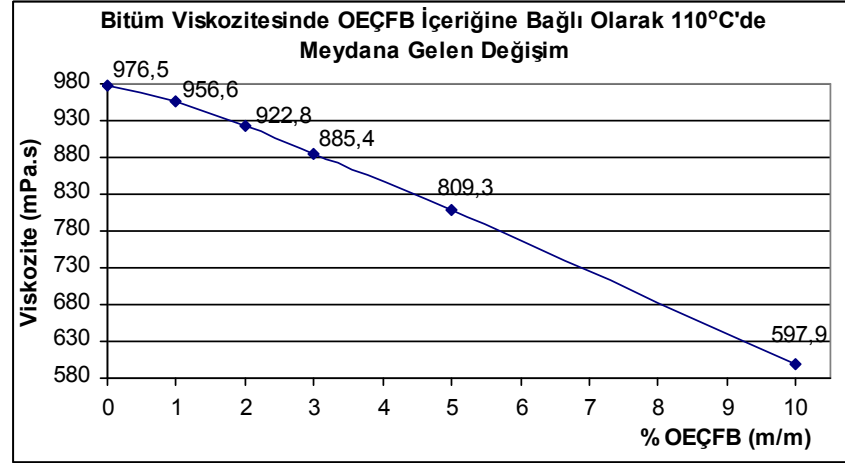
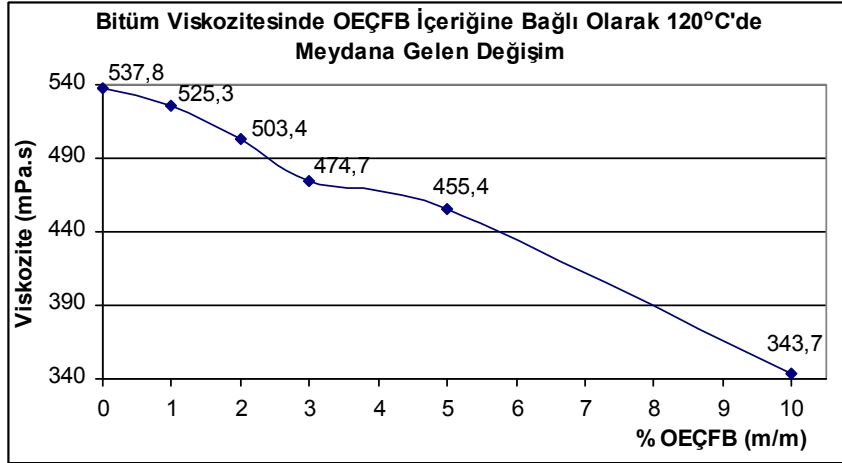


Şekil 12.5 %10 OEÇFB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-12B OEÇFB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



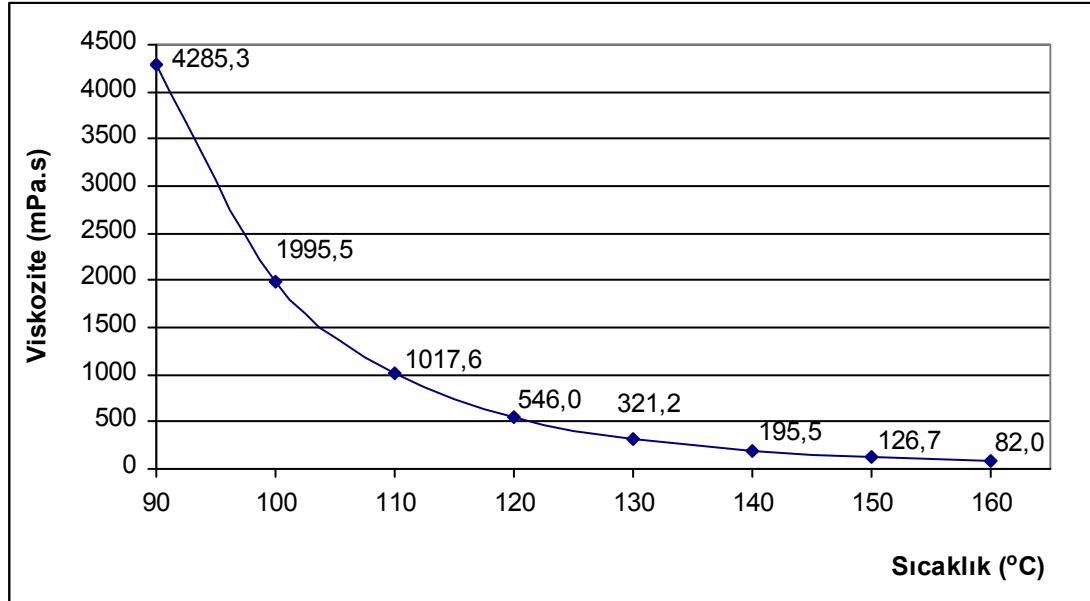
EK-12B (Devam) OEÇFB'nin bitüm viskozitesinde meydana getirdiği değişim



EK-13 Trietilen glikol esaslı polibor bileşiği (TEGPB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 13.1. %1 TEGPB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)						Ortalama viskozite (mPa.s)
160	80	83	83	83	80	83	82,0
150	126,7	126,7	126,7				126,7
140	193,3	193,3	193,3	200	197,5		195,5
130	326,7	323	320	317,5	320	320	321,2
120	546,7	540	546,7	546,7	550		546
110	1007	1007	1020	1027	1027		1017,6
100	1993	1980	1996	2013			1995,5
90	4300	4307	4267	4267			4285,3

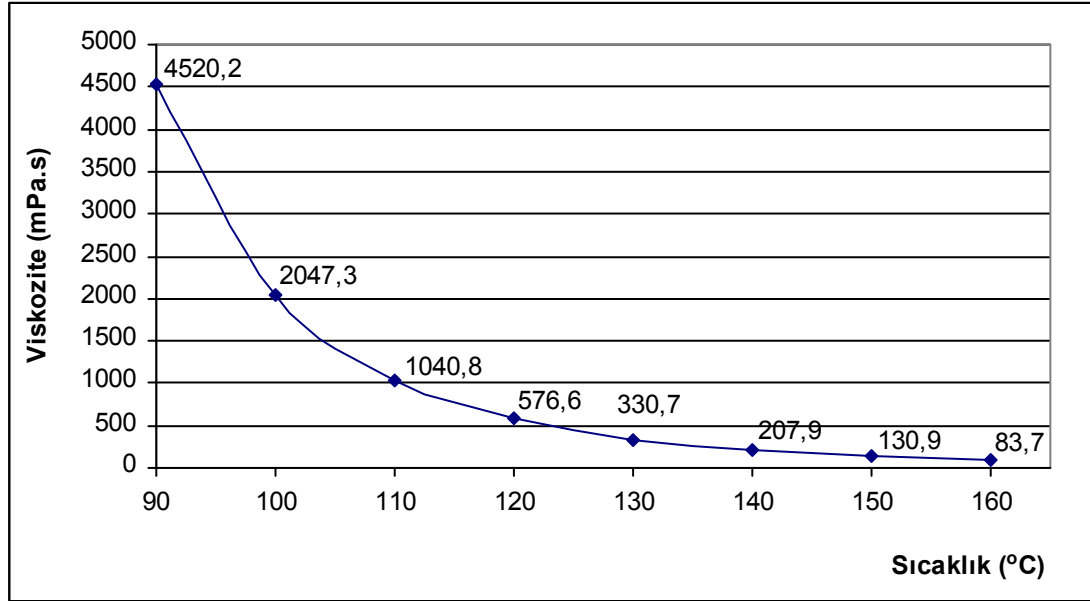


Şekil 13.1. %1 TEGPB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-13 (Devam) Trietilen glikol esaslı polibor bileşiği (TEGPB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 13.2. %2 TEGPB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)							Ortalama viskozite (mPa.s)
160	83	83	83	83	85	85		83,7
150	126,7	133,3	133,3	126,7	133,3	132		130,9
140	213,3	206,7	206,7	210	203			207,9
130	326,7	326,7		340	333,3	326,7		330,7
120	586,7	586,7	565	568	593,3	563	573,3	576,6
110	1033	1055	1040	1035				1040,8
100	2053	2049	2047	2040				2047,3
90	4540	4500	4493	4533	4515	4540		4520,2

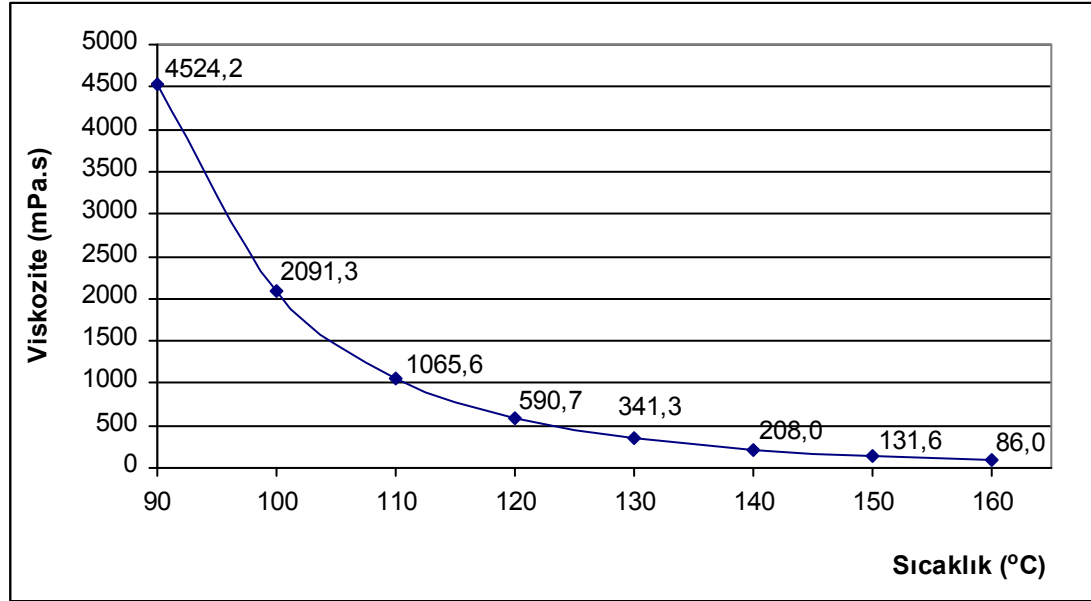


Şekil 13.2. %2 TEGPB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-13 (Devam) Trietilen glikol esaslı polibor bileşiği (TEGPB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

Çizelge 13.3. %3 TEGPB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)									Ortalama viskozite (mPa.s)
160	86,67	86,67	86,67	85	83	86,67	86,67	86,67		86,0
150	133,3	133,3	133,3	130	128					131,6
140	210	211	206,7	205	206,7	206,7	208	210		208,0
130	346,7	340	343	340	343	340	338	340		341,3
120	593,3	586,7	588	593,3	592					590,7
110	1087	1080	1053	1060	1067	1060	1060	1060	1063	1065,6
100	2100	2107	2087	2087	2080	2087				2091,3
90	4595	4527	4473	4553	4473					4524,2

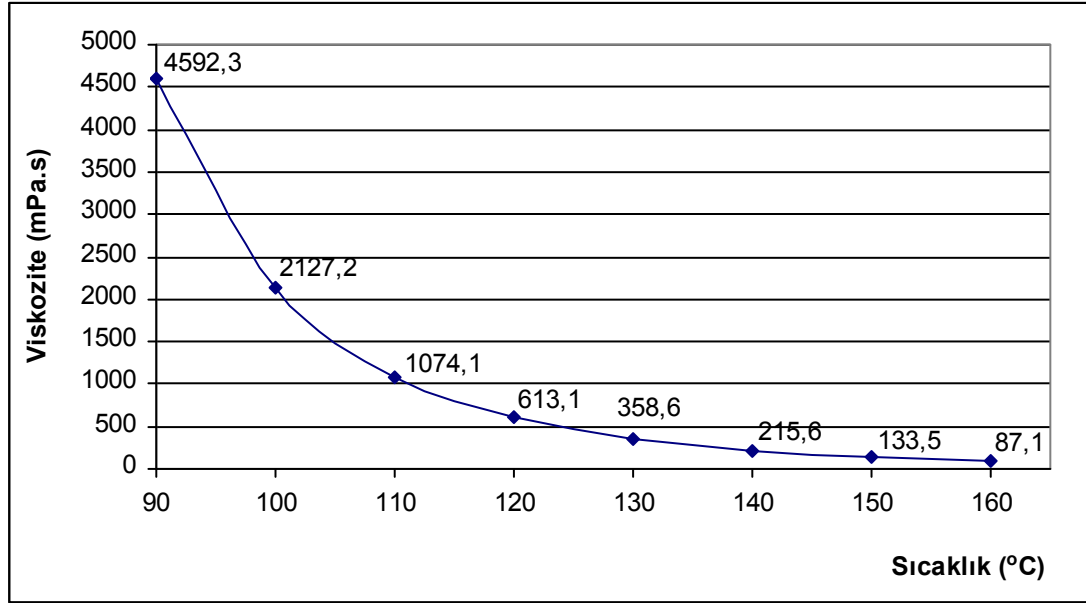


Şekil 13.3. %3 TEGPB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-13 (Devam) Trietilen glikol esaslı polibor bileşiği (TEGPB) katkılı bitümlerin viskozite ölçümleri ve ölçümlere ait grafiksel gösterimler

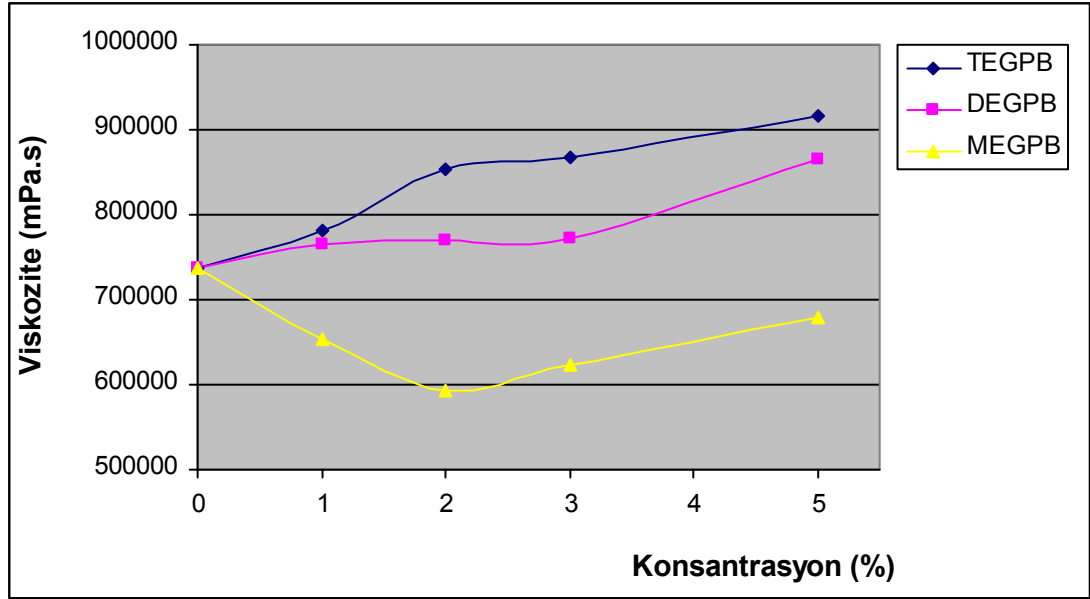
Çizelge 13.4. %5 TEGPB katkılı bitüme ait viskozite ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite ölçümleri (mPa.s)										Ortalama viskozite (mPa.s)
160	86,67	86,67	86,67	86,67	86,67	88	88				87,1
150	133,3	133,3	133,3	133,3	133,3	135	133,3				133,5
140	220	215	215	215	215	213,3					215,6
130	366,7	360	360	355	355	355					358,6
120	626,7	620	620	606,7	600	605					613,1
110	1087	1067	1060	1067	1073	1080	1067	1060	1093	1087	1074,1
100	2113	2133	2125	2127	2127	2138					2127,2
90	4627	4567	4607	4593	4580	4580					4592,3

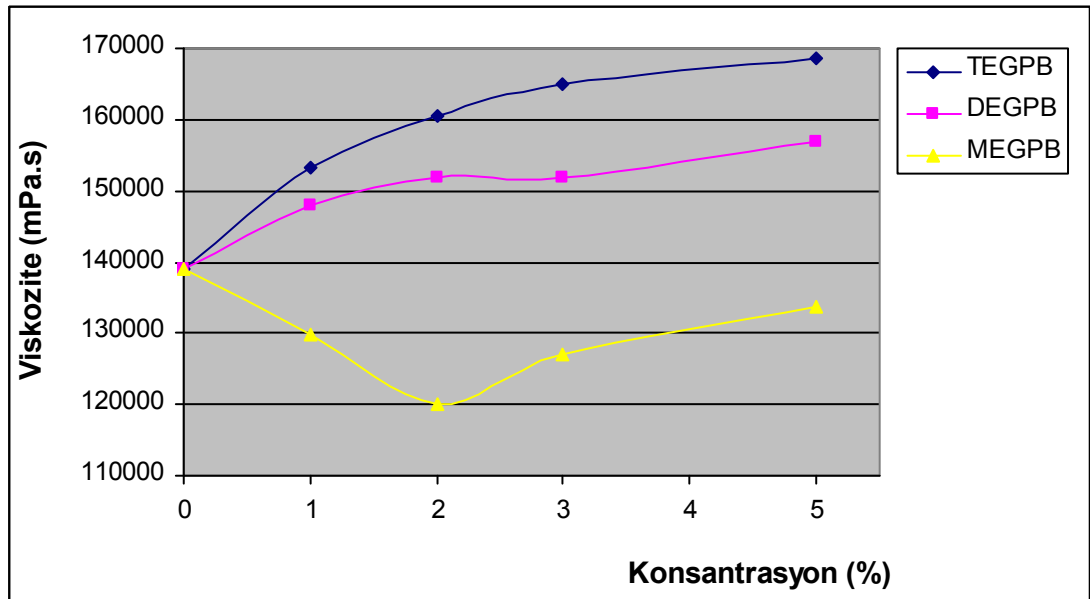


Şekil 13.4. %5 TEGPB katkılı bitüme ait viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi

EK-14 TEGPB, DEGPB ve MEGPB katkıli bitümler için 50°C ile 90°C arasında konsantrasyona bağlı viskozite değişimleri

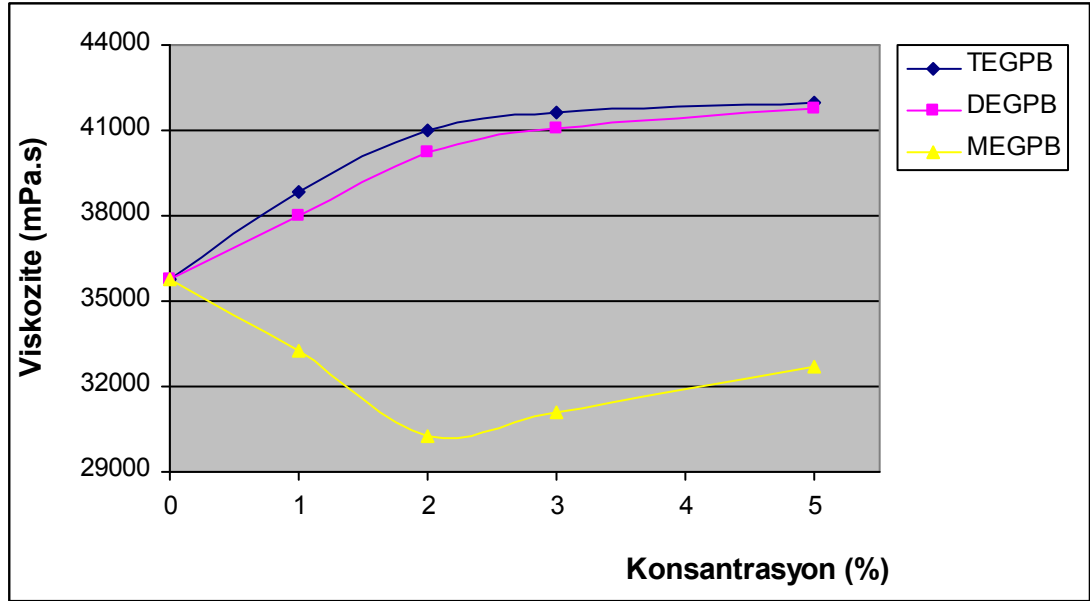


Şekil 14.1. TEGPB, DEGPB, MEGPB katkıli bitümlerin 50°C'deki viskozite değişimleri

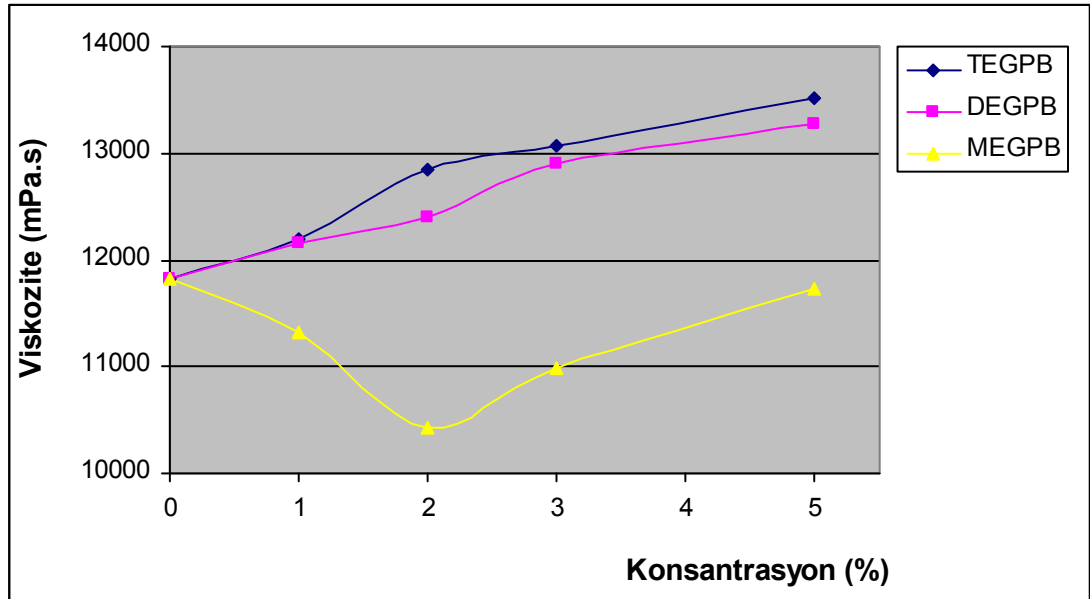


Şekil 14.2. TEGPB, DEGPB, MEGPB katkıli bitümlerin 60°C'deki viskozite değişimleri

EK-14 (Devam) TEGPB, DEGPB ve MEGPB katkılı bitümler için 50°C ile 90°C arasında konsantrasyona bağlı viskozite değişimleri

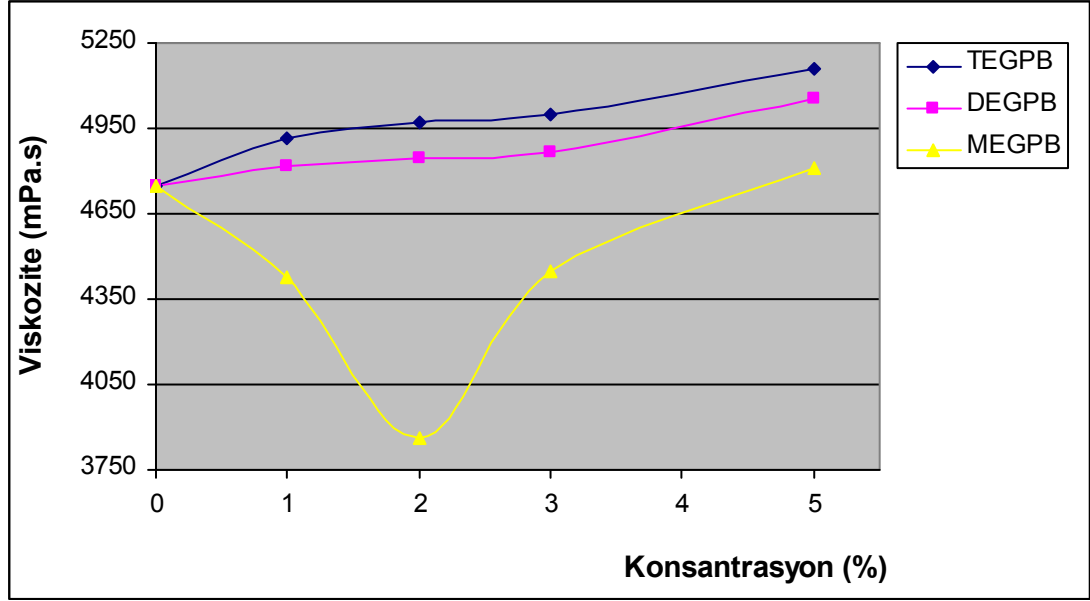


Şekil 14.3. TEGPB, DEGPB, MEGPB katkılı bitümlerin 70°C'deki viskozite değişimleri



Şekil 14.4. TEGPB, DEGPB, MEGPB katkılı bitümlerin 80°C'deki viskozite değişimleri

EK-14 (Devam) TEGPB, DEGPB ve MEGPB katkılı bitümler için 50°C ile 90°C arasında konsantrasyona bağlı viskozite değişimleri

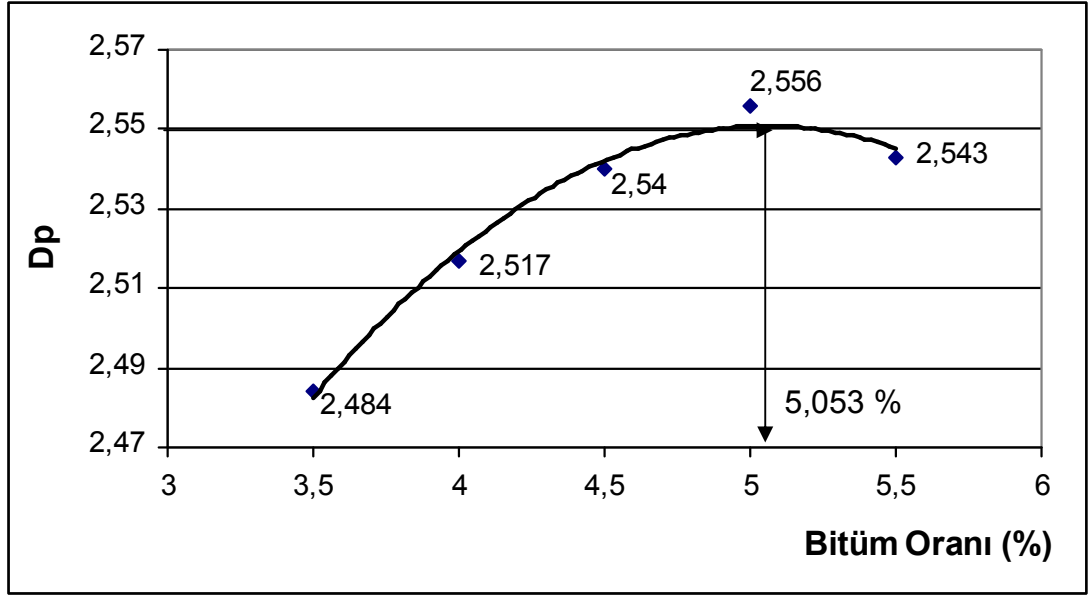


Şekil 14.5. TEGPB, DEGPB, MEGPB katkılı bitümlerin 90°C'deki viskozite değişimleri

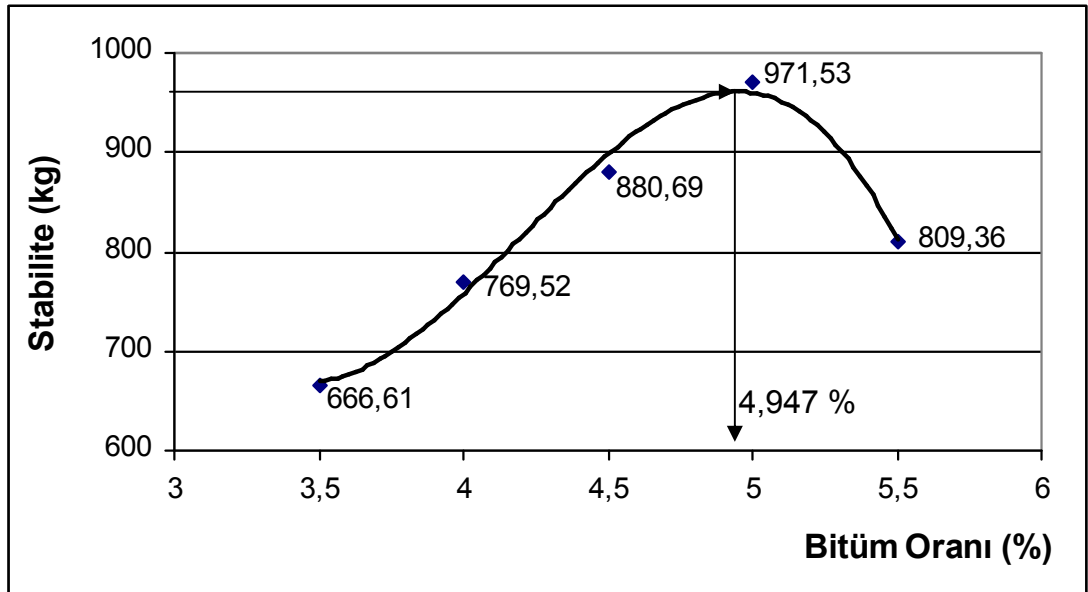
EK-15 Orijinal bitüm ile hazırlanan Marshall tasarım sonuçları

Briket no.	Bitüm		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)	Stabilite	Düzelme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	Ort.													
3.5/1	3,5	38,5	56,0	55,8	55,8	55,9	1134	684	1138	454	2,498	2,673	7,07	14,82	52,32	195	195	1,239	892,36
3.5/2			58,5	57,9	57,9	58,1	1128	674	1131	457	2,468					150	91	1,162	383,95
3.5/3			56,4	56,0	56,1	56,2	1134	681	1137	456	2,487					110	160	1,228	723,50
										ort.	2,484					151,67			666,61
4.0/1	4	44	56,9	57,0	56,8	56,9	1138	689	1141	452	2,518	2,653	5,10	14,11	63,85	140	154	1,201	680,37
4.0/2			57,2	57,0	57,4	57,2	1142	693	1146	453	2,521					130	180	1,19	789,81
4.0/3			56,2	56,5	56,0	56,2	1141	691	1145	454	2,513					145	185	1,228	838,38
										ort.	2,517					138,33			769,52
4.5/1	4,5	49,5	55,5	55,5	55,5	55,5	1145	696	1147	451	2,539	2,632	3,51	13,75	74,46	130	210	1,254	973,70
4.5/2			56,6	56,3	56,3	56,4	1145	695	1147	452	2,533					185	192	1,22	864,80
4.5/3			56,0	56,4	56,5	56,3	1144	696	1145	449	2,548					155	178	1,224	803,55
										ort.	2,540					156,67			880,69
5.0/1	5	55	55,8	55,6	55,5	55,6	1151	703	1152	449	2,563	2,613	2,15	13,60	84,17	200	210	1,25	970,56
5.0/2			55,1	55,0	55,0	55,0	1144	698	1145	447	2,559					230	233	1,276	1100,81
5.0/3			55,8	56,0	56,1	56,0	1146	697	1147	450	2,547					195	185	1,235	843,23
										ort.	2,556					208,33			971,53
5.5/1	5,5	60,5	56,3	56,3	56,1	56,2	1156	702	1158	456	2,535	2,594	1,96	14,48	86,43	210	165	1,228	746,48
5.5/2			55,4	56,0	55,5	55,6	1155	703	1156	453	2,550					220	191	1,25	881,68
5.5/3			57,0	56,5	57,0	56,8	1152	700	1153	453	2,543					200	180	1,205	799,92
										ort.	2,543					210,00			809,36

EK-16 Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan Marshall tasarım grafikleri

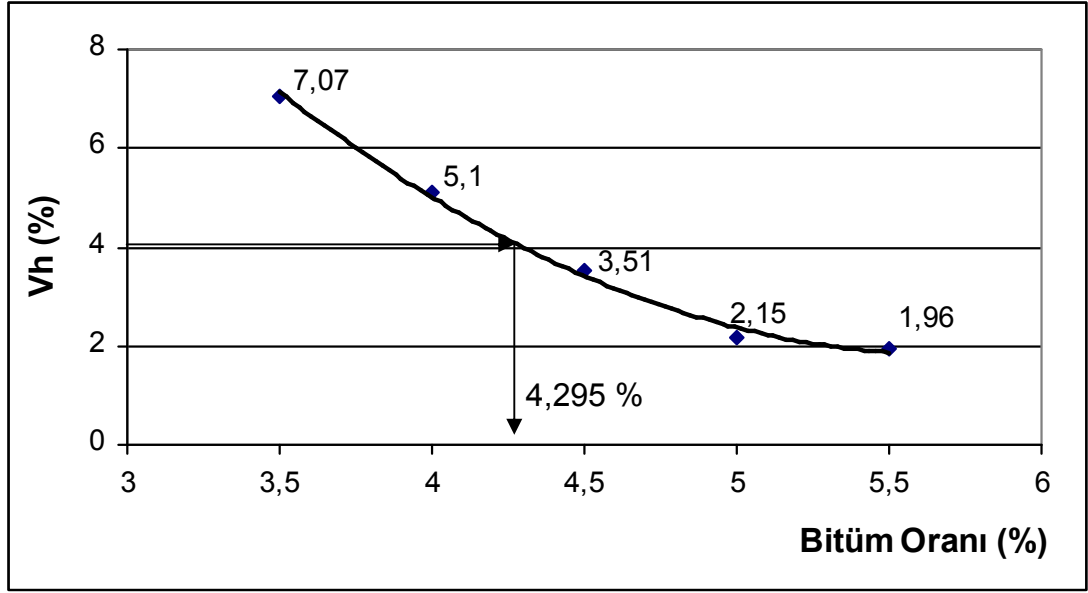


Şekil 16.1. Dp-Bitüm oranı grafiği

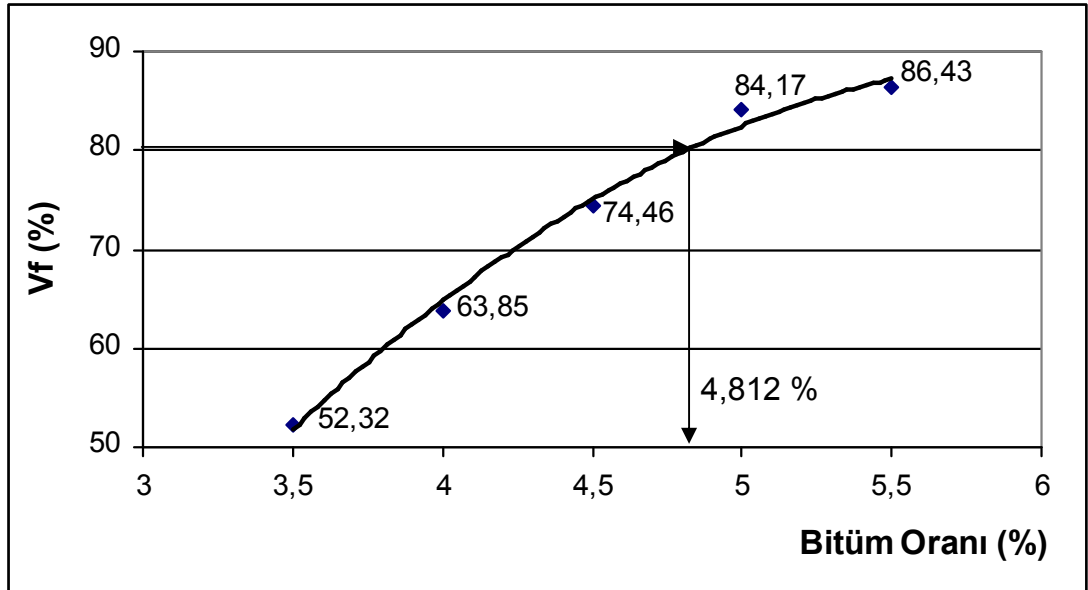


Şekil 16.2. Stabilité-Bitüm oranı grafiği

EK-16 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan Marshall tasarım grafikleri

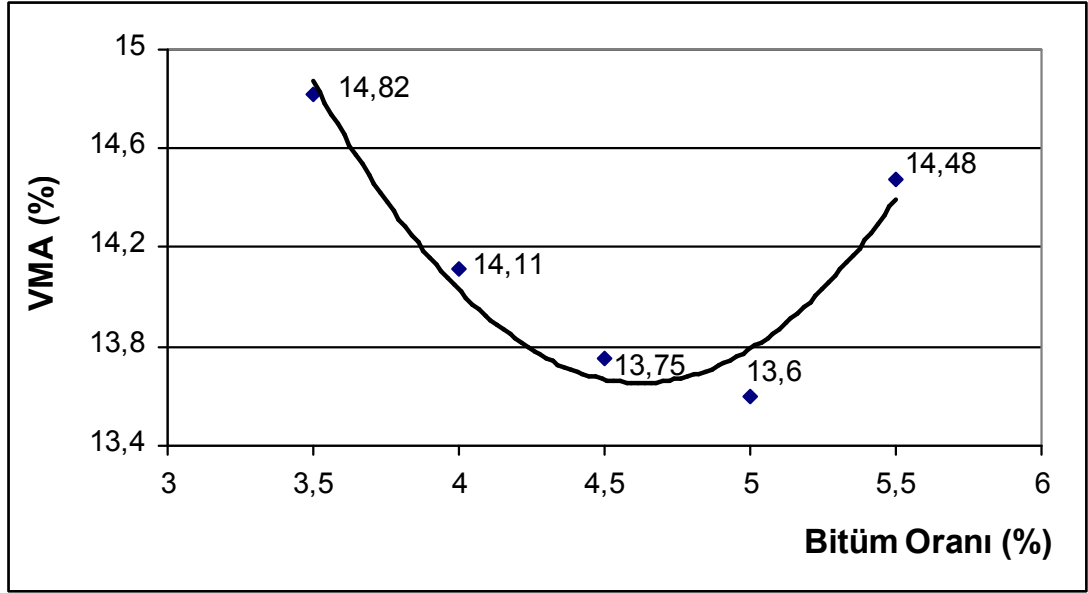


Şekil 16.3. Vh-Bitüm oranı grafiği

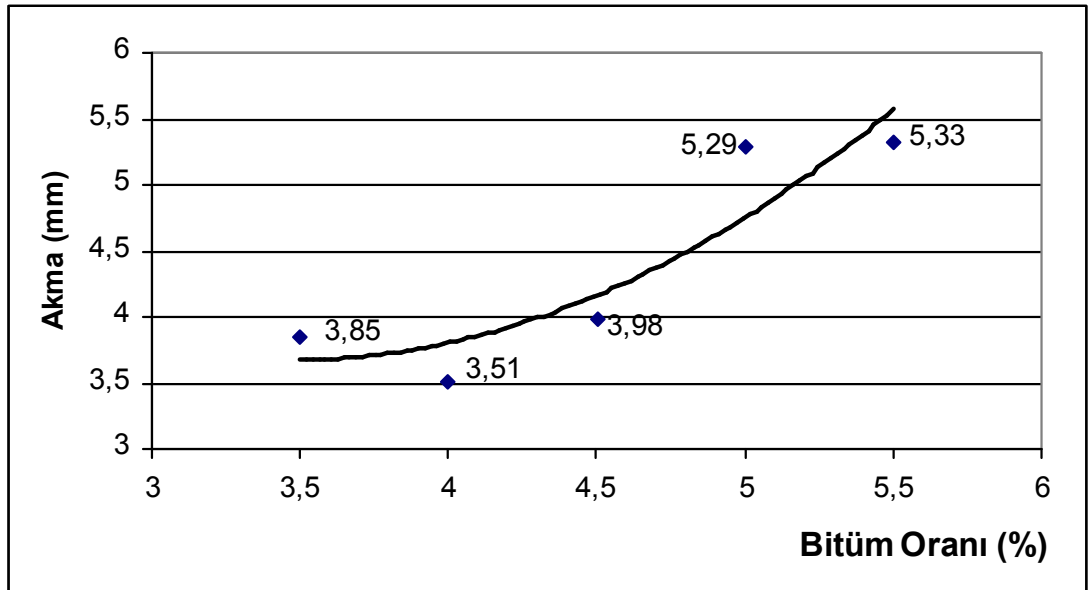


Şekil 16.4. Vf-Bitüm oranı grafiği

EK-16 (Devam) Optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan Marshall tasarım grafikleri



Şekil 16.5. VMA-Bitüm oranı grafiği



Şekil 16.6. Akma-Bitüm oranı grafiği

EK-17 Orijinal ve modifiye bitümlerle I.Grup üretimde (1.üretim günü) hazırlanan briketler ve bu briketlere ait ölçüm ve hesaplamalar

Çizelge 17.1. Orijinal bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1			55,8	55,9	55,7	55,8	1145	695	1146	451	2,539					280	174	1,243	797,60
4.8/2	4,8	52,8	55,5	55,3	55,1	55,3	1138	688,5	1139	450,5	2,526	2,621	3,32	14,22	76,62	120	195	1,263	909,88
4.8/3			55,9	55,6	55,4	55,6	1146	695	1147	452	2,535					200	197	1,25	909,75
										ort.	2,533					200			872,41

Çizelge 17.2. %2 MEGPB katkılı bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1			55,8	56,0	55,8	55,9	1144	697	1145	448	2,554					155	198	1,239	906,27
4.8/2	4,8	52,8	55,0	55,2	55,4	55,2	1144	694	1145	451	2,537	2,621	2,99	13,92	78,53	180	218	1,268	1022,66
4.8/3			56,6	56,8	56,6	56,7	1144	694	1145	451	2,537					160	190	1,209	847,85
										ort.	2,542					165			925,60

EK-18 Orijinal ve modifiye bitümlerle II.Grup üretimde (2.üretim günü) hazırlanan briketler ve bu briketlere ait ölçüm ve hesaplamalar

Çizelge 18.1. Orijinal bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1	4,8	52,8	55,6	55,6	55,9	55,7	1146	695	1148	453	2,530	2,621	3,46	14,34	75,85	140	190	1,246	874,16
4.8/2			55,5	55,4	55,6	55,5	1146	695	1149	454	2,524					150	176	1,254	814,15
4.8/3			56,2	56,3	56,4	56,3	1146	695	1147	452	2,535					165	168	1,224	757,75
										ort.	2,530					151,67			815,35

Çizelge 18.2. %3 OEÇB katkılı bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (B) (g)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1	4,8	52,8	55,7	56,0	56,1	55,9	1149	699	1150	451	2,548	2,621	3,10	14,02	77,88	160	162	1,239	739,36
4.8/2			55,1	55,0	55,2	55,1	1147	697	1148	451	2,543					160	199	1,272	935,48
4.8/3			56,0	56,0	55,8	55,9	1146	694	1147,5	453,5	2,527					175	170	1,239	776,45
										ort.	2,539					165			817,10

EK-18 (Devam) Orijinal ve modifiye bitümlerle II.Grup üretimde (2.üretim günü) hazırlanan briketler ve bu briketlere ait ölçüm ve hesaplamalar

Çizelge 18.3. %3 OEBAB katkılı bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1	4,8	52,8	55,8	56,0	56,0	55,9	1145	698	1146	448	2,556	2,621	2,81	13,76	79,56	165	170	1,239	776,45
4.8/2			55,0	55,0	54,9	55,0	1140	693	1142	449	2,539					180	175	1,276	823,86
4.8/3			55,6	55,6	55,6	55,6	1143	697	1146	449	2,546					180	195	1,25	900,39
										ort.	2,547					175			833,57

Çizelge 18.4. %3 OEKB katkılı asfalt ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1	4,8	52,8	56,6	56,5	56,5	56,5	1147	696	1148	452	2,538	2,621	2,91	13,84	79,01	190	161	1,216	720,87
4.8/2			55,1	55,4	55,4	55,3	1148	699	1150	451	2,545					170	198	1,263	924,06
4.8/3			55,6	55,9	55,9	55,8	1145	697	1146	449	2,55					160	208	1,243	955,75
										ort.	2,544					173,33			866,89

EK-19 Orijinal ve modifiye bitümlerle III.Grup üretimde (3.üretim günü) hazırlanan briketler ve bu briketlere ait ölçüm ve hesaplamalar

Çizelge 19.1. Orijinal bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1	4,8	52,8	56,0	56,0	56,0	56,0	1148	696	1149	453	2,534	2,621	3,39	14,27	76,27	110	174	1,235	792,39
4.8/2			55,4	55,8	55,5	55,6	1146	694	1147	453	2,530					200	154	1,25	708,61
4.8/3			56,5	56,3	56,5	56,4	1148	695	1148,5	453,5	2,531					115	175	1,22	787,19
										ort.	2,532					141,67			762,73

Çizelge 19.2. %3 OEMAGB katkılı bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1	4,8	52,8	56,4	56,6	56,4	56,5	1146	695,5	1147	451,5	2,538	2,621	2,95	13,89	78,73	140	164	1,216	734,52
4.8/2			56,3	56,0	56,2	56,2	1147	699	1148	449	2,555					145	181	1,228	820,00
4.8/3			55,4	55,1	55,2	55,2	1144	694	1145	451	2,537					140	206	1,268	965,72
										ort.	2,543					141,67			840,08

EK-19 (Devam) Orijinal ve modifiye bitümlerle III.Grup üretimde (3.üretim günü) hazırlanan briketler ve bu briketlere ait ölçüm ve hesaplamalar

Çizelge 19.3. %3 OEMANB katkılı bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1	4,8	52,8	55,4	55,8	55,7	55,6	1145	693	1146	453	2,528	2,621	3,23	14,13	77,17	145	169	1,25	778,77
4.8/2			55,7	56,0	55,7	55,8	1146	695	1147,5	452,5	2,533					145	159	1,243	727,83
4.8/3			55,7	55,8	55,6	55,7	1144	696	1145	449	2,548					110	190	1,246	874,16
										ort.	2,538					133,33			793,59

Çizelge 19.4. %3 OEÇFB katkılı bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1	4,8	52,8	56,5	56,5	56,5	56,5	1146	695	1149	454	2,524	2,621	3,34	14,23	76,51	205	172	1,216	770,92
4.8/2			55,5	55,5	55,5	55,5	1147	695	1147,5	452,5	2,535					130	175	1,254	809,46
4.8/3			55,6	55,3	55,6	55,5	1148	697	1149	452	2,540					160	183	1,254	847,00
										ort.	2,533					165,00			809,13

EK-20 Orijinal ve modifiye bitümlerle IV.Grup üretimde (4.üretim günü) hazırlanan briketler ve bu briketlere ait ölçüm ve hesaplamalar

Çizelge 20.1. Orijinal bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1			56,7	56,7	56,6	56,7	1148	696	1150	454	2,529	2,621	3,65	14,50	74,85	190	168	1,209	748,32
4.8/2	4,8	52,8	55,3	55,5	55,1	55,3	1141,5	691	1144	453	2,520					130	192	1,263	895,70
4.8/3			56,1	56,1	56,1	56,1	1147	695	1149	454	2,526					150	175	1,231	794,40
										ort.	2,525					156,67			812,80

Çizelge 20.2. %2 DEGPB katkılı bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

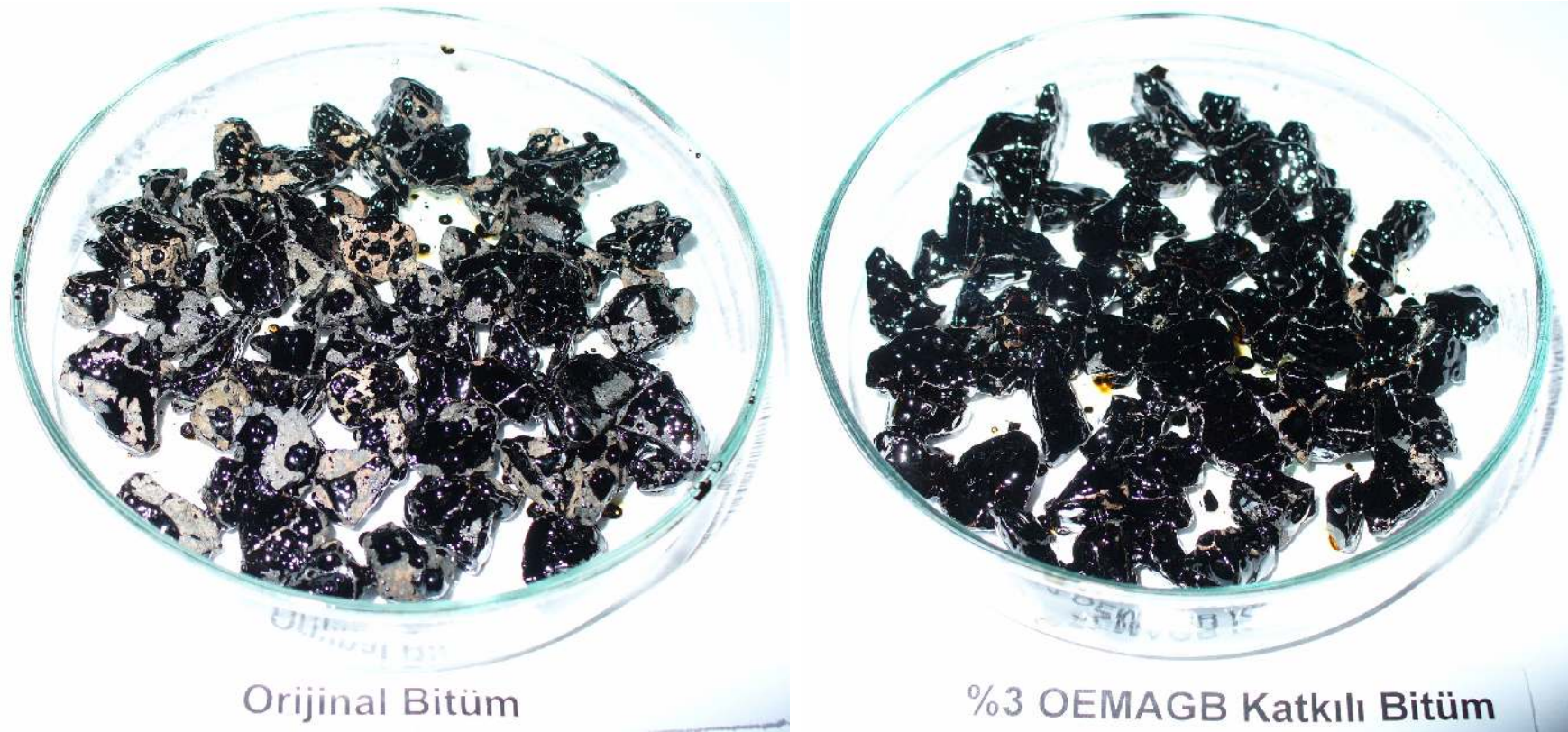
Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1			56,9	56,5	56,8	56,7	1148	696	1150	454	2,529	2,621	3,37	14,26	76,36	165	169	1,209	752,84
4.8/2	4,8	52,8	55,9	56,1	55,8	55,9	1147	697	1148	451	2,543					170	187	1,239	855,27
4.8/3			55,2	55,8	56,2	55,7	1147,5	694	1148,5	454,5	2,525					135	191	1,246	878,82
										ort.	2,532					156,67			828,98

EK-20 (Devam) Orijinal ve modifiye bitümlerle IV.Grup üretimde (4.üretim günü) hazırlanan briketler ve bu briketlere ait ölçüm ve hesaplamalar

Çizelge 20.3. %2 TEGPB katkılı bitüm ile hazırlanan Marshall briketlerine ait deney sonuçları

Briket no.	Bitüm %		Briket yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (g) (A)	Sudaki Ağırlık (g) (C)	DYK (g) (B)	Hacim (V)	Dp	Dt	Boşluk (Vh %)	VMA %	Vf %	Akma (1/1000)"	Stabilite	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	Wa	g	1	2	3	ort													
4.8/1	4,8	52,8	55,5	55,8	55,6	55,6	1145	692,5	1147	454,5	2,519	2,621	3,60	14,46	75,13	140	180	1,25	830,23
4.8/2			55,2	55,3	55,2	55,2	1145	695	1146	451	2,539					200	192	1,268	899,29
4.8/3			55,7	55,9	55,8	55,8	1147	693	1148	455	2,521					170	173	1,243	792,95
										ort.	2,527					170			840,82

EK-21 Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)



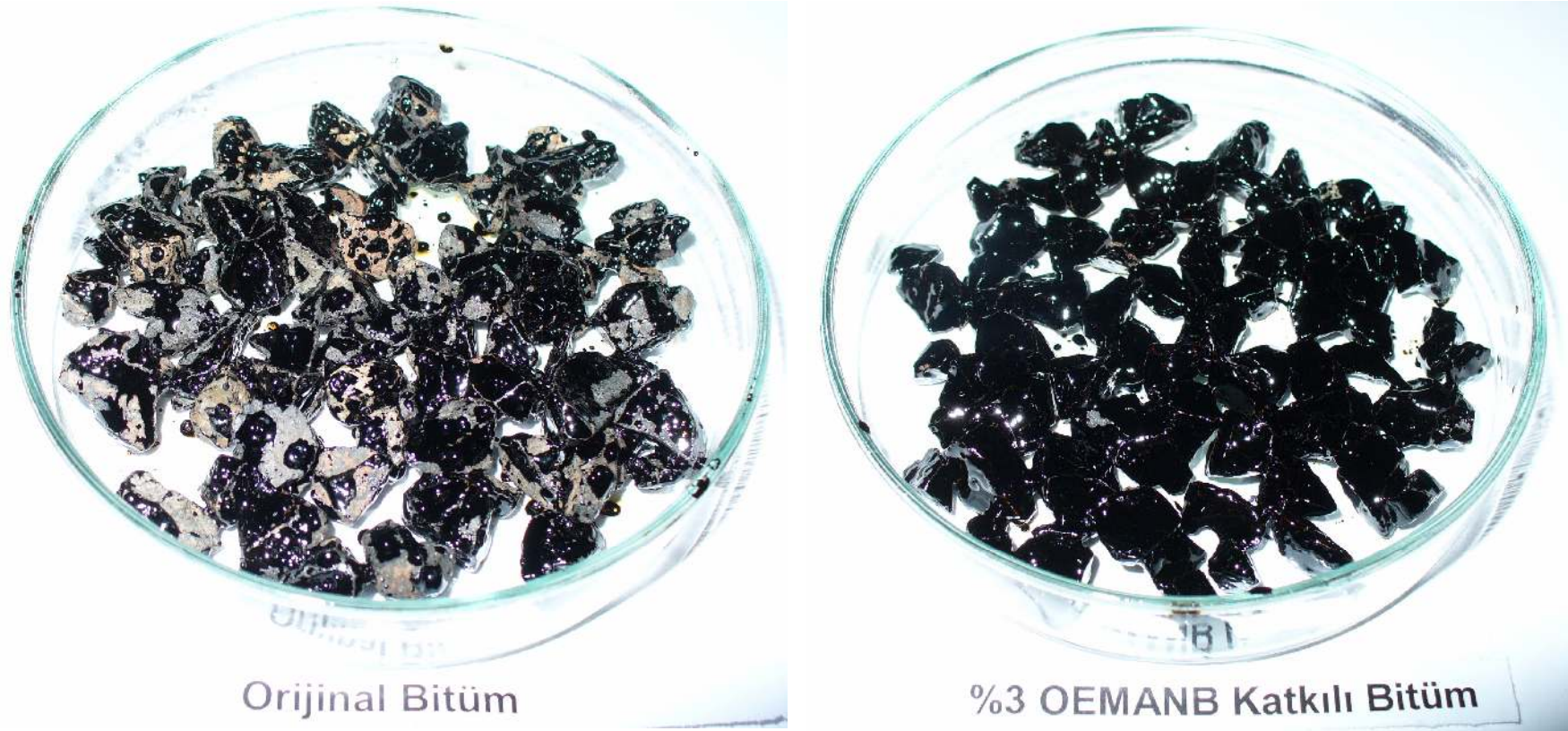
Resim 21.1. Orijinal ve OEMAGB katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-21 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)



Resim 21.2. Orijinal ve OEBAB katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-21 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)



Resim 21.3. Orijinal ve OEMANB katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-21 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)



Resim 21.4. Orijinal ve OEÇB katkıli bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-21 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)



Resim 21.5. Orijinal ve OEKB katkıli bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-21 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)



Resim 21.6. Orijinal ve OEÇFB katkıli bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-21 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)



Resim 21.7. Orijinal ve MEGPB katkıli bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-21 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)



Resim 21.8. Orijinal ve DEGPB katkılı bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-21 (Devam) Nicholson soyulma test sonuçları (Orijinal ve modifiye bitüm karşılaştırması)



Resim 21.9. Orijinal ve TEGPB katkıli bitümlerin Nicholson soyulma test sonuçları

EK-22 Superpave test cihazları



Resim 22.1. BBR test cihazı



Resim 22.2. DSR test cihazı

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ARSLAN, Deniz
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 16.05.1976 İstanbul
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 261 14 82
 Faks : 0 (312) 231 92 23
 e-mail : denizarslan@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Fen Bil. Enstitüsü	2004
Lisans	Gazi Üniversitesi/ İnşaat Müh. Bölümü	2000
Lise	Ankara Atatürk Anadolu Lisesi	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2001-Devam	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce