

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BOR İÇERİKLİ ORGANİK KATKIYLA MODİFİYE EDİLEN ASFALTIN  
PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Bahadır YILMAZ**

**MART - 2016  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BOR İÇERİKLİ ORGANİK KATKIYLA MOD İFİYE EDİLEN ASFALTIN PERFORMANS  
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**İnş. Yük. Müh. Bahadır YILMAZ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 / 02 / 2016**

**Tezin Savunma Tarihi : 28 / 03 / 2016**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Şeref ORUÇ**

**Trabzon 2016**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Bahadır YILMAZ Tarafından Hazırlanan**

**BOR İÇERİKLİ ORGANİK KATKIYLA MODİFİYE EDİLEN ASFALTIN  
PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 01 /03 /2016 gün ve 1642 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**DOKTORA TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK**

**Üye : Prof. Dr. Abdullah Hilmi LAV**

**Üye : Prof. Dr. Genççağa PÜRÇEK**

**Üye : Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR**

**Üye : Doç. Dr. Şeref ORUÇ**

  
The image shows four handwritten signatures in blue ink, each on a dotted line. The signatures are: 1. Fazıl Çelik, 2. Abdullah Hilmi Lav, 3. Genççağa Pürçek, and 4. Muhammet Vefa Akpinar. The fourth signature is partially obscured by the text 'Doç. Dr. Şeref ORUÇ'.

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, TÜBİTAK-1001 213M513/2014 nolu “Azot (N), Kükürt (S) ve Bor İçerikli Organik Katkılarla Asfaltın Modifiye Edilerek Asfalt Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi” başlıklı proje kapsamında yürütülmüştür. Aynı zamanda çalışmanın bir bölümü, KTÜ-BAP 11360/2014 nolu “Borik Asit İle Asfaltın Modifikasyonu ve Karışım Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması” başlıklı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Maddi desteklerinden dolayı TÜBİTAK kurumuna ve KTÜ-BAP birimine içtenlikle teşekkür ederim.

Yüksek lisans ve doktora tez danışmanlığımı üstlenerek çalışmalarımın yürütülmesi sırasında yönlendirmelerini ve desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen, bu çalışma kapsamında elde edilen verilerden çok sayıda yayın hazırlamamıza vesile olan, üzerimde çok büyük emeği olup her zaman yardımcı olan ve yol gösteren çok kıymetli hocam Doç. Dr. Şeref ORUÇ’a sonsuz teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Kendilerinden ders aldığım, aynı zamanda tez savunma sınavımda yer alarak bana önemli katkılar sağlayan değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Fazıl ÇELİK ve Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR’a ayrıca görüş ve önerileriyle tezime değer katan sayın Prof. Dr. Abdullah Hilmi LAV ve Prof. Dr. Genççağa PÜRÇEK’e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Proje ekibinde yer alan ve katkı maddesinin sentezlenmesini gerçekleştiren KTÜ Kimya Bölümü öğretim üyelerinden değerli hocam sayın Prof. Dr. Kemal SANCAK başta olmak üzere Dr. Esra DÜĞDÜ ve Arş. Gör. Fatih ÇELİK’e ayrıca yapısal analizlerde yardımcı olan Doç. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU, Yrd. Doç. Dr. Fatih ERDEMİR ve Dr. Bakiye ÇAKIR’a, desteklerini gördüğüm Prof. Dr. H. Hulusi ACAR, Prof. Dr. Habip ASAN, Prof. Dr. Ekrem YANMAZ, Yrd. Doç. Dr. Murat BOSTANCIOĞLU, Arş. Gör. Hakan Alper KAMİLOĞLU, Arş. Gör. Kübra AKŞEHİR, Arş. Gör. Ahmet KUVAT, Serdar SEZEN ve bütün arkadaşlarıma şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Annem Fatma YILMAZ, anneannem Hükmiye BAHADIR, dedem İbrahim Hakkı BAHADIR, dayılarım Yusuf, Salih ve Dr. Zeki BAHADIR’a, sevgili eşim Yrd. Doç. Dr. Gül KALELİ YILMAZ ve canım kızım Irmak Talia YILMAZ’a sonsuz teşekkür ederim.

*Bu tez çalışması; “Elim bir trafik kazası sonucu hayatlarını kaybeden babam Erdoğan YILMAZ, kardeşim Uzkam YILMAZ ve kuzenim Beyhan SEZER’ in anısınadır...”*

Bahadır YILMAZ

Trabzon 2016

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Bor İçerikli Organik Katkıyla Modifiye Edilen Asfaltın Performans zelliklerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. şeref ORUÇ’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

28/03/2016

Bahadır YILMAZ

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No</u></b>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	IX
SUMMARY .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Konunun Özgeçmişi .....	2
1.3. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol.....	16
1.4. Bitüm .....	18
1.4.1. Asfaltın Kimyasal Yapısı.....	19
1.4.2. Asfaltın Reolojisi .....	20
1.5. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler .....	21
1.5.1. Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri .....	22
1.5.1.1. Penetrasyon Deneyi .....	22
1.5.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi.....	22
1.5.1.3. Düktilite Deneyi .....	23
1.5.1.4. Parlama Noktası Deneyi .....	24
1.5.1.5. İnce Film Halinde Isıtma Deneyi.....	25
1.5.1.6. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi.....	26
1.5.1.7. Özgül Ağırlık Deneyi .....	26
1.5.1.8. Fraass Kırılma Noktası Deneyi.....	27
1.5.1.9. Nicholson Soyulma Deneyi.....	28
1.5.2. Superpave Bağlayıcı Deneyleri .....	28
1.5.2.1. Dönel Viskozite (RV) Deneyi .....	29
1.5.2.2. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi .....	31

1.5.2.3.	Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi .....	33
1.5.2.4.	Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi.....	35
1.5.2.5.	Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi .....	36
1.6.	Sıcak Asfalt Karışımlar .....	38
1.6.1.	Sıcak Asfalt Karışımların Özellikleri .....	38
1.6.1.1.	Sıcak Asfalt Karışımların Stabilitesi .....	38
1.6.1.2.	Sıcak Asfalt Karışımların Rijitliği.....	39
1.6.1.3.	Sıcak Asfalt Karışımların Dayanıklılığı .....	40
1.6.1.4.	Sıcak Asfalt Karışımların Yorulma Mukavemeti.....	40
1.6.1.5.	Sıcak Asfalt Karışımların Esnekliği .....	41
1.6.1.6.	Sıcak Asfalt Karışımların Geçirimsizliği .....	42
1.6.1.7.	Sıcak Asfalt Karışımların Kayma Direnci.....	42
1.6.1.8.	Sıcak Asfalt Karışımların İşlenebilirliği.....	43
1.6.2.	Sıcak Asfalt Kaplamalarda Oluşan Bozulmalar .....	45
1.6.2.1.	Deformasyonlar .....	45
1.6.2.1.1.	Tekerlek İzi Oluşumu .....	45
1.6.2.1.2.	Oturmalar ve Çökmeler .....	46
1.6.2.1.3.	Ondülasyonlar ve Kabarmalar .....	47
1.6.2.2.	Ayrışmalar .....	48
1.6.2.2.1.	Sökülmeler.....	49
1.6.2.2.2.	Soyulmalar.....	50
1.6.2.3.	Çatlaklar.....	51
1.6.2.3.1.	Timsah Sırtı Çatlaklar.....	51
1.6.2.3.2.	Düşük Isı Çatlakları.....	52
1.6.2.3.3.	Diğer Çatlaklar .....	53
1.7.	Sıcak Asfalt Karışımlarda Kullanılan Agregalar .....	54
1.7.1.	Agregaların Sınıflandırılması .....	55
1.7.1.1.	Agregaların Mineralojik Sınıflandırılması .....	55
1.7.1.2.	Agregalarda Boyut Sınıflandırması .....	55
1.7.1.3.	Agregalarda Gradasyon Sınıflandırması.....	57
1.7.1.4.	Agregalarda Biçim ve Yüzey Yapısı .....	58
1.7.1.5.	Agregalarda Porozite, Yüzey Alanı ve Boşluk.....	59
1.7.1.6.	Agregalarda Özgül Ağırlık .....	60

1.7.2.	Agregaların Fiziksel Özellikleri .....	61
1.8.	Sıcak Asfalt Karışımlara Uygulanan Deneyler .....	61
1.8.1.	Marshall Metodu ile Karışım Deneyi .....	62
1.8.2.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi .....	67
1.8.3.	Dolaylı Çekme Deneyi .....	69
1.8.4.	Statik Sünme Deneyi .....	72
1.8.5.	Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deneyi .....	73
1.8.6.	Dolaylı (İndirekt) Çekme Yorulma Deneyi .....	76
1.9.	Asfalt Modifikasyonu .....	78
1.9.1.	Asfalt Katkı Maddeleri ve Katkılı Asfaltlarda Aranılan Özellikler .....	79
1.9.2.	Asfalt Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması .....	80
1.10.	Yapısal Analiz Yöntemleri .....	85
1.10.1.	Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) .....	85
1.10.2.	Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) .....	85
1.10.3.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) .....	86
1.10.4.	Termogravimetrik Analiz (TG) .....	86
1.11.	Bor .....	86
2.	MATERYAL VE YÖNTEM .....	92
2.1	Asfalt Çimentosu .....	93
2.2.	Katkı Maddesinin Kimyasal Sentezi .....	94
2.3.	Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Hazırlanması .....	97
2.4.	Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi .....	98
2.4.1.	FT-IR Analizi .....	98
2.4.2.	SEM Analizi .....	99
2.4.3.	TG/DTG Analizleri .....	100
2.5.	Asfalt Bağlayıcıların Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	100
2.5.1.	Nicholson Soyulma Deneyinin Yapılışı .....	100
2.5.2.	DSR Deneyinin Yapılışı .....	101
2.5.3.	RV Deneyinin Yapılışı .....	101
2.5.4.	RTFOT ve PAV Deneylerinin Yapılışı .....	102
2.5.5.	BBR Deneyinin Yapılışı .....	102
2.6.	Sıcak Asfalt Karışımların Hazırlanması .....	102
2.7.	Sıcak Asfalt Karışımların Özelliklerinin Belirlenmesi .....	106



2.7.1.	Marshall Tasarımı .....	106
2.7.2.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinin Yapılışı .....	107
2.7.3.	Dolaylı Çekme ve Su Hasarı Deneylerinin Yapılışı .....	107
2.7.4.	Statik Sünme Deneyinin Yapılışı .....	109
2.7.5.	Dinamik Sünme Deneyinin Yapılışı .....	109
2.7.6.	İndirekt Çekme Yorulma Deneyinin Yapılışı .....	110
3.	BULGULAR VE İRDELEME .....	111
3.1.	Katkı Maddesinin Yapısal Analiz Sonuçları .....	111
3.2.	Orijinal ve Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Analiz Sonuçları .....	115
3.3.	Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deneş Sonuçları .....	122
3.4.	Düktilite Deneş Sonuçları .....	123
3.5.	Parlama Noktası Deneş Sonuçları .....	124
3.6.	Özgöl Ağırlık ve Trikloretilende Çözünürlük Deneş Sonuçları .....	124
3.7.	Fraass Kırılma Noktası Deneş Sonuçları .....	126
3.8.	Nicholson Soyulma Deneş Sonuçları .....	126
3.9.	Dinamik Kesme Reometrisi Deneş Sonuçları .....	128
3.10.	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneş Sonuçları .....	131
3.11.	Dönel Viskozimetre Deneş Sonuçları .....	134
3.12.	Basınçlı Yaşlandırma Kabini Deneş Sonuçları .....	137
3.13.	Eğilme Kiriş Reometrisi Deneş Sonuçları .....	139
3.14.	Marshall Tasarımına Göre Optimum Asfalt İçeriğinin Belirlenmesi .....	141
3.15.	Marshall Stabilite ve Akma Deneş Sonuçları .....	143
3.16.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneş Sonuçları .....	145
3.17.	Dolaylı Çekme Deneş Sonuçları .....	146
3.18.	Su Hasarı Deneş Sonuçları .....	150
3.19.	Statik Sünme Deneş Sonuçları .....	151
3.20.	Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deneş Sonuçları .....	153
3.21.	Dolaylı (İndirekt) Çekme Yorulma Deneş Sonuçları .....	155
3.22.	Sentezlenen Katkı Maddesi ile SBS Katkısının Kıyaslanması .....	157
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	159
5.	KAYNAKLAR .....	165
6.	EKLER .....	182

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

BOR İÇERİKLİ ORGANİK KATKIYLA MODİFİYE EDİLEN ASFALTIN  
PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Bahadır YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Şeref ORUÇ  
2016, 181 Sayfa, 23 Ek Sayfalar

Bu çalışmada, tamamen orijinal nitelikte yeni bir bor içerikli organik katkı maddesi, laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenmiş olup, asfalt üzerindeki performans özellikleri araştırılmıştır. Sentezlenen katkı maddesinin yapısal karakterizasyonu, Nükleer Manyetik Rezonans (NMR), Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ve Termogravimetrik (TG) analiz yöntemleri ile ortaya konulmuştur. Katkının asfalta ilave edilmesiyle oluşan modifiye asfalt bağlayıcıların morfolojik yapısı, modifikasyon mekanizması ve termal bozunma sıcaklıkları sırasıyla, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), FT-IR ve TG analizleriyle tespit edilmiştir. Fiziksel ve reolojik özellikleri ise, Dinamik Kayma Reometrisi (DSR), Dönel İnce Film Halinde Yaşlandırma (RTFOT), Dönel Viskozimetre (RV), Basınçlı Yaşlandırma Kabini (PAV), Eğilme Kirişi Reometrisi (BBR) ve geleneksel bağlayıcı deneyleriyle belirlenmiştir. Marshall dizaynına göre hazırlanan karışımların mekanik özellikleri, Marshall Stabilite ve Akma, Dolaylı Çekme, Su Hasarı, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Statik Sünme, Dinamik (Tekrarlı) Sünme, Dolaylı (İndirek) Çekme Yorulma ve Nicholson Soyulma deneyleri ile incelenmiştir. Deney sonuçlarından, katkının asfaltın kıvamını, tekerlek izi ve yaşlanma direncini, esneklik ve adezyon özelliğini, yük yayma kabiliyetini ve yorulma ömrünü artırdığı, sıcaklık hassasiyetini ve düşük sıcaklıklardaki çatlama eğilimini azalttığı tespit edilmiştir. Deneylerden elde edilen verilerin istatistiksel analiz sonuçları bu bulguları destekler nitelikte olup, asfaltın performans özelliklerine en iyi etki eden katkı oranının %6 olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Bor, Borat ester, Kimyasal sentez, Modifiye asfalt, Sıcak asfalt karışım

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF PERFORMANCE PROPERTIES OF MODIFIED ASPHALT BY  
BORON-CONTAINING ORGANIC ADDITIVE

Bahadır YILMAZ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Şeref ORUÇ  
2016, 181 Pages, 23 Pages Appendix

In this study, a novel boron-containing organic additive, which is completely original, was chemically synthesised in the laboratory condition and its performance features on the asphalt were assessed. The structural characterisation of the synthesised organic additive was investigated using nuclear magnetic resonance (NMR), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and thermogravimetry (TG) analysis methods. The morphologic structure, modification mechanism and thermal degradation behaviours of modified asphalt binders formed by adding the additive to the asphalt were determined by scanning electron microscopy (SEM), FT-IR and TG analysis. The physical and rheological properties were measured using dynamic shear rheometer (DSR), rolling thin film oven test (RTFOT), rotational viscometer (RV), pressure aging vessel (PAV), bending beam rheometer (BBR) and conventional binder experiments. Mechanical properties of mixtures prepared according to Marshall design were examined by the experiments of Marshall stability and flow, indirect tensile, moisture damage, indirect tensile strength, static creep, dynamic creep, indirect tensile fatigue, and Nicholson stripping. The results indicate that the additive increased the asphalt's consistence, rutting, aging resistance, flexibility, adhesion, loading spreading and fatigue life features and decreased temperature sensibility and cracking tendency at the low temperatures. Statistical analysis of the data obtained from experiments supports those findings, indicating that the best additive ratio to enhance the performance features of asphalt was 6%.

**Keywords:** Boron, Borate ester, Chemical synthesis, Modified asphalt, Hot mix asphalt

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1. Ham petrolden bitüm elde edilme süreci .....	19
Şekil 2. Asfaltın kimyasal yapısı ve bileşenleri .....	20
Şekil 3. Penetrasyon deneyi .....	22
Şekil 4. Yumuşama noktası deneyi .....	23
Şekil 5. Düktilite deneyi .....	24
Şekil 6. Parlama noktası deney aleti .....	25
Şekil 7. İnce film halinde ısıtma deneyi .....	26
Şekil 8. Fraass kırılma noktası deneyi .....	27
Şekil 9. Nicholson soyulma deneyi .....	28
Şekil 10. Brookfield viskozimetre deney aleti .....	30
Şekil 11. DSR deneyi deformasyon yönleri .....	31
Şekil 12. Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi .....	32
Şekil 13. Asfalt bağlayıcının viskoelastik özelliği .....	33
Şekil 14. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi .....	34
Şekil 15. PAV deneyi .....	36
Şekil 16. Kiriş eğme reometresi deney aleti .....	37
Şekil 17. Sünme oranı değerinin belirlenmesi .....	37
Şekil 18. Karışımların sıcaklık, gerilme ve yorulma ömrü ilişkisi .....	41
Şekil 19. Tekerlek izi oluşumu .....	46
Şekil 20. Kaplamada oturma (a) ve çökme (b) .....	47
Şekil 21. Kaplamada ondülasyon oluşumu .....	48
Şekil 22. Kaplamada ayrışma oluşumu .....	49
Şekil 23. Kaplamada sökülme oluşumu .....	50
Şekil 24. Kaplamada soyulma oluşumu .....	50
Şekil 25. Timsah sırtı çatlak .....	52
Şekil 26. Düşük ısı çatlakları .....	53
Şekil 27. Kaplamada oluşan çatlak tipleri .....	54
Şekil 28. Agregada gradasyon tipleri .....	58
Şekil 29. Agregaların yüzey yapısı sınıflandırması .....	58

Şekil 30.	Porozite sınıflandırması .....	59
Şekil 31.	Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimler.....	60
Şekil 32.	Marshall briketi üretimi .....	64
Şekil 33.	Briketlerin su banyosunda kür edilmesi ve Marshall deneyi.....	66
Şekil 34.	Dolaylı çekme mukavemeti deneyi .....	68
Şekil 35.	Asfalt Tester cihazı .....	70
Şekil 36.	Dolaylı çekme deneyi .....	70
Şekil 37.	Statik sünme deney düzeneği .....	73
Şekil 38.	Dinamik sünme deney düzeneği.....	74
Şekil 39.	Yük-zaman ve deformasyon ilişkisi .....	75
Şekil 40.	İndirekt çekme yorulma deney düzeneği.....	77
Şekil 41.	Temsili deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi .....	77
Şekil 42.	Bor cevheri görünümü .....	87
Şekil 43.	Türkiye'deki bor cevherlerinin yerleri .....	90
Şekil 44.	Borik asit.....	91
Şekil 45.	Borik asitin ısıtılmasıyla elde edilen HBO <sub>2</sub> (Metaborik asit) görünümü ....	91
Şekil 46.	Sentezlenen katkı maddesinin genel reaksiyon denklemi .....	94
Şekil 47.	Katkı maddesinin sentezlenme adımları.....	96
Şekil 48.	Agilent Teknoloji marka NMR spektrometresi .....	97
Şekil 49.	Modifiye asfalt bağlayıcıların üretilmesi.....	98
Şekil 50.	Perkin Elmer marka FTIR spektrometresi.....	99
Şekil 51.	SEM cihazı (a) ve iletken karbon bant üzerindeki asfalt numuneler (b) .....	99
Şekil 52.	TG/DTA cihazı (a) ve platinyum pota içerisindeki asfalt numunesi (b) .....	100
Şekil 53.	Nicholson soyulma deneyi için hazırlanan numuneler .....	101
Şekil 54.	Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi .....	104
Şekil 55.	Üretilen Marshall briketleri .....	107
Şekil 56.	Su hasarına maruz bırakılan numunelerin koşullandırma aşamaları .....	109
Şekil 57.	(3) nolu bileşiğin FT-IR spektrumu.....	111
Şekil 58.	(4) nolu bileşiğin FT-IR spektrumu.....	112
Şekil 59.	(3) nolu bileşiğin <sup>1</sup> H-NMR spektrumu .....	113
Şekil 60.	(4) nolu bileşiğin <sup>1</sup> H-NMR spektrumu .....	113
Şekil 61.	Katkı maddesinin TG/DTG eğrisi .....	114
Şekil 62.	Orijinal asfalt numunesinin FT-IR spektrumu.....	115

Şekil 63.	%6 katkı içeren modifiye asfalt numunesinin FT-IR spektrumu .....	115
Şekil 64.	SEM görüntüleri; (a) Orijinal asfalt, (b) %1 katkılı , (c) %2 katkılı, (d) %4 katkılı ve (e) %6 katkılı asfalt bağlayıcılar.....	118
Şekil 65.	Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılara ait TG/DTG eğrileri .....	120
Şekil 66.	Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılara ait termogram.....	121
Şekil 67.	Penetrasyon deney sonuçları .....	122
Şekil 68.	Yumuşama noktası deney sonuçları .....	123
Şekil 69.	Düktilite deney sonuçları.....	123
Şekil 70.	Parlama noktası deney sonuçları .....	124
Şekil 71.	Asfalt bağlayıcıların özgül ağırlık değerleri .....	125
Şekil 72.	%6 katkı içerikli asfalt bağlayıcının trikloretilende çözünmesi .....	125
Şekil 73.	Fraass kırılma noktası deney sonuçları.....	126
Şekil 74.	Nicholson soyulma deneyi sonrası sıkıştırılmamış karışımların görüntüsü .....	127
Şekil 75.	Karışımların soyulma direnci değerleri .....	127
Şekil 76.	G* değerleri .....	129
Şekil 77.	$\delta$ değerleri .....	129
Şekil 78.	G*/sin $\delta$ değerleri .....	130
Şekil 79.	RTFOT deneyi sonrası penetrasyon değerleri .....	132
Şekil 80.	RTFOT deneyi sonrası yumuşama noktası değerleri.....	132
Şekil 81.	RTFOT deneyi öncesi ve sonrası yumuşama noktası sıcaklık farkları.....	133
Şekil 82.	RTFOT sonrası G*/sin $\delta$ değerleri .....	134
Şekil 83.	Asfalt bağlayıcıların 90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklardaki viskozite grafiği.....	135
Şekil 84.	Logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği .....	136
Şekil 85.	PAV sonrası G*. sin $\delta$ değerleri .....	138
Şekil 86.	Sünme rijitliği (S) değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	139
Şekil 87.	Sünme oranı (m) değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	140
Şekil 88.	Dp, Vh, Vf ve stabilite değerlerini gösteren grafik eğrileri.....	142
Şekil 89.	Marshall stabilite-akma grafiği.....	144
Şekil 90.	Marshall oranı değerleri.....	145
Şekil 91.	Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları.....	146
Şekil 92.	Karışımların esneklik modülü değerleri, 5°C.....	147
Şekil 93.	Karışımların esneklik modülü değerleri, 25°C.....	148

Şekil 94.	Karışımların esneklik modülü değerleri, 40°C .....	148
Şekil 95.	Karışımların esneklik modülü değerlerinin sıcaklığa göre değişimi .....	150
Şekil 96.	Karışımların koşullu/koşulsuz esneklik modülü değerleri değişimi.....	151
Şekil 97.	Karışımların 25°C sıcaklıktaki deformasyon-zaman ilişkisi .....	152
Şekil 98.	Karışımların 25°C sıcaklıktaki sünme modülü-zaman ilişkisi .....	153
Şekil 99.	Karışımların 25°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi .....	154
Şekil 100.	Karışımların 25°C sıcaklıktaki sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi ....	154
Şekil 101.	Karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi, 25°C ve 300 kPa.....	155
Şekil 102.	Karışımların 4 mm deformasyona karşılık gelen yük tekrar sayıları .....	156
Ek Şekil 1.	Karışım tasarımı için Marshall grafikleri .....	182



## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Superpave bağlayıcı deneyleri kullanım amaçları ve parametreleri .....	29
Tablo 2. Bağlayıcı sınıfına göre PAV deneyinin uygulanma sıcaklıkları.....	35
Tablo 3. Sıcak asfalt karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler .....	44
Tablo 4. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri.....	56
Tablo 5. İnce agreganın özellikleri.....	57
Tablo 6. Mineral fillerin gradasyon limitleri.....	57
Tablo 7. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri.....	62
Tablo 8. Karışımın tolerans sınırları .....	63
Tablo 9. Malzemelerin karıştırma sıcaklıkları .....	64
Tablo 10. Asfalt betonu dizayn kriterleri .....	67
Tablo 11. Asfalt katkı maddelerinin genel sınıflandırması .....	81
Tablo 12. Polimer-polimer olmayan katkı maddeleri ve örnekleri .....	82
Tablo 13. Yaygın kullanılan bazı modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkisi.....	83
Tablo 14. Asfalt karışımlara eklenen kimyasal katkıların olumlu etkileri.....	83
Tablo 15. Yaygın kullanılan asfalt modifiyerlerin bozulmalar üzerindeki olumlu etkileri .....	84
Tablo 16. Borun çeşitli sanayi dallarındaki kullanımları .....	87
Tablo 17. Ticari öneme sahip bor mineralleri ve bileşikleri .....	88
Tablo 18. Bor minerallerinin kullanım alanları.....	88
Tablo 19. Türkiye’deki bor cevherlerinin yerleri ve cinsleri .....	89
Tablo 20. Orijinal asfalta ait fiziksel özellikler.....	93
Tablo 21. Agreganın fiziksel özellikleri.....	103
Tablo 22. Karışımlarda kullanılan agreganın granülometrisi ve şartname sınırları .....	105
Tablo 23. (3) ve (4) nolu bileşiklerin FT-IR spektrum verileri.....	112
Tablo 24. (3) ve (4) nolu bileşiklerin <sup>1</sup> H-NMR spektrum verileri .....	113
Tablo 25. Orijinal asfalt ve %6 katkı içeren modifiye asfalt numunelerinin FT-IR spektrum verileri .....	115
Tablo 26. Soyulma direnci değerleri.....	127



Tablo 27.	DSR deney sonuçları.....	128
Tablo 28.	RTFOT deneyi sonrası asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri .....	132
Tablo 29.	RTFOT deneyi sonrası DSR test sonuçları.....	133
Tablo 30.	RV deney sonuçları.....	135
Tablo 31.	Asfalt bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları .....	136
Tablo 32.	PAV deneyi sonrası DSR test sonuçları.....	137
Tablo 33.	BBR deney sonuçları .....	139
Tablo 34.	Orijinal asfalt bağlayıcıyla yapılan karışımların tasarım sonuçları ve şartname limitleri .....	141
Tablo 35.	Marshall stabilite deney sonuçları .....	143
Tablo 36.	Karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi .....	156
Tablo 37.	Sentezlenen katkı maddesi ile SBS katkısının asfalt üzerindeki etkilerinin kıyaslanması .....	158
Ek Tablo 1.	Karışım tasarımına ait Marshall föyü .....	183
Ek Tablo 2.	Orijinal asfalt karışımına ait Marshall Föyü .....	184
Ek Tablo 3.	%1 katkı içerikli asfalt karışımına ait Marshall Föyü.....	185
Ek Tablo 4.	%2 katkı içerikli asfalt karışımına ait Marshall Föyü.....	186
Ek Tablo 5.	%4 katkı içerikli asfalt karışımına ait Marshall Föyü.....	187
Ek Tablo 6.	%6 katkı içerikli asfalt karışımına ait Marshall Föyü.....	188
Ek Tablo 7.	Orijinal ve katkılı asfalt bağlayıcı içeren karışımlara ait dolaylı çekme mukavemeti föyü.....	189
Ek Tablo 8.	Orijinal asfalt karışımına ait dolaylı çekme föyü.....	190
Ek Tablo 9.	%1 katkı içerikli asfalt karışımına ait dolaylı çekme föyü. ....	191
Ek Tablo 10.	%2 katkı içerikli asfalt karışımına ait dolaylı çekme föyü .....	192
Ek Tablo 11.	%4 katkı içerikli asfalt karışımına ait dolaylı çekme föyü .....	193
Ek Tablo 12.	%6 katkı içerikli asfalt karışımına ait dolaylı çekme föyü .....	194
Ek Tablo 13.	Marshall stabilite düzeltme katsayıları .....	195
Ek Tablo 14.	Penetrasyon deneyi için Friedman Testi Two-Way ANOVA analizi sonuçları .....	196
Ek Tablo 15.	Yumuşama noktası deneyi için Friedman Testi Two-Way ANOVA analizi sonuçları .....	197
Ek Tablo 16.	Özgül ağırlık deneyi için Friedman Testi Two-Way ANOVA analizi sonuçları .....	197
Ek Tablo 17.	DSR deneyi için Friedman Testi Two-Way ANOVA analizi sonuçları .....	198

Ek Tablo 18. RV deneyi için Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları.....	198
Ek Tablo 19. RTFOT deneyi sonrası Penetrasyon testi için Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları.....	199
Ek Tablo 20. RTFOT deneyi sonrası Yumuşama Noktası testi için Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları.....	199
Ek Tablo 21. RTFOT deneyi sonrası DSR testi için Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları.....	200
Ek Tablo 22. RTFOT deneyi öncesi ve sonrası Penetrasyon değerlerinin karşılaştırılması.....	201
Ek Tablo 23. RTFOT deneyi öncesi ve sonrası Yumuşama Noktası değerlerinin karşılaştırılması.....	202
Ek Tablo 24. RTFOT deneyi öncesi ve sonrası DSR testi değerlerinin karşılaştırılması.....	202
Ek Tablo 25. Dinamik Sünme Deneyi Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları .....	203
Ek Tablo 26. Statik Sünme Deneyi Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları .....	203
Ek Tablo 27. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi Deformasyonlar Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları.....	204

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

A	: Numunenin kesit alanı
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
AC	: Asfalt Çimentosu
AP	: Amorf Polialfaolefin
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
B	: Bor
BBR	: Eğilme Kirişi Reometresi
DSC	: Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi
DSR	: Dinamik Kayma Reometrisi
EBA	: Etilen-Butil-Akrilat
EVA	: Etilen-Vinil-Asetat
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
HDPE	: Yüksek Yoğunluklu Polimer
LCPC	: Köprüler ve Yollar Merkez Laboratuarı (Fransa)
LDPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
MPE	: Maleik Anhidrit Aşılı Polietilen
NMR	: Nükleer Manyetik Rezonans
PAV	: Basınçlı Yaşlandırma Kabini
PG	: Performans Aralığı
PP	: Polipropilen
RTFOT	: Dönel İnce Film Halinde Yaşlandırma Deneyi
RV	: Dönel Viskozimetre
SBS	: Sitren-Butadien-Sitren
SEBS	: Sitren-Etilen-Butilen-Sitren
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TFOT	: İnce Film Halinde Yaşlandırma Deneyi
TG	: Termogravimetri
THF	: Tetrahidrofur
TYZ	: Tall Yağı Zifti
UV	: Ultraviyole

VMA	: Agregalar arası boşluk
YN	: Asfaltın yumuşama noktası sıcaklık değeri
%F	: Filler yüzdesi
%İ	: İnce agrega yüzdesi
%K	: Kaba agrega yüzdesi
°C	: Santigrat derece
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Bor trioksit
c	: Kohezyon
cP	: Santipoise
dk	: Dakika
D <sub>p</sub>	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
D <sub>t</sub>	: Gevşek kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı
E <sub>c</sub>	: Sünme modülü
ε <sub>c</sub>	: Toplam plastik (kalıcı) aksenal birim şekil değiştirme
E <sub>cq</sub> (t)	: t anındaki sünme modülü
E <sub>m</sub>	: Esneklik modülü
ε <sub>r</sub>	: Toplam elastik aksenal birim şekil değiştirme
F	: Maksimum düşey yük
G	: Numunenin başlangıç yüksekliği
g	: Gram
G*	: Kompleks kayma modülü
G <sub>b</sub>	: Asfalt özgül ağırlığı
G <sub>ef</sub>	: Agregada efektif özgül ağırlığı
G <sub>fa</sub>	: Filler zahiri özgül ağırlığı
G <sub>ia</sub>	: İnce agrega zahiri özgül ağırlığı
G <sub>ib</sub>	: İnce agrega hacim özgül ağırlığı
G <sub>ka</sub>	: Kaba agrega zahiri özgül ağırlığı
G <sub>kb</sub>	: Kaba agrega hacim özgül ağırlığı
G <sub>sa</sub>	: Agregada karışımının zahiri özgül ağırlığı
G <sub>sb</sub>	: Agregada karışımının hacim özgül ağırlığı
h	: Numune yüksekliği
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	: Borik asit
HBO <sub>2</sub>	: Metaborik asit

$H_y$	: Toplam yatay deformasyon
ITS	: Dolaylı çekme mukavemeti
$K, n$	: Asfalt karışımın özelliklerine ve kompozisyonuna bağlı katsayılar
$L_1$	: LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı
$L_{2n}$	: n darbe sayısındaki maksimum deplasman
$L_{3n}$	: (n+1). darbe uygulanmadan önceki deplasman
m	: Metre
m-değer	: Sünme oranı
mm	: Milimetre
mN	: Mili Newton
MPa	: Mega Pascal
N	: Azot
$N_f$	: Yorulma ömrü
$N_p$	: Çatlama ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı
P	: Maksimum yük
Pa	: Pascal
Pa.s	: Pascal-saniye
$P_{ba}$	: Absorbe edilen asfalt, agreganın ağırlıkça yüzdesi
$P_{be}$	: Efektif asfalt, agreganın ağırlıkça yüzdesi
Pen25	: Asfaltın 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değeri
PI	: Penetrasyon İndeksi
$P_{max}$	: Maksimum yük
$R_m$	: Rijitlik modülü
$r_p$	: Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı, mm)
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
S	: Sünme sertliği
$SiO_2$	: Silikon dioksit
sn	: Saniye
T	: Sıcaklık
t	: Yükleme süresi veya hızı
$TiO_2$	: Titanyum dioksit
$V_d$	: Düşey deformasyon
$V_f$	: Asfaltla dolu boşluk

$V_h$	: Toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşluğu
$W_a$	: Kuru agreganın yüzdesi olarak asfalt
ZnO	: Çinko oksit
$\delta$	: Faz açısı
$\delta_f$	: Bozulma anında toplam deformasyon
$\delta_i$	: Çatlak başladığı andaki toplam deformasyon
$\varepsilon$	: Şekil değiştirme (deformasyon)
$\varepsilon_c(t)$	: t anında oluşan toplam kalıcı deformasyon
$\sigma$	: Gerilme
$\tau$	: Kayma mukavemeti
$\nu$	: Poisson oranı
$\phi$	: İçsel sürtünme açısı

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Tüm dünyada, ekonomik kalkınma ve yaşam standartlarının yükselmesine bağlı olarak artan trafik hacimleri ve yükleri, bununla birlikte yol yapımında meydana gelen üretim hataları, yetersiz bakım, hava ve iklim koşullarının etkisi, asfalt kaplamalarda bozulmalara yol açmaktadır. Bu durum, karayollarının proje ömrünü ve konfor düzeyini düşürmekte, planlanan zamandan daha önce mevcut yollarda, bakım-onarım çalışmaları yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Ülkemizde, ulaşımın yaklaşık %95'i gibi büyük bir oranı karayollarından sağlanmakta ve karayollarının hizmet ömrünü tamamlamadan harcanan bakım-onarım masrafları, yapım maliyetlerini aşmaktadır. Bu da ülkemiz açısından önemli bir ekonomik kayıp olup, bunun önüne geçilebilmesi için mevcut asfalt kaplama malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Asfalt kaplamalar mineral agrega, asfalt ve havadan oluşan çok fazlı karmaşık bir yapıdır. Asfalt kaplamalarında genellikle bağlayıcı olarak kullanılan asfalt çimentosu, yalnızca %4-7 gibi düşük oranlarda olmasına rağmen kaplama performansı ve davranışı açısından büyük bir öneme sahiptir [1-5]. Asfalt, visko-elastik özelliğinden dolayı, iklim koşullarına bağlı olarak farklı davranışlar gösterir. Asfalt kaplamalarda, artan trafiğin etkisiyle yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu, orta sıcaklıklarda yorulma, düşük sıcaklıklarda çatlamlar görülür [6]. Oluşan bu deformasyonları azaltmak ve kaplama performansını iyileştirmek için asfalt çimentosuna ve/veya asfalt betonuna çok sayıda katkı maddeleri ilave edilerek modifikasyonlar yapılmaktadır [7]. Asfalt modifikasyonu ve özelliklerinin geliştirilebilmesi için çeşitli polimerler [8-10], karbon bazlı malzemeler [1,11-14] farklı hammaddelerden üretilmiş çeşitli modifiyerler ve atık malzemeler [7,15-17] kullanılmaktadır. Dünyada kullanılan modifiyerlerin ortalama %75'ini elastomerik katkılar, %15' ini plastomerik katkılar, geriye kalan %10'unu da kauçuk ve diğer katkılar oluşturmaktadır [18,19].

Dünya bor rezervlerinin önemli bir bölümü Türkiye'de bulunmasına rağmen hem üretimde hem de ekonomik boyutta ülkemizin aldığı pay, sahip olduğu bor rezervleriyle orantılı değildir. Bor temizlik maddelerinden uzay teknolojisine kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmasına rağmen bor tüketiminde ülkemizi ilk sıraya taşıyacak bir bor içerikli pazar

henüz oluşmamıştır. Bor türevlerinin 250'yi aşkın alanda kullanıldığı ve ülkemizin bor rezervleri açısından dünya genelinde ilk sırada olduğu dikkate alındığında, asfalt kaplamalarda da bor ürünlerinin kullanılabilirliğinin araştırılması büyük önem arz etmektedir.

## 1.2. Konunun Özgeçmişi

Bu güne kadar pek çok araştırmacı tarafından artan trafik yükleri, iklim ve çevre koşullarından dolayı asfalt kaplamalarda oluşan deformasyonları azaltmak ve kaplama performansını iyileştirmek için asfalta çok değişik tip ve oranda katkılar ilave etmek suretiyle asfalt modifikasyonunu esas alan çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Üç farklı özellikteki asfalta, Sitren-Etilen-Butilen-Sitren (SEBS), Etilen-Vinil-Asetat (EVA) ve Etilen-Butil-Akrilat (EBA) kopolimerleri ayrı ayrı %3, %6 ve %9 oranlarında 180°C, 125 rpm hız ve 2 saat karıştırma süresinde ilave edilmiştir. Elde edilen modifiye bağlayıcıların morfolojik, depolama stabilitesi, reolojik ve yaşlanma özellikleri incelenmiştir. Morfolojik yapının ve depolama stabilitesinin polimer içeriğine bağlı olarak değiştiği, %3 polimer içeriğine sahip numunelerde sürekli bir asfalt yapısı gözlenirken, %6 polimer içeriğinde ise sürekli bir polimer yapısı gözlemlendiği ve polimer içeriği arttıkça depolama stabilitesinin azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, polimer modifikasyonunun yüksek sıcaklıklardaki elastik tepkiyi artırdığı, düşük sıcaklıklardaki sünme rijitliğini azalttığı bildirilmiştir [20].

70/80 penetrasyonlu asfalta iki tip EVA katkısı ayrı ayrı %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında katılarak modifiye asfalt numuneleri elde edilmiştir. Karışım, 165°C'de 5 dk manuel olarak gerçekleştirildikten sonra 20 dk, 3000 rpm hızda mekanik karıştırıcı yardımıyla devam etmiştir. Karışımın homojen olması için ASTM 100 nolu elekten 165°C sıcaklıkta modifiye bağlayıcılar geçirilmiştir. Numunelere fiziksel ve mekanik testler yapılmıştır. Deney sonuçlarından, %5 EVA içeriğinin optimum içerik olduğu kaydedilmiştir [21].

EVA kopolimeri, benzer kıvama sahip ve kimyasal bileşimleri arasında az bir fark bulunan üç farklı asfalta (Orta doğu, Venezüella ve Rusya asfaltları) %3, %5 ve %7 oranlarında 170°C ve 185°C sıcaklıklarda katılmıştır. Yüksek parçalayıcı karıştırıcı yardımıyla karıştırılarak modifikasyon gerçekleştirilmiştir. Üretilen polimer modifiyeli



asfalt bağlayıcıların yapısal ve reolojik özellikleri floresan mikroskobu, diferansiyel taramalı kalorimetre ve dinamik kesme reometrisi deneyleriyle sorgulanmıştır. Deney sonuçlarından, reolojik ve sıcaklık hassasiyeti özelliklerinin iyileştiği, elastik davranışın arttığı, Rusya asfaltı ile yapılan modifikasyonun söz konusu özellikleri daha fazla artırdığı bildirilmiştir [8].

2000 ml yuvarlak deney şişesinde 600 gr asfalt akışkan hale gelene kadar ısıtılmıştır. Sıcaklık daha sonra 180°C'ye kadar çıkartılarak, asfalt ağırlığının %3, %5, %6, %7 ve %9 oranlarında Sitren-Butadien-Sitren (SBS) katkısı yavaş yavaş asfalta ilave edilmiş ve karışımın homojen olması için aynı sıcaklıkta 2 saat karıştırılmıştır. Daha sonra beş farklı oranda elde edilen modifiye asfalt örneklerine geleneksel bağlayıcı deneyleri ve Superpave deneylerinden dinamik kayma reometrisi (DSR) ve dönele viskozimetre (RV) testleri uygulanmıştır. Test sonucunda, katkısız asfalta göre kompleks modülünün (tekerlek izi dayanım parametresi) ve viskozitenin arttığı belirtilmiştir [22].

SBS polimerinin, yol asfaltlarının fiziksel ve reolojik özelliklerine etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan bir çalışmada, fiziksel özellikleri birbirine benzeyen ancak kimyasal ve fraksiyonel birleşimleri farklı olan iki tip asfalta, asfalt ağırlığının %3, %5 ve %7 oranlarında SBS katkısı 170-185°C sıcaklık aralığında ilave edilmiştir. Katkının ilavesiyle asfaltın fiziksel ve reolojik özelliklerinin iyileştiği, yüksek sıcaklıklardaki kompleks kayma modülü değerinin arttığı raporlanmıştır [23].

Sera filmlerinden (greenhouse films) geri dönüştürülmüş olan EVA kopolimeri, tetrahidrofur (THF) çözücüsü ile 72 saat ekstraksiyon yapılarak geride kalan kısım asfalt katkısı olarak kullanılmıştır. Bu katkı maddesi, iki farklı asfalta (60/70 ve 150/200 penetrasyon aralığında) %0-9 oranlarında ilave edilmiştir. Modifiye asfalt numuneleri 180°C sıcaklıkta, 1200 rpm hızda 6 saat karıştırılarak üretilmiştir. Elde edilen numunelere, DSR ve optik görüntüleme deneyleri yapılmıştır. DSR deneyi -10°C ve 75°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilerek modifiye asfaltın lineer viskoelastik davranışı incelenmiştir. Modifikasyonun asfaltın yüksek sıcaklıklarda oluşan kalıcı deformasyonunu azalttığı ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği yayınlanmıştır [24].

%5 asfaltten içeriğine sahip asfalta (Arjantin bölgesel ham petrolünden elde edilmiş), asfalt ağırlığının %5 oranında üç farklı tip SBS katkısı ayrı ayrı 180±0,5°C sıcaklıkta ilave edilmiştir. Elde edilen numunelere dönele ince film halinde yaşlandırma (RTFOT) ve basınçlı yaşlandırma kabini (PAV) deneyleri uygulanmıştır. SBS katkısının, asfaltın fiziksel ve reolojik özelliklerini iyileştirdiği kaydedilmiştir [25].

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) katkısı 60/70 penetrasyonlu asfalta, asfalt ağırlığının %1, %2, %3 ve %5 oranlarında, yüksek parçalayıcı mikser kullanılarak 180°C sıcaklık ve 8200 rpm karıştırma hızında ilave edilerek modifikasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen modifiye numunelerin morfolojik yapısı optik mikroskop ile görüntülenmiştir. Görüntüleme sonuçlarından, asfalt matrisi ile %1 ve %2 katkı oranlarında faz ayrılması olurken, %3 katkı oranında katkının asfalt matrisiyle uyum sağladığı ve bu uyumun %5 katkı oranında daha fazla olduğu belirtilmiştir. Ayrıca DSR cihazı vasıtasıyla frekans ve sıcaklık tarama ölçümleri yapılmıştır. Katkının asfaltın yüksek sıcaklıklardaki elastik özelliğini artırarak tekerlek izi direncini iyileştirdiği bildirilmiştir [26].

SBS ve sülfürün asfalt çimentosu üzerindeki mekanik davranışının incelenmesi için yapılan çalışmada, AC-10 (Pen:96 dmm, Yn:38°C) ve AC-20 (Pen:68 dmm, Yn:50°C) iki farklı asfalta, iki tip SBS katkısı (SBS-lineer ve SBS-radyal) asfalt ağırlığının %1, %3, %5 ve %7 oranlarında ayrı ayrı ilave edilmiştir. Karışım, 170°C sıcaklıkta 60 dakika devam ettikten sonra SBS ağırlığının %1, %3 ve %5 oranlarında sülfür ilave edilmiş ve aynı sıcaklıkta 60 dakika daha karıştırılmıştır. Elde edilen numunelere, penetrasyon, yumuşama noktası, depolama stabilitesi, elastik geri dönüş ve DSR deneyleri yapılmıştır. Sülfür ilavesinin, asfalt ve SBS arasındaki fiziksel ve kimyasal etkileşimi artırarak modifiye asfaltın reolojik ve elastik özelliklerini artırdığı belirtilmiştir [27].

Amorf polialfaolefin (AP), selüloz fiber, poliolefin, bitümlü selüloz, fiber ve SBS katkı maddelerinin asfalt kaplamalarda oluşan tekerlek izine karşı etkileri incelenmiştir. AP katkısı ganüler olarak doğrudan asfalt/agrega karışımına asfalt ağırlığının %6 oranında, selüloz fiber ve bitümlü selüloz ayrı ayrı olarak mineral agregaya ağırlığının %0.4 oranında, poliolefin katkısı toplam agregaya ağırlığının %0.6 oranında, SBS katkısı da asfalt ağırlığının %5 oranında asfalta katılmıştır. Farklı yükleme koşullarında ve sıcaklıklarda dolaylı çekme, dolaylı çekme dayanımı, statik ve dinamik sünme ve LCPC tekerlek izi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından, SBS katkısı ile üretilen karışımların tekerlek izine karşı en dayanıklı olduğu, ayrıca modifiyesiz karışımlara göre tüm modifiyeli karışımların kalıcı deformasyona karşı daha dirençli oldukları bildirilmiştir [28].

Tall yağı zifti (TYZ), Sitren-Butadien-Sitren (SBS) ve TYZ-SBS karışımından oluşan katkıları sırasıyla asfalta, asfalt ağırlığının %9 (TYZ); %3, %6, %9 (SBS); %8+%3, %8+%6, %8+%9 (TYZ+SBS) oranlarında 160°C sıcaklıkta ayrı ayrı katılmıştır. Karışım laboratuvar mikseri kullanılarak söz konusu sıcaklıkta 2 saat devam etmiş ve bu sürenin sonunda karıştırıcının hızı 500 rpm kadar artırılarak 30 dk daha sürdürülmüştür. Üretilen

modifiye asfaltlardan Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere farklı sıcaklık ve kür koşulları uygulanarak basınç dayanım deneyi, yorulma ömrü ve plastik deformasyon özelliklerinin belirlenmesi için tekrarlı yükler altında dolaylı çekme deneyi yapılmıştır. En iyi sonucu %8+%6 (TYZ+SBS) karışımının verdiği kaydedilmiştir [29].

Poliester reçine katkısı, AC-10 tipi asfalt bağlayıcıya asfalt ağırlığının %0.75, %1, %2 ve %3 oranlarında ayrı ayrı katılmıştır. Modifikasyon işlemi, 160°C sıcaklıkta 500 rpm hızda 20 dakika karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numunelerin fiziksel özellikleri geleneksel bağlayıcı deneyleri (penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, özgül ağırlık ve Fraass kırılma noktası testleri) ile belirlenmiştir. Daha sonra AC-5, AC-10 tipi asfalt numuneleri ve %0.75 oranında reçine ile modifiye edilmiş AC-10 modifiye asfaltı uygun gradasyona sahip kireçtaşı ile karıştırılarak Marshall briketleri üretilmiştir. Briketlere Marshall stabilite, dolaylı çekme mukavemeti, dolaylı çekme ve dinamik sünme deneyleri yapılmıştır. Dolaylı çekme deneyi 0°C, 20°C ve 40°C sıcaklıkta yapılmıştır. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi için iki grup briketten birinci grup 25°C sıcaklıkta 2 saat, ikinci grup ise hava boşluğu hacminin %55-80'i damıtılmış su ile vakum altında suya doyurulmuştur. -18°C sıcaklıkta 16 saat ve sonrasında 60°C sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat ve en sonunda 25°C sıcaklıktaki su banyosunda da 2 saat bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuştur. Birinci ve ikinci grup numunelerin dolaylı çekme mukavemet değerleri birbirine oranlanarak dolaylı çekme mukavemet oranı elde edilmiştir. Katkının, asfaltın Marshall stabilite değerini artırdığı, akma değerini azalttığı buna bağlı olarak yüksek rijitlik göstererek kaplamalarda oluşacak kalıcı deformasyonları azaltacağı yayınlanmıştır [30].

Yol kaplamalarında suyun etkisiyle oluşan hasarlar üzerine yapılan bir çalışmada; agrega tipi ve özellikleri, asfalt-agrega karışımı, trafik hacmi, çevre ve asfalta ilave edilen katkı maddelerinin özellikleri gibi birçok faktörün etkili olduğu belirtilmiştir. Bunun için farklı agrega tipleri kullanılarak (kireçtaşı ve bazalt-kireçtaşı karışımı) sıcak asfalt karışımların soyulma potansiyelleri ve su hassasiyet özellikleri üzerinde sönmüş kireç, SBS (Kraton D-1101) ve EVA (Evatane 2805) katkılarının etkileri araştırılmıştır. SBS katkısı asfalt ağırlığının %2-%6 oranlarında, EVA katkısı asfalt ağırlığının %3-%7 oranlarında ayrı ayrı asfalta katılmıştır. Sönmüş kireç katkısı ise agrega ağırlığının %1, %1.5 ve %2 oranlarında agrega gradasyonunda kullanılmıştır. Elde edilen karışım numunelerinin soyulma potansiyeli stereo mikroskop yardımıyla görüntülenmiş olup, su hassasiyet özellikleri ise Nicholson soyulma ve Modifiye Lottman deneyleriyle

değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarından, sönmüş kireç katkısının ve polimer modifikasyonunun asfalt karışımların su hasarına karşı direncini arttırdığı, SBS katkısıyla hazırlanan numunelerin EVA katkısıyla hazırlanan numunelere göre su hasarına karşı daha dirençli oldukları kaydedilmiştir [31].

Dört tip atık araç lastiği (tırtıklı lastik, ağır taşıt lastiği, kamyonet lastiği ve tarımsal araç lastiği) iki farklı parçacık boyutunda (60 ve 80 mesh) AH-70 tipi asfalta üç farklı oranda ayrı ayrı ilave edilmiştir. Modifikasyon  $180\pm 5^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 30 dakika, 700 rpm hızda karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelere, penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, DSR ve eğilme kirişi reometresi (BBR) deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre yapılan istatistiksel analizler ışığında, asfalt davranışında en çok etkiye sahip olan faktörün asfalta katılan araç lastiği miktarının olduğu belirtilmiş ve araç lastiği miktarı arttıkça yumuşama noktasının ve penetrasyon indeksinin arttığı, duktilite değerinin ise azaldığı ifade edilmiştir. DSR ve BBR deney sonuçlarına göre %20 oranında asfalta katılan tırtıklı araç lastiği ile modifiye edilen asfaltın daha iyi performansa sahip olduğu belirtilirken maliyet dikkate alındığında %15 oranında ağır taşıt lastiği ile modifikasyonun daha uygun olduğu ve atık araç lastiği modifikasyonunun asfaltın tekerlek izi dayanımını artırdığı beyan edilmiştir [32].

SBS, EVA ve EBA esaslı polimer katkıları, 50/70 penetrasyon dereceli asfaltla  $180-185^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta, 1000-1200 rpm karıştırma hızında, sırasıyla %2-%6, %3-%7 ve %2-%6 oranlarında ayrı ayrı ilave edilmiştir. Polimer modifiyeli asfalt numunelerinin morfolojik yapısı floresan ışık mikroskobu yardımıyla incelenmiştir. Çalışma sonucunda, düşük polimer oranında sürekli asfalt yapısı içinde polimer parçacıklarının dağılımı görülmekte iken, yüksek polimer oranında sürekli polimer fazının görüldüğü bildirilmiştir [33].

Piroliz (ısıl bozunma) edilen polipropilen (PP) katkısı, 50/60 penetrasyon dereceli asfalta asfalt ağırlığının %1, %3, %5 ve %7 oranlarında  $160^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 5 dakika süreyle karıştırılarak modifiye asfalt numuneleri elde edilmiştir. Modifiye asfalt numuneleri taş mastik asfalt üretimi için gerekli gradasyona sahip agrega ile karıştırılarak Marshall briketleri üretilmiştir. Briketlere Marshall stabilite, dolaylı çekme mukavemeti ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından PP modifiyeli asfalt karışımların performansının kontrol karışımına göre daha iyi olduğu, asfalt karışımların sıcaklık hassasiyetini azalttığı ve %5 PP katkı içeriğinin asfalt betonu karışımların performansını iyileştirmek için uygun olduğu beyan edilmiştir [34].

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve maleik anhidrit aşılı polietilen (MPE) katkıları asfalta asfalt ağırlığının %3 ve %5 oranlarında ayrı ayrı ilave edilmiştir. Elde edilen modifiye numuneler üzerinde, diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve DSR deneyleri yapılmıştır. Asfalt, 180°C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve bahsedilen oranlarda ilave edilen katkılarla 10 dk karıştırıldıktan sonra karışımın sıcaklığı 160°C'ye düşürülmüştür. Bu sıcaklıkta 40 dk daha karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonunda numuneler oda sıcaklığında soğutulmuş ve söz konusu deneylere tabi tutulmuştur. SEM sonuçlarına göre, MPE/asfalt karışımının LDPE/asfalt ve HDPE/asfalt karışımına göre asfalt matrisiyle daha fazla uyum sağladığı ve orijinal asfaltın elastik özelliğini diğer katkılara göre daha fazla artırdığı raporlanmıştır [35].

Performans aralıkları sırasıyla PG64-22, PG70-22 ve PG76-22 olan saf ve iki tip SBS modifiyeli asfalt, ısıtma sıcaklıkları ve sürelerinin reolojik özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, 143°C ve 185°C sıcaklıklarda 1/2, 2 ve 4 saat süreyle ısıtılmış ve numunelere RV, DSR, RTFOT, PAV ve BBR deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak ısıtma sıcaklıklarının ve sürelerinin numunelerin reolojik özelliklerini etkilediği, 143°C sıcaklığa kadar ısıtılan asfalt numunelerinin daha az yaşlandığı kaydedilmiştir [36].

Çimentonun asfalt üzerindeki etkisini araştıran bir çalışmada, 60/70 penetrasyon dereceli asfalta, asfalt hacminin (C/A) %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında portlant çimentosu katılmıştır. Çimento-asfalt numuneleri mekanik karıştırıcı yardımıyla 145°C-152°C sıcaklık aralığında karıştırılarak hazırlanmıştır. Elde edilen numunelere RV deneyi 135°C sıcaklıkta yedi farklı dönme hızında (5, 10, 20, 30, 50, 60 ve 100 rpm), DSR deneyi ise 58°C, 64°C, 70°C ve 76°C sıcaklıklarda 10 rad/s (1.59 Hz) frekansta uygulanmıştır. Deney sonuçlarından, portlant çimentosunun asfaltın viskozitesini ve tekerlek izi dayanımını artırdığı, C/A oranının asfalt bağlayıcının Newton davranışı üzerine önemli etkiye sahip olduğu ve %15 oranındaki çimento içeriğinin optimum olduğu bildirilmiştir [37].

Etilen-Vinil-Asetat (EVA) ve Maleik Anhidrit aşılı Etilen-Vinil-Asetat (EVA-g-MAH) kopolimer katkıları 50/70 penetrasyon dereceli asfalta asfalt ağırlığının %4, %5 ve %6 oranlarında ayrı ayrı katılmıştır. Modifiye asfalt numuneleri, yüksek parçalayıcı karıştırıcı yardımıyla 170°C sıcaklıkta, 3000 rpm hızda 40 dakika süre ile karıştırılarak elde edilmiştir. Üretilen numunelerin fiziksel özellikleri geleneksel bağlayıcı deneyleri ile ısı ve kimyasal yapı karakterizasyonları sırasıyla termogravimetri (TG) ve Fourier

dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca DSR deneyi yapılarak orijinal ve modifiye asfalt numunelerinin yüksek sıcaklık performansı değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarından, EVA-g-MAH modifiyeli asfaltın EVA modifiyeli asfalta göre daha az sıcaklık hassasiyeti gösterdiği, buna bağlı olarak düşük sıcaklıklarda oluşan kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. TG analizinden ısıl stabilitesinin yüksek olduğu ortaya konulmuştur [38].

PG64, PG70 ve PG76 sınıf asfalt bağlayıcılar, farklı oranlarda (%1, %2, %3 ve %4) Sasobit ticari ürün ile modifiye edilerek kısa süreli (RTFOT) ve uzun süreli (PAV) yaşlanmaya maruz bırakılmıştır. Yaşlanmanın, bağlayıcı tipinin, katkı oranının ve test sıcaklığının etkileri DSR ve RV deneyleriyle incelenmiştir. Reolojik özelliklerin bu etkenlere bağlı olarak değiştiği raporlanmıştır [39].

70/100 penetrasyon dereceli asfalt iki tip ticari vaks FT-Parafin ve Asphaltan-B katkıları kullanılarak modifiye edilmiştir. Katkı maddeleri ayrı ayrı olarak asfalt içerisinde kullanılmıştır. Saf asfalt ağırlığının %4 oranında kullanılan katkılar, 30 dakika 155°C sıcaklıkta asfalt içerisinde bekletildikten sonra karıştırma için aynı sıcaklığa sahip bir boya karıştırma kabının içerisine alınarak burada 90 saniye karıştırılmıştır. Modifiye bağlayıcıların, düşük sıcaklık davranışları DSR ve BBR deneyleri ile tespit edilmiştir. İki tip agregaya kullanılarak üretilen karışım numunelerinin davranışları ise dolaylı çekme, dolaylı çekme mukavemeti ve statik sünme deneyleri ile ortaya konulmuştur. DSR ve BBR deney sonuçlarından FT-Parafin modifiyeli asfalt bağlayıcının diğer numunelere göre -10°C sıcaklıkta daha fazla rijit olduğu, farklı agregaya tipi kullanımının ise düşük sıcaklıklardaki çatlama performansına önemli bir etkisi olmadığı dolaylı çekme ve sünme deneyleri sonuçlarından elde edilmiştir [40].

SBS katkısıyla modifiye edilen asfalt çimentosu taş mastik asfalt karışımı hazırlamak için kullanılmıştır. Marshall tasarımına göre hazırlanan numunelere tekrarlı sünme, dolaylı çekme mukavemeti ve LCPC tekerlek izi direnci deneyleri yapılmıştır. Marshall oranı değerleri dikkate alınarak, SBS katkısının tekerlek izi direncini artırdığı raporlanmıştır [41].

İki ultraviyole (UV) soğurucu ajan octabenzene ve bumetrizole, SBS ile modifiye edilmiş asfalta katılarak UV performansları ve DSR sonuçları değerlendirilmiştir. 180°C sıcaklığa kadar ısıtılan asfalta asfalt ağırlığının %3.5'i oranında SBS katkısı ilave edilerek yüksek parçalayıcı karıştırıcı yardımıyla söz konusu sıcaklıkta, 4000 rpm hızda ve 1 saat süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra oluşan karışıma asfalt ağırlığının %0.6 oranında UV

ajanı (octabenzene) ve %0.1 oranında sülfür ilave edilerek karışım mekanik karıştırıcı yardımıyla 2 saat daha devam etmiştir. Bu işlem diğer ajan içinde aynı şekilde yapılmıştır. Elde edilen modifiye asfalt numunelerine fiziksel deneyler (penetrasyon, duktilite ve dönel viskozimetre deneyleri), ince film halinde yaşlandırma (TFOT), DSR, UV spektroskopisi ve depolama stabilitesi testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında asfaltın fiziksel özelliklerinin iyileştiği, DSR deneyine göre octabenzene ajanının yüksek sıcaklıklarda yalnızca SBS ile modifiye edilmiş asfalta göre elastikiyetini artırdığı, bumetrizole ajanının ise orta sıcaklıklarda elastik tepkiyi ve yüksek sıcaklıklardaki viskoz tepkiyi artırdığı bildirilmiştir [42].

SBS katkısı, 180°C sıcaklığa kadar ısıtılmış saf asfalta (VG-30 tipi) asfalt ağırlığının %3, %5 ve %7 oranlarında topaklanma olmaması için yavaşça ilave edilmiştir. Karışım 1.5 saat ve 500 rpm hızda yüksek parçalayıcı karıştırıcı yardımıyla gerçekleştirildikten sonra ASTM 100 nolu elekten süzülerek homojenlik sağlanmak istenmiştir. Elde edilen modifiye asfalt numuneleri alüminyum kaplarda -25°C'de depolanmıştır. Numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık ve TFOT deneyleri yapılmıştır. Farklı oranlardaki modifiye asfalt numuneleri içerdikleri SiO<sub>2</sub> (silis) ve CaCO<sub>3</sub> (kalsiyum) oranlarına göre (asidik ve bazik) üç farklı tip agrega (mermer, granit ve kuvarsit) ile karıştırılarak briketler oluşturulmuştur. Numunelere Marshall stabilite, nem hassasiyeti ve tekerlek izi direnci testleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından, saf asfaltın bazik özellik taşıyan agregalarla daha iyi bağ yaptığı, asidik özellik gösteren agregalarla ise modifiye edilen asfaltın daha iyi bağ yaptığı ve mekanik özelliklerinin iyileştiği beyan edilmiştir [43].

60/70 penetrasyonlu bitüme %2, %4 ve %6 oranlarında EVA kopolimer katkısı ilave edilmiştir. Modifikasyon 180°C sıcaklıkta, 125 rpm hızda, 2 saat karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen modifiye bitüm numunelerine Superpave deneylerinden DSR ve BBR testleri yapılmıştır. Daha sonra, Marshall karışımı hazırlanarak briketler üzerinde dinamik sünme, dolaylı çekme-yorulma, dolaylı çekme-dayanım ve sünme uygunluk testleri yapılmıştır. DSR test sonuçlarına göre orijinal asfaltın tekerlek izi direnci parametresinin ( $G^*/\sin\delta$ ) EVA katkısıyla arttığı, BBR test sonuçlarına göre sünme rijitliğinin (S-değeri) azaldığı ve m-değerinin arttığı, dinamik sünme, dolaylı çekme ve yorulma testlerine göre ise tekerlek izi ve yorulma direncinin arttığı raporlanmıştır [44].

Bitümlü şist üretimi sırasında atık malzeme olarak ortaya çıkan bitümlü şist külü, 200 nolu elekten elenerek, asfalt hacminin %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında mekanik mikser yardımıyla 145°C-152°C sıcaklık aralığında karıştırılarak beş adet

modifiye asfalt numunesi elde edilmiştir. Bu numuneler üzerinde DSR deneyi yapılarak kompleks kayma modülü ve faz açısı değerleri bulunmuştur. Ayrıca modifiye bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları RV deneyine tabi tutularak belirlenmiştir. Katkı miktarının artmasıyla kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) ve viskozite değerlerinde artış olduğu ve tekerlek izi dayanımının arttığı görülmüştür. Faz açısı değerlerinde önemli bir değişim olmamıştır. Katkı maddesinin asfalt bağlayıcının reolojik özelliklerini iyileştirdiği ve yüksek sıcaklık performansını olumlu yönde etkilediği kaydedilmiştir [45].

Üç farklı asfalt çimentosunun orijinal ve yaşlandırılmış (RTFOT ve PAV) durumdaki örneklerine diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ve termogravimetri (TG) analizleri yapılarak sırasıyla camsı geçiş sıcaklık bölgeleri ve ısıl bozulmaları (kütle kayıpları) birbiriyle kıyaslanmıştır. Yaşlandırılmış asfalt bağlayıcıların camsı geçiş bölgelerinin, yaşlanmamış durumdaki bağlayıcılara göre daha yüksek olduğu, ısıl bozulmaların ise benzer özellikler gösterdiği tespit edilmiştir [46].

SBS polimer katkısı (Kraton D-1101) ve ılık asfalt karışımlarda kullanılan Sasobit katkı maddesi 50/70 penetrasyonlu asfalta, asfalt ağırlığının %2, %3 ve %4 oranlarında ayrı ayrı ve bahsi geçen oranlarda birlikte katılarak modifiye edilmiştir. Modifikasyon, 180°C sıcaklıkta, mekanik dört kollu mikser yardımıyla 1000 rpm hızda 1 saat karıştırılarak yapılmıştır. On altı adet modifiye numune elde edilmiş olup bu numunelere yumuşama noktası, DSR ve RV deneyleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerin penetrasyon indeksi değerleri hesaplanarak sıcaklık hassasiyetleri birbirine göre kıyaslanmıştır. Sıcaklık hassasiyeti bakımından Sasobit katkı maddesinin, SBS katkı maddesine göre daha iyi olduğu, SBS katkı maddesinin ise tekerlek izi dayanımına ( $G^*/\sin\delta$ ) göre Sasobit katkısından daha iyi olduğu bildirilmiştir. Her iki katkı maddesinin beraber kullanılması durumunda Sasobit'in, SBS katkısının elastik özelliğini artırdığı belirtilmiştir [47].

Polimer katkılarının, asfalta katılma miktarını azaltmak ve modifiye asfalt üretim maliyetlerini düşürmek için polifosforik asit katkısı; SBS, oksitlenmiş polietilen, propilen maleik anhidrit ve öğütülmüş araç lastiği katkıları ile birlikte ayrı ayrı kullanılarak modifiye asfalt numuneleri üretilmiştir. SBS, oksitlenmiş polietilen ve propilen maleik anhidrit katkıları literatürde yaygın olarak asfalt ağırlığının %3 oranında, öğütülmüş araç lastiği ise %10'u oranında optimum sonuçlar sağlarken, %3 polimer katkı içeriği %0.5 (asfalt ağırlığının) polifosforik asit kullanımı ile %2 polimer katkı oranına düşürülerek aynı performans özelliklerinin sağlandığı, %10 araç lastiği ve %0.5 polifosforik asit karışımının



diğer modifiye asfalt karışımlara göre viskozite değerinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Ayrıca polimer tipi, asfalt kaynağı ve test sıcaklıkların reolojik özellikleri etkilediği kaydedilmiştir [48].

Bitkisel atıkların asidik hidrolizi ile elde edilen furfuraldan üretilmiş furan reçinesi, 50/70 penetrasyon sınıfı asfalta, asfalt ağırlığının %2, %3, %4, %5, %6 oranlarında, 150°C sıcaklıkta ve 45 dakika süre ile karıştırılarak modifiye asfalt numuneleri oluşturulmuştur. Oluşturulan numuneler üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, DSR ve RV deneyleri yapılmıştır. Ayrıca karıştırma süreleri değiştirilerek (15 dk, 30 dk, 45 dk, 60 dk) yumuşama noktası üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Yumuşama noktası test sonuçlarından minimum kullanılacak katkı oranının %3'den fazla ve karıştırma süresinin ise 30 dakika veya üzeri bir sürede olması gerektiği bildirilmiştir. DSR ve RV sonuçlarına göre sırasıyla katkı maddesinin asfaltın elastik özelliğini iyileştirerek tekerlek izi dayanımını artırdığı, orijinal asfaltın performans aralığı sınıfını 64°C'den 76°C'ye yükselttiği ve işlenebilirliğini azalttığı ve bu işlenebilirliğin ise sınır limitlerin üzerinde olmadığı raporlanmıştır [49].

Geleneksel asfalt, öğütülmüş araç lastiği modifiyeli ve SBS modifiyeli asfaltlar laboratuvar ortamında yaşlandırılarak (RTFOT ve PAV deneyleriyle) yaşlanmanın, asfaltın yorulma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Yaşlanmamış ve yaşlandırılmış numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, Fraass kırılma noktası, elastik geri dönme, kuvvet ölçümlü düktilite, RV ve DSR deneyleri yapılmıştır. Ayrıca EBADE diye adlandırılan yeni bir test sistemi geliştirilerek bağlayıcılara tekrarlı yükler altında döngüsel bir çekme-basınç kuvveti uygulanmış ve yorulma davranışları incelenmiştir. Deney sonuçlarından, modifiyeli bağlayıcıların yaşlanmadan sonra fiziksel özelliklerinde geleneksel bağlayıcıya göre daha fazla bir değişim olduğu ve sıcaklığın yorulma davranışı üzerinde etkili bir rol oynadığı buna bağlı olarak modifiyeli bağlayıcıların yaşlandırıldıktan sonra bu durumdan daha çok etkilendiği yayınlanmıştır [50].

Aynı penetrasyona ve farklı kimyasal bileşime sahip iki tip asfalt (80/100 penetrasyon dereceli) lineer yapılı sitren-butadien oranı (20/80, 30/70, 40/60) farklı üç tip SBS kopolimeri ve Polisitren ile modifiye edilerek farklı polimer yapılarının asfaltın üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 175°C sıcaklığa kadar ısıtılan asfalta, asfalt ağırlığının %3'ü oranında bahsi geçen katkılar ayrı ayrı katılarak yüksek parçalayıcı karıştırıcı yardımıyla 4000 rpm hızda 30 dakika karıştırılmıştır. Karışımın homojen olduğundan emin olmak için üç saat daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Daha sonra elde edilen

modifiye asfalt numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık, duktilite, kinematik viskozite, DSR (frekans taraması) ve floresan mikroskopu deneyleri yapılmıştır. Sonuçlardan, %30 sitren içeren modifiye asfalt numunesinin en yüksek viskoziteye sahip olduğu buna bağlı olarak asfaltın viskoelastik özelliğine diğer katkılara göre daha fazla katkı sağladığı ve sıcaklık değişimlerinden daha az etkilendiği belirtilmiştir. Ayrıca sitren içeriğinin artmasıyla asfaltın kesme kuvveti hassasiyetinin ve asfalt matrisiyle katkı arasında oluşan uyumun azaldığı kaydedilmiştir [51].

Nano-ZnO (çinko oksit) inorganik madde kimyasal reaksiyonlarla modifiye edilerek KH-570-Nano-ZnO adında yeni bir madde elde edilmiştir. Bu iki maddenin (modifiyesiz ve modifiyeli) asfalt üzerindeki ultraviyole (UV) yaşlanma direncine ve fiziksel özelliklerine etkisi incelenmek istenmiştir. Bunun için Ssangyong-70 tipi asfalt  $150^{\circ}\text{C}\pm 5$  sıcaklığa kadar ısıtılmış ve katı maddeleri ayrı ayrı olarak asfalt ağırlığının %1, %2 ve %3 oranlarında asfalt içerisine katılmıştır. Laboratuvar tipi mikser kullanılarak karıştırma işlemi 4000 rpm hızda 60 dakika devam ettirilmiş daha sonra standart bir mikser kullanılarak karıştırma işlemi 1.5 saat daha sürdürülerek modifiye asfalt numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen numunelerin yapısal analizi FT-IR ve SEM, yaşlanma özellikleri TFOT ve UV deneyleriyle belirlenirken fiziksel özellikleri ise penetrasyon, yumuşama noktası, depolama stabilitesi ve RV deneyleriyle belirlenmiştir. Deney sonuçlarından, nano-ZnO katkısının asfalt matrisi içerisinde düzgün dağıldığı ve bu katkı maddesinin modifiye edilmesinin asfalt içerisindeki uyumluluğu artırdığı, yaşlanma öncesi ve sonrasında yumuşama noktası sıcaklık farklarının azaldığı ve iyi bir yaşlanma direnci gösterdiği bildirilmiştir [52].

50/70 penetrasyon dereceli asfalt, asfalt ağırlığının %5 oranında SBS katkı maddesiyle modifiye edilmiştir. Marshall tasarımına göre optimum asfalt içeriği belirlendikten sonra katkılı ve katkısız olacak şekilde oluşturulan sıcak asfalt karışımlar 50 metre uzunluğundaki ikinci sınıf bir yola yarısı katkısız, diğer yarısı SBS katkılı sıcak asfalt karışım olacak şekilde serilip sıkıştırılmıştır. Bir yıl süreyle dört farklı zaman periyotunda araç lastiklerinin geçtiği ve yolun banket kısımlarından karot numuneleri alınarak sıcaklık ve çevresel faktörlerin kaplama üzerindeki etkisi incelenmiştir. Karot numunelerine rijitlik modülü, dolaylı çekme mukavemeti, yorulma ve Marshall stabilite deneyleri yapılmıştır. Bir yılın sonunda alınan katkısız karışım karot numunelerinin rijitlik modülünün bir ayın sonunda alınan karot numunelerinden 2.8 kat, benzer şekilde SBS katkılı karot numuneleri için ise 3 kat fazla olduğu görülmüştür. Bir yılın sonunda katkısız karot numunelerinin stabilitesi %34 oranında, SBS katkılı karot numunelerinin ise %76

oranında artış göstermiştir. Kaplama sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasında oluşan sıcaklık farklarının genellikle sıcak havalarda fazla olduğu ve buna bağlı olarak toplam sıcaklık indeksi ile rijitlik modulu, stabilite, dolaylı çekme mukavemeti ve yorulma direnci değerleri arasında lineer bir ilişkinin olduğu belirtilmiştir [53].

İki tip nano boyuttaki malzeme  $TiO_2$  (Titanyum dioksit) ve  $SiO_2$  (Silikon dioksit) 60/70 penetrasyon dereceli asfalta  $TiO_2/SiO_2$  oranı asfalt ağırlığının %1/0.4, %3/1.2, %5/2 ve %7/2.8 olacak şekilde yüksek parçalayıcı karıştırıcı yardımıyla 4000 rpm hızda, 155°C sıcaklıkta 15 dakika karıştırılarak dört farklı modifiye asfalt bağlayıcı elde edilmiştir. Bu bağlayıcılara penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV ve DSR deneyleri yapılmıştır. Daha sonra, Marshall tasarımına göre bu dört modifiye ve katkısız bağlayıcının optimum asfalt içerikleri belirlenerek agrega (kırılmış kireç taşı) ile karıştırılmıştır. Ancak ince agrega olarak çelik cürufu kullanılmıştır. Karışım numunelerine Marshall stabilite ve akma, eksenel yükleme (Nottingham Asphalt Test) ve yorulma deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından, asfalta nano- $TiO_2$  ve nano- $SiO_2$  ilave edilmesinin asfaltın reolojik özelliklerini, dayanımını, viskozitesini, tekerlek izi direncini ve yorulma ömrünü iyileştirdiği tespit edilmiştir [54].

➤ Bor ve bor türevi ürünlerle yapılan asfalt modifikasyonlarına bakıldığı zaman;

Lentz [55] tarafından, asfaltlı malzemeden oluşan ürünlerin (çatı kaplaması, yol kaplaması vb.) adezyon ve kohezyon özelliğini iyileştirmek için bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmada asfalttan kastedilen petrolün katı, yarı-katı kalıntısı (çökelti) veya kömür katranıdır. Asfalta %0.25-%3 arasında değişen oranlarda borik asit katılarak penetrasyon ve yumuşama noktası arasındaki ilişkisi incelenmiştir. 177°C üzerindeki sıcaklığa sahip akışkan asfalta (okside asfalt) borik asit ilave edilmiş ve karıştırılmıştır. Sonuç olarak, borik asidin küçük bir miktar kullanılmasıyla asfaltlı malzemelerin yumuşama noktası ve penetrasyon ilişkisinin büyük oranda iyileştiği ve malzemenin hava etkisiyle oluşan aşınmaya karşı direncinin arttığı görülmüştür. Ayrıca çalışma sonucunda borik asitin, asfalt ya da asfaltlı malzemelerle kimyasal olarak reaksiyona girdiği ifade edilmiştir. Lentz bu ifadesinden tam olarak emin olmamakla beraber, bu inancını borik asitin asfaltan süzülerek (leaching) geri kazanılmaması gözlemine dayanarak, güçlendirmiştir.

Doyle vd. [56] tarafından yapılan çalışmada, asfalt çimentosunun yüksek sıcaklıklarda agrega ile karışımı sırasında oluşan düktilite kayıplarını azaltmak ve

kaplamadaki çatlak oluşumuna karşı direnci artırmak için, agrega ile asfaltın karışımı uygulamasından önce asfalt çimentosuna bor içerikli kimyasal ajanlar eklenmiştir. Kullanılan bor bileşimi gruplarından biri triborattır. Bu bileşik için 3 mol tetrahidrofurfuril alkol ve 1 mol borik asit orta sıcaklıkta ısıtılarak karışımdaki su uzaklaştırılmıştır. Reaksiyon ürünü triborat elde edilmiştir. Ayrıca farklı grupların reaksiyon ürünü olan diborat, tri-diborat ürünleride asfalta belirli oranlarda ilave edilmiştir. Sonuç olarak asfalt çimentosunda bu ajanlardan birinin kullanılmasıyla düktilite kayıplarının azalacağı beyan edilmiştir.

Boykin vd. [57] tarafından, asfaltlı bileşimlerin nötron tutucu olarak, radyasyon emen bariyerlerde, nötron yavaşlatıcılarda, reaktör kontrol ve nötron azaltma elemanlarında kullanılabilmesi için, asfalt bileşimine bor oksit/bor elementi emdirilmiştir. Bunun için borik asit kullanılmıştır. Asfalt akıcı olana kadar ısıtılmış ve kademeli olarak borik asit ilave edilmiştir (tercihen reaksiyonu hızlandırmak için borik asit ağırlığının % 0.2-% 0.8 ağırlığı oranında sülfirik asit ilave edilmiştir). Karışım sıcaklığı 210°C olacak şekilde ısıtılmıştır. Bu sıcaklığa ulaşıldığında gaz ve buhar çıkışının önemli derecede azaldığı görülmüştür. Borik asit bu sıcaklıklarda faz değiştirerek önce metaborik asite, sonra piroborik asite dönüşmüştür. Bu dönüşümler borik asitin su kaybetmesiyle oluşmuştur. Sonuç olarak, asfalta emdirilen borik asitin, asfaltla kimyasal bağ yaptığı ve asfalt bileşiminin %1-25 arasında bor oksit ya da bor elementi konsantrasyonu içerdiği belirtilmiştir.

Marzocchi vd. [58] asfaltı, cam fiber parçacıklarıyla (filler olarak katılmasıyla) güçlendirmeye çalışmıştır. Fakat cam fiberin yüksek oranda su seven özelliğe olması, asfaltla kimyasal veya fiziksel bağ yapmasını engellemiştir. Bu bağı oluşturmak için (asfaltın adezyon özelliğini iyileştirmek için) cam fiber parçacıkları organik metal bileşimlerinden bir ortoesterle kimyasal reaksiyona sokulmuş ve oluşan boratlı reaksiyon ürünü asfalt modifikasyonunda kullanılmıştır.

Laboratuar ortamında kimyasal olarak iki yeni katkı maddesi, organik esaslı kalsiyum ve organik esaslı borik asit bileşimleri sentezlenmiştir. 150°C'de katalize edilmiş yağlı ortamda abiyetik asit tuzu ile kalsiyum oksit tepkimeye sokulmuş ve organik esaslı kalsiyum bileşimi elde edilmiştir. Aynı uygulama kalsiyum oksit yerine borik asit kullanılarak yapılmıştır. Karışımın çözünürlüğünün artırılması için etil alkol ve katalizör olarak sülfirik asit ilave edilmiştir. Bu iki modifiyer saf asfalta, asfalt ağırlığının %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında ayrı ayrı katılmıştır. Üretilen modifiye bağlayıcılara

geleneksel ve superpave deneyleri yapılmıştır. Katkı kullanımıyla orijinal asfaltın viskozite ve yumuşama noktası değerlerinin azaldığı, düktilite değerlerinin arttığı ayrıca düşük sıcaklıklarda çatlama özelliğinin, marshall stabilite, soyulma direnci ve rijitlik modülü değerlerinin iyileştiği raporlanmıştır [59].

Kimyasal olarak laboratuvar ortamında sentezlenen bor içerikli dört adet katkı maddesi 50/70 penetrasyon dereceli asfalta, asfalt ağırlığının %1 oranında ayrı ayrı ilave edilmiştir. Modifikasyon işlemi, 150°C sıcaklıkta dört kollu mekanik karıştırıcı yardımıyla 800 rpm hızda, 15 dakika karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen modifiye asfalt numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV ve DSR deneyleri yapılmış ve saf asfalt bağlayıcıya göre değişimleri incelenmiştir. Deney sonuçlarından, katkı maddelerinin asfaltın fiziksel ve reolojik özelliklerini iyileştirerek tekerlek izi dayanımını artırdığı en çok iyileşmenin sülfürik asit katalizörlüğünde sentezlenen bor içerikli katkı maddesiyle sağlandığı bildirilmiştir [60].

Monoetilen ve dietilen glikol esaslı poliboron bileşikleri 50/70 penetrasyonlu asfalta asfalt ağırlığının %1, %2 %3 ve %5 oranlarında ayrı ayrı ilave edilmiştir. Modifikasyon işlemi, 110°C sıcaklıkta 1300 rpm karıştırma hızında 5 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Elde edilen modifiye numunelere yumuşama noktası, Marshall stabilite, Nicholson soyulma, RV, DSR ve BBR deneyleri yapılarak orijinal asfalt üzerindeki ve birbirleriyle olan değişimleri kıyaslanmıştır. Dönel viskozite deney sonuçlarına göre her iki katkının optimum miktarı %2 seçilmiştir. Dietilen glikol esaslı poliboron bileşiğinin asfaltın yumuşama noktası değerini ve tekerlek izi dayanımını artırdığı bildirilmiştir. Monoetilen glikol esaslı poliboron bileşiğinin asfaltın yumuşama noktası değerini çok az azalttığı, düşük sıcaklık çatlama direncini diğer katkıya göre artırdığı ve her iki katkının da Marshall stabilite değerine katkı sağladığı kaydedilmiştir [61].

50/70 penetrasyon dereceli asfalta borik asit katkısı asfalt ağırlığının %1, %3, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ilave edilmiş ve 150°C sıcaklıkta, 800 rpm hızda, 15 dk karıştırılarak modifiye asfalt numuneleri üretilmiştir. Modifiye asfalt numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından, borik asit katkısının asfaltın yumuşama noktası değerini artırdığı, penetrasyon ve düktilite değerlerini ise azalttığı bildirilmiştir [62].

### 1.3. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol

Bu çalışmada, ülkemizin önemli bir rezerve sahip olduğu bor ve bor türevlerinin, asfalt kaplamaların ana bileşeni olan asfalt çimentosunu modifiye etmek üzere katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması ve bor içerikli yeni bir asfalt katkısının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen katkı maddesiyle geleneksel asfaltın reolojik ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, artan trafik yükleri, iklim ve çevre koşullarından dolayı yol kaplamalarında oluşan kalıcı deformasyonların azaltılması ve karayollarının bakım-onarımı için harcanan emek ve mesainin düşürülmesi esas alınmıştır. Benzer şekilde, oluşturulan bor içerikli yeni katkı maddesi ile asfalt kaplama tabaka kalınlıklarının azaltılması ve yapım maliyetlerinin düşürülmesi ayrıca sıcak iklimlerde kullanılabilirliğinin yaygınlaştırılması öngörülmüştür. Diğer yandan bu çalışmadan elde edilecek sonuçların bu alanda çalışma yapan diğer araştırmacılara ışık tutması, büyük ölçüde bor rezervine sahip olan ülkemizin bu alanda önemli bir kullanım alanına kavuşması hedeflenmiştir.

Bilindiği gibi ülkemiz bor rezervi açısından dünya rezervinin yaklaşık % 75'ini oluşturarak, ilk sırada yer almaktadır. Borun çok sayıda bileşiği olmakla beraber teknik olarak büyük miktarlarda üretilen ve uluslararası pazarda söz sahibi olan beş ana bileşiği vardır. Sanayide kullanılmak üzere veya laboratuvar araştırmaları için üretilen diğer bor ürünleri ise genellikle bu 5 ana bileşikten üretilirler. Bunlar; Borik Asit ( $H_3BO_3$ ), Boraks Dekahidrat ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ), Boraks Pentahidrat ( $Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$ ), Susuz Boraks ( $Na_2B_4O_7$ ) ve Bor Oksittir ( $B_2O_3$ ). Ülkemizin bor rezervi açısından çok önemli bir yere sahip olması, çalışmamızda asfalta bor ve bor türevlerinin ilave edilerek modifikasyonunun yapılmasında büyük bir etken olmuştur.

Literatür özetlerinden anlaşılacağı üzere pek çok araştırmacı tarafından, asfalt kaplamaların ömrünü ve performansını iyileştirmek için asfalta polimer bazlı [8, 20-31, 33-36, 38, 41-44, 47, 48, 50, 51, 53] ve bazen bor bazlı [55-62] modifiyer katkılar ilave edilmiştir. Bu modifiyer katkılar, asfaltın bir takım özelliklerini iyileştirmiştir ancak, istenilen sonuçlara ulaşılmış değildir. En iyiye ulaşmak için yeni katkı maddelerinin üretilmesi bir zorunluluk haline gelmektedir. Ülkemiz için çok önemli bir ulusal kaynak olan bor, temizlik maddelerinden uzay teknolojisine kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmasına rağmen literatürde bor türevi ürünlerin asfalt kaplamalarda katkı olarak kullanılmasına ilişkin çok az sayıda çalışma vardır. Bu çalışmaların ortak özelliği bor

türevi ürünlerden borik asidin, yüksek sıcaklıklarda asfalta katılmasıdır. Asfaltın yoğun olarak hidrokarbon içeriğine sahip olması göz önüne alındığında, doğrudan borik asidin uygun bir moleküler etkileşimle asfalta bağlanması güçlükler içermektedir. Nitekim bu amaçla yapılan çalışmalarda borik asit ergime sıcaklığından (169°C) yüksek sıcaklıklarda, doğrudan asfalta tutundurulmaya çalışılmış ve bu sıcaklığın üzerinde [55-57] kısmen başarılmıştır. Ancak bahsedilen sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu uygulamalar özellikle asfaltın kütle kaybı yanında, oksidatif bozulmalara uğramasına yol açmaktadır [89]. Bu olumsuzlukların giderilmesi için borik asidin bazı bor triester türevlerine dönüştürülerek hidrokarbon içeriğinin asfalt ile etkileşime girebilecek özelliğe kavuşturulması amaçlanmıştır. Son yıllarda özellikle tribolojik alanda yapılan çalışmalara bakıldığı zaman motor yağlarında bor katkılarının kullanıldığı [90-93] ve bazı bor katkılarına ilave olarak N (azot) içerikli heterosiklik [94-97] ve triazol bazlı [98-101] yapıların yüksek ısıya dayanıklılığı artırdığı, oksidasyonu, sürtünmeyi ve aşınmayı azalttığı bildirilmektedir [102-111]. Öte yandan, bazı yağ asidi ve yüksek moleküllü hidrokarbon türevlerine adapte edilen bor bileşikleri, bu ürünlere ısıl stabilite, mekaniksel direnç, anti-bakteriyel ve anti-fungal özellikler, oksidatif direnç, esneklik ve yangın geciktirici gibi mükemmel özellikler kazandırmaktadır [112-117]. Buradan hareketle, asfalta aynı anda birden fazla özellik katarak, asfaltın mekanik ve reolojik özelliklerini iyileştireceğini ön gördüğümüz; bor (B) ve azot (N) koordinasyonundan oluşan yeni ve tamamen orijinal nitelikteki heterosiklik katkı elde edilip, asfalta muhtelif oranlarda ve belli sıcaklıkta katılmıştır. Böylece asfaltın reolojik ve mekanik özellikleri yanında modifiye asfalt ile üretilen asfalt karışımının bütün mekanik özellikleri test edilerek ortaya konulmuştur.

Kimyasal olarak laboratuvar ortamında sentezlenen organik yapıdaki bor içerikli katkı maddesinin Nükleer Manyetik Rezonans (NMR), Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) ve Termogravimetrik (TG) analiz yöntemleri ile karakterizasyonu yapılmıştır.

Sentezlenen katkı maddesi orijinal asfalt bağlayıcıya asfalt ağırlığının %1, %2, %4 ve %6 oranlarında ayrı ayrı katılmıştır. Modifikasyon 150°C sıcaklıkta, mekanik dört kolu mikser ile 1000 rpm hızda 15 dk karıştırılarak gerçekleştirilmiş olup, katkının bağlayıcı içerisinde homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır.

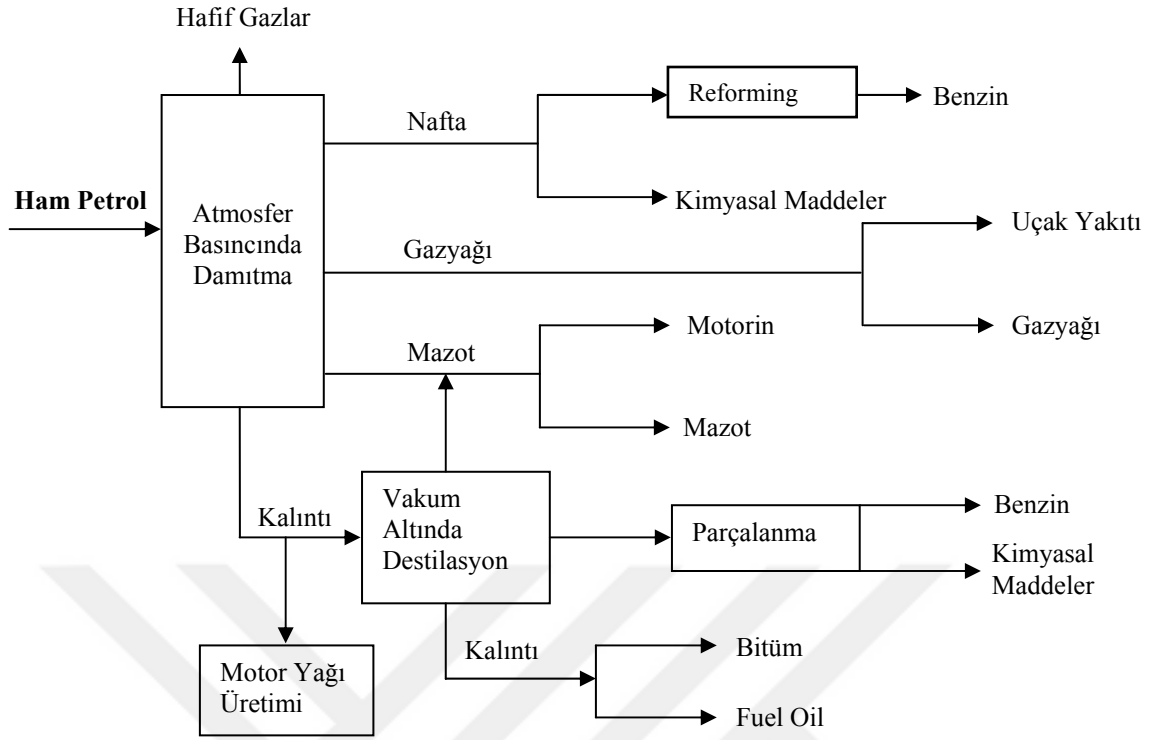
Elde edilen modifiye bağlayıcıların morfolojik yapısı, modifikasyon mekanizması ve termal bozunma sıcaklıkları sırasıyla Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), FT-IR ve TG deneyleri ile belirlenirken; kıvamlılığı, yumuşama noktası, sıcaklık hassasiyeti ve

kohezyon üzerindeki etkileri geleneksel bağlayıcı deneyleri ile yaşlanma karakteristiklerine olan etkileri RTFOT ve PAV, tekerlek izinde oturma ve yorulma parametreleri DSR, yüksek sıcaklıktaki işlenebilirlik ve pompalanabilirlik karakteristikleri RV ile düşük sıcaklık özellikleri ise BBR deneyleriyle belirlenmiştir. Modifiye bağlayıcılar ile hazırlanan sıcak asfalt karışımların stabilite, akma ve tekerlek izinde oturma özellikleri Marshall stabilite deneyi, çekme gerilmelerine karşı dayanımı dolaylı çekme mukavemeti deneyi, kaplamanın dinamik yükler altındaki esnekliği dolaylı çekme deneyi, durgun ve hareketli yükler altındaki deformasyon özellikleri statik ve dinamik sünme deneyleri, tekrarlı yükler altındaki yorulma direnci dolaylı (indirekt) çekme yorulma deneyi ve agrega-asfalt arasındaki adezyonun su etkisiyle ne derecede bozulduğu Nicholson soyulma deneyi ile belirlenmiştir.

#### **1.4. Bitüm**

Bitüm; temel olarak hidrokarbon ve türevlerini içeren, trikloretilen içerisinde çözünebilir, siyah veya koyu renkli, katı, yarı katı ya da viskoz, doğal ya da üretilmiş bağlayıcı maddedir [118-123]. Bitümler, asfalt ve katran olmak üzere iki grup altında ele alınır [124]. Katranlar bitkisel kökenli kömürden, asfaltlar ise hayvansal kökenli petrolden elde edilir [125]. Hem asfalt hem de katran, bitümlü bağlayıcı olarak adlandırılabilen bağlayıcı türleridir. Yol kaplamalarında sıklıkla kullanılan bağlayıcılar, ham petrolün rafinerilerde damıtılması sonucu katı ya da yarı katı olarak elde edilen ve asfalt çimentosu olarak adlandırılan petrol asfaltlarıdır (Şekil 1). “Asfalt”, “asfalt çimentosu”, “asfalt bağlayıcı” ve “bitüm” terimleri asfalt kaplamalarda sıklıkla birbirlerinin yerlerine kullanılmaktadır.





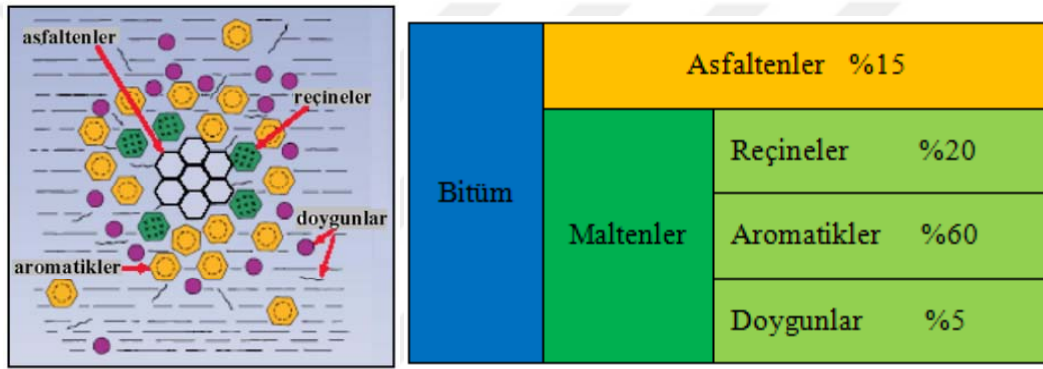
Şekil 1. Ham petrolden bitüm elde edilme süreci

#### 1.4.1. Asfaltın Kimyasal Yapısı

Asfalt, hidrokarbon moleküller ile az miktarda, yapısal olarak benzer heterosiklik türler ve oksijen, nitrojen ve sülfür atomları içeren fonksiyonel grupların kimyasal bir karışımıdır. Aynı zamanda asfalt, oksitler, inorganik tuzlar veya porfirin yapıları şeklinde ortaya çıkan vanadyum, nikel, demir, kalsiyum ve magnezyum gibi metaller de içerir. Farklı ham petrolerden elde edilen asfaltların analiz sonuçları genel olarak; %82-88 oranında karbon, %8-11 oranında hidrojen, %0-6 oranında sülfür, %0-1.5 oranında oksijen, %0-1 oranında nitrojen elementlerini içermektedir [123].

Kimyasal yapısı oldukça karmaşık olan asfaltın, n-heptan'da çözünen kısmına maltenler, çözünmeyen kısmına ise asfaltın denir. Asfaltın, karbon ve hidrojen oluşmuş, bir miktar sülfür, nitrojen ve oksijen içeren, n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah ya da kahverengi amorf katılardır. Asfaltın bitümün %5'i ile %25'ini oluştururlar. Asfaltın miktarının artması sonucu daha katı, daha yüksek yumuşama noktasına sahip ve daha yüksek viskoziteli bir bitüm elde edilmektedir. Maltenler ise kendi içinde reçineler, aromatikler ve doymuşlar olmak üzere alt gruplara ayrılırlar. Reçineler, n-heptan içerisinde

çözünebilir olup, asfaltın gibi geniş oranda hidrojen ve karbondan oluşurlar ve az miktarda sülfür, nitrojen ve oksijen içerirler. Reçineler, asfaltın ayırıcı veya yayılmasını sağlayan katkıları olup, reçinelerin asfaltın oranı, asfaltın jelatin (GEL) tipi ya da çözelti (SOL) tipi olma özelliklerini kontrol etmektedir. Aromatikler, toplam asfaltın %40'ı ile %65'ini oluşturan koyu kahverengi renkli viskoz yağ şeklindeki sıvılardır. Asfalt içerisindeki en düşük molekül ağırlıklı bileşenler aromatiklerdir. Doygunlar ise ortalama molekül ağırlığı aromatiklere benzeyen, hem parafinli hem de parafinsiz bileşenlerden oluşan ve asfaltın %5 ile %20'sini oluşturan viskoz yağlardır [5, 123]. Asfaltın kimyasal yapısı ve bileşenleri Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Asfaltın kimyasal yapısı ve bileşenleri [126].

#### 1.4.2. Asfaltın Reolojisi

Bir maddenin akma ve deformasyonunu, sadece maddeye uygulanan yüke değil ayrıca yükün uygulanma sürecini de dikkate alarak belirlemeye çalışan bilim dalı reolojidir. Asfalt reolojisi ise belirli bir sıcaklıkta hem kimyasal bileşenlerinin hem de baskın hidrokarbon yapıların saptanması ve bileşimindeki ya da yapısındaki değişikliklerin etkisinin incelenmesidir. Asfalt reolojik bir malzeme olduğu için trafik yükleri altında yükleme zamanı, sıcaklık ve yükün şiddetine bağlı olarak visko-elastik ve termo-plastik özellik gösterir. Bu malzemeler yüksek yükleme hızlarında veya düşük sıcaklıklarda elastik, orta yükleme hızlarında veya orta sıcaklıklarda visko-elastik, düşük yükleme hızlarında veya yüksek sıcaklıklarda viskoz davranış gösterirler. Bu nedenle sıcak havalarda veya yavaş hareket eden ağır taşıtların altında asfalt kaplamalar viskoz sıvılar gibi hareket ederek akarlar. Eğer akmaya karşı direnç çok düşükse yüksek ısı veya ağır yük

nedeniyle kaplamalarda tekerlek izi oluşabilir. Düşük sıcaklıklarda ise asfalt kaplamalar termo-plastik özelliklerinden dolayı çok sert ya da kırılğan hale gelebilir ve kaplamalarda çatlaklar görülebilir [127-131].

### 1.5. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Asfalt bağlayıcılara ait özellikler kaplamaların dayanımı ve performansı üzerinde çok önemli etkilere sahiptir. Bu özelliklerin tespit edilmesi için dünya genelinde ve Türkiye’de kullanılmakta olan çok sayıda deney yöntemi bulunmaktadır. Bu deneyleri iki grup altında toplamak mümkündür. Bunlardan birincisi ülkemizde Karayolu Teknik Şartnamesi’nde yer alan ve asfalt çimentosuna uygulanan geleneksel deneyler, ikincisi ise Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı tarafından geliştirilen “Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave)” şartnamesinde bulunan performans esaslı bağlayıcı deneyleridir [132-134]. Her iki grupta yer alan bağlayıcı deneyleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- *Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri*

Penetrasyon deneyi

Yumuşama noktası deneyi

Düktilite deneyi

Parlama noktası deneyi

İnce film halinde ısıtma deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)

Trikloretilende çözünürlük deneyi

Özgül ağırlık deneyi

Fraass kırılma noktası deneyi

Nicholson soyulma deneyi

- *Superpave Bağlayıcı Deneyleri*

Dönel viskozite deneyi (Rotational Viscosimeter, RV)

Dinamik kayma reometresi deneyi (Dynamic Shear Rheometer, DSR)

Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)

Basıncılı yaşlandırma kabı deneyi (Pressure Aging Vessel, PAV)

Kiriş eğme reometresi deneyi (Bending Beam Rheometer, BBR)

### 1.5.1. Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri

Bu bölümde, asfalt bağlayıcılara uygulanan geleneksel deney yöntemleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

#### 1.5.1.1. Penetrasyon Deneyi

Penetrasyon deneyi, asfaltın sertliğini yani kıvamını belirlemek amacıyla uygulanan bir deney yöntemidir. Kelime olarak penetrasyon batma anlamına gelmektedir. Standart bir iğnenin, 100 g ağırlık altında 25°C sıcaklıkta asfalt numunesine 5 saniye süreyle batma miktarıdır [135]. Penetrasyon değerinin artması asfalt numunesinin kıvamının azaldığı yani yumuşadığı, azalması ise kıvamının arttığı yani serleştiği anlamına gelmektedir [11, 119, 121, 129, 136]. Penetrasyon deney aleti ve deneyin yapılış adımları Şekil 3’de gösterilmiştir.

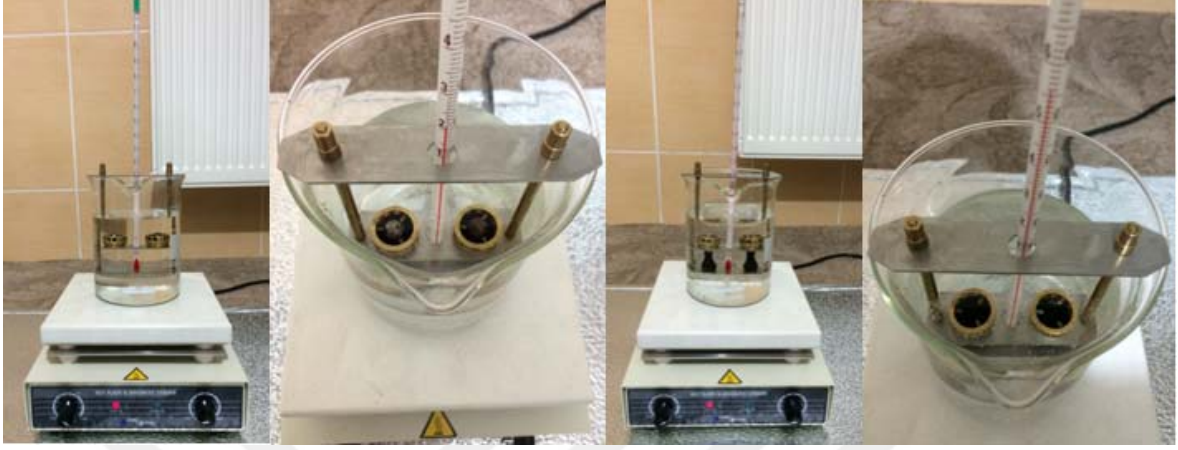


Şekil 3. Penetrasyon deneyi

#### 1.5.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi

Asfaltın sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılığını ve hangi sıcaklıkta akmaya başladığını ölçmeye yarayan deneylerden biri yumuşama noktası deneyidir. Bu deneyde standart halkalar içerisine konulan asfalt numunesi üzerine 3.5 g ağırlığındaki bilyeler yerleştirilir ve numuneler bir su banyosu içerisinde 5°C/dk hızda ısıtılır. Bilyelerin

halkaları tutan kalıbın tabanına değdiği andaki sıcaklık değeri yumuşama noktası değeri olarak kaydedilir [137]. Şekil 4’de yumuşama noktası deneyine ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 4. Yumuşama noktası deneyi

Asfalt bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetleri, penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerine bağlı olarak hesaplanan Penetrasyon İndeksi (PI) ile tespit edilmektedir. PI asfalt kıvamlılığının değişimi olarak tanımlanmakta olup, Formül 1’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \cdot \log(\text{Pen}25) - 20 \cdot \text{YN}}{50 \cdot \log(\text{Pen}25) - \text{YN} - 120} \quad (1)$$

Pen25: Asfaltın 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değerini (dmm),

YN: Asfaltın yumuşama noktası sıcaklık değerini (°C), ifade etmektedir. Düşük PI değerleri yüksek sıcaklık hassasiyetini göstermektedir. PI değeri yüksek olan bağlayıcıların düşük ısı çatlaklarına ve kalıcı deformasyona karşı direnci daha yüksektir [11, 138, 139].

### 1.5.1.3. Düktilite Deneyi

Asfaltın uzama ve çekilebilme özelliği düktilite olarak ifade edilmektedir. Ayrıca düktilite, asfalt çimentosundan yapılmış standart bir briketin, belirli sıcaklık ve hızda kopmadan çekilebildiği uzunluğun cm cinsinden ifadesi olarak tanımlanabilir. Asfaltın

bağlama yeteneği duktilitesine bağlıdır. Düktilite değeri yüksek olan asfaltların bağlayıcılık özellikleri de yüksektir.

Düktilite cihazı, içi 25°C sıcaklıkta su ile dolu olan ve asfalt numunesini 5cm/dk hız ile yatay olarak çeken özel bir cihaz olup, Şekil 5’de gösterilmiştir. Deney sırasında numune briket kopuncaya kadar çekme işlemine devam edilir. Briket koptuğu anda düktilite cihazının kenarında bulunan cetvelden uzama miktarı cm cinsinden okunur. Bu cihaz aynı anda üç numunenin test edilmesine imkân tanır. Üç numunenin düktilite sonuçlarının ortalaması, deney yapılan asfalt bağlayıcının duktilitesi olarak kabul edilir [15, 17, 121, 136, 140].



Şekil 5. Düktilite deneyi

#### 1.5.1.4. Parlama Noktası Deneyi

Bir maddenin alev temasında geçici olarak parladığı ancak yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık parlama noktası olarak tanımlanır. Parlama noktası, açık kap deneyleri

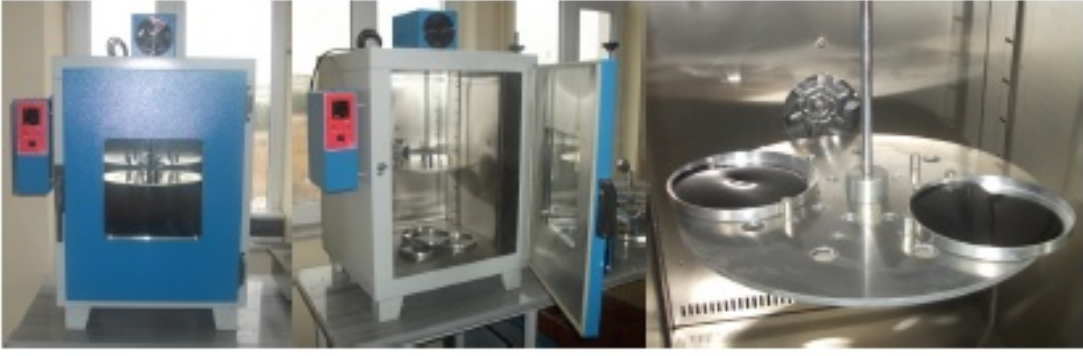
ile tespit edilir. Açık kap deneyleri, asfalt malzemenin açık bir kapta ısıtılması sırasında yüzeyin biraz üzerinde bir kıvılcım tatbik edilmesi şeklindedir. Yüzeyin herhangi bir noktasında alevin görüldüğü andaki sıcaklık, deneye tabi tutulmuş olan asfalt malzemenin parlama noktası olarak alınır [141-143]. Parlama noktası deney aleti Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Parlama noktası deney aleti

#### 1.5.1.5. İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)

İnce film halinde ısıtma deneyi (TFOT), asfalt tesislerinde agrega ile asfalt karıştırıldığı zaman meydana gelen yaşlanmayı temsil eder. Bu deneyde, 14 cm çapındaki küçük bir tepsinin içine 3.2 mm kalınlığındaki asfalt numunesi konularak tepsinin içine yayılması sağlanır. 5-6 devir/dk hızda dönen bir platform üzerine yerleştirilen numuneler 5 saat süreyle 163°C sıcaklıktaki fırında bekletilir (Şekil 7). Bu süre sonunda fırından çıkartılan numuneler tartılır ve yaşlandırma öncesi ve sonrasındaki ağırlık kaybı 0.01 g hassasiyetle belirlenir [119, 144, 145].



Şekil 7. İnce film halinde ısıtma deneyi

#### 1.5.1.6. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi

Bu deney, içeriğinde mineral madde bulunmayan ya da çok az bulunan bağlayıcıların organik çözücüler içerisindeki çözünürlüğünü tespit etmek için yapılır. Kullanılan organik çözücüler trikloetilen, benzen ve karbon sülfürdür. Asfalt çimentolarının trikloretilende en az %99 oranında çözünmesi gerekir [119, 136, 146].

#### 1.5.1.7. Özgül Ağırlık Deneyi

Özgül ağırlık deneyi, TS 1087 ve ASTM D70 standartlarına göre, 25°C’de hacmi bilinen bir asfalt numunesinin ağırlığının, aynı sıcaklık ve aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı ile elde edilen özgül ağırlığının tespit edilmesi için yapılmaktadır. Arşimed’ in ortaya koymuş olduğu; yüzen cisimlerin ağırlığı, kapladıkları hacim kadar sıvının ağırlığına eşittir ilkesine dayanır [147]. Özgül ağırlık deneyi, çok akıcı asfaltlar için kullanılmaktadır.

Özgül ağırlık deneyinde piknometre, su banyosu ve terazi kullanılmaktadır. Deneyi ilk olarak piknometrenin analitik terazide tartılıp tartımın kaydedilmesi ile başlanılır. Ardından piknometre, 25°C sıcaklıkta su ile doldurulur ve kapağı sıkıca kapatılır. Su dolu piknometre tekrar tartılır ve kaydedilir. Şayet asfalt numunesi yeterince akıcı değilse, bir miktar ısıtılarak yeterli akışkanlık sağlanır. Piknometre yaklaşık yarısına kadar bu numuneye doldurulur. Sonrasında piknometre içindeki numune ile birlikte oda sıcaklığına kadar soğutulur ve kapağı ile birlikte tartılır. Piknometrenin içindeki asfalt numunesinin üzeri damıtılmış su ile doldurulur ve kapağı sıkıca kapatılır. Sonrasında sıcaklığı 25±0.5°C’deki



su banyosuna tamamen batırılır. 30 dakika sonra piknometrenin dışı iyice kurulanır ve tartılır [147]. Özgül ağırlık hesabı Formül 2’de verilmiştir.

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{c - a}{(b - a) - (d - c)} \quad (2)$$

a = Boş piknometre ağırlığı, gr

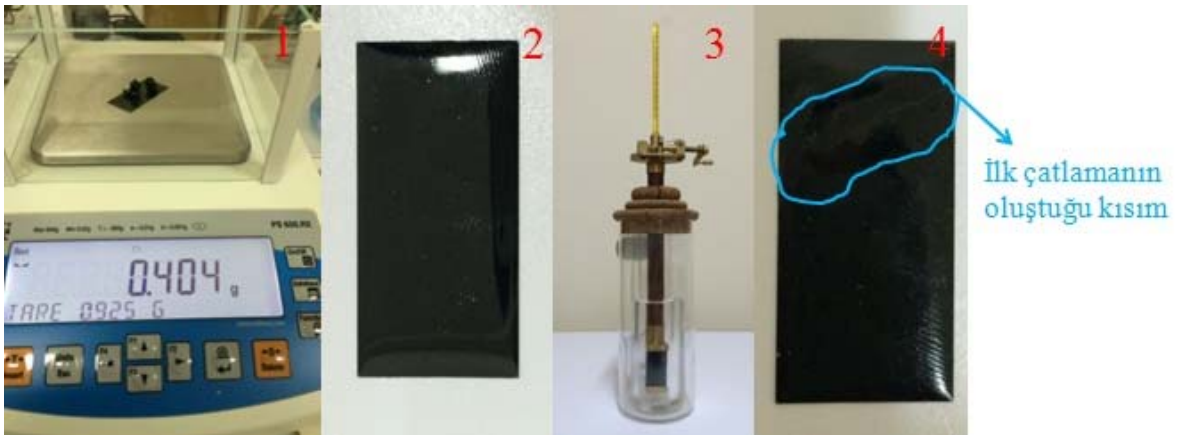
b = Saf su ile dolu piknometre ağırlığı, gr

c = Yarısına kadar bitüm dolu piknometre ağırlığı, gr

d = Asfalt, saf su ve piknometre ağırlığı, gr

### 1.5.1.8. Fraass Kırılma Noktası Deneyi

Fraass kırılma noktası, belirli kalınlıkta ve düzgün bir asfalt bağlayıcı filminin, belirtilen yük şartları altında kırıldığı Celsius cinsinden sıcaklık olarak tanımlanır. Asfalt bağlayıcı numunesi, kalınlığı her tarafta eşit olacak şekilde, bir metal plaka üzerine tatbik edilir. Plaka, tavlanmış yay çeliğinden yapılmış olup, uzunluğu 41.00 mm ± 0.05 mm, genişliği 20.0 mm ± 0.2 mm ve kalınlığı 0.15 mm ± 0.02 mm’dir. Plaka üzerine 0.40 g ± 0.01 g asfalt bağlayıcı konulur ve tartılır. Bu plaka, sabit bir hızla soğutulur. Bağlayıcı tabakasında çatlama oluşuncaya kadar belirli aralıklarla esnetilir. İlk çatlamanın oluştuğu sıcaklık, Fraass kırılma noktası olarak belirlenir [148]. Fraass kırılma noktası deney aleti ve deneyin yapılış adımları Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Fraass kırılma noktası deneyi

### 1.5.1.9. Nicholson Soyulma Deneyi

Nicholson soyulma deneyi, su etkisiyle asfalt bağlayıcının agrega üzerinden ayrılmasına karşı direncini tespit etmek amacıyla yapılır [165, 203, 204]. Nicholson deneyinde, kırılmış agrega numunesinin 9.5-6.3 mm elekler arasında kalan kısmından 200 gr alınır, iyice yıkanır, saf su ile birkaç kez çalkalandıktan sonra 110°C'lik etüvde kurutulur. Beher içinde tartılarak, yıkanmış kurumuş agregadan 100±0.5 gr numune alınır ve ısıtılmak üzere 1 saat 140°C-150°C'lik etüvde bekletilir. Asfalt bağlayıcıdan da beher içinde tartılarak 5.0±0.1 gr elde edilir. Asfalt bağlayıcı içeren beher bir kum banyosuna yerleştirilerek ısıtılır. Asfalt bağlayıcı eriyince, agrega asfalt üzerine dökülür ve bir cam bagetle tüm agregaların üzeri asfaltla kaplanıncaya kadar karıştırılır. Karışım eşit olacak şekilde iki petri kabına boşaltıldıktan sonra 10 dk laboratuvar sıcaklığında bekletilir. Sonrasında petri kapları, içerisinde saf su bulunan tepsilere konularak üzerinde en az 3 cm'lik su filmi oluşması sağlanır. Daha sonra petri kaplarını içeren tepsiler 60°C'lik bir etüvde 24 saat bekletilir. 24 saat sonunda petri kabı çıkarılır ve suyu değiştirilir. Yan taraftan gelen bir ışık altında numuneler görsel olarak incelenir. Tüm agrega danelerinin soyulmamış yüzeylerinin, karışımdaki toplam agrega yüzey alanına oranı soyulmaya karşı dayanıklılığını ya da soyulma direncini ifade eder (Şekil 9) [121, 204, 205].



Şekil 9. Nicholson soyulma deneyi

### 1.5.2. Superpave Bağlayıcı Deneyleri

Superpave sistemindeki performans esaslı bağlayıcı şartnamesi, kaplamalarda meydana gelen kalıcı deformasyon, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık çatlaklarının azaltılarak bağlayıcının performansının en üst düzeye çıkarılması ve ölçülmesi amacıyla

tasarlanmıştır. Bu şartnamenin en önemli özelliği, deneylerin kaplamanın hizmet vereceği bölgede maruz kalacağı sıcaklıklarda yapılarak asfaltın saha performansı ile doğrudan ilgili fiziksel ve reolojik özelliklerinin tespit edilebilmesine olanak tanınmasıdır. Tablo 1’de Superpave yönteminde kullanılan bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçlarına yer verilmiştir [118, 130, 149, 150]. Bu deneyler, malzemenin doğrudan arazi şartlarındaki performansı ile ilgili özelliklerinin ölçülmesi amacıyla tasarlanmıştır.

Tablo1. Superpave bağlayıcı deneyleri, kullanım amaçları ve parametreleri

Deneş Adı	Kullanım Amacı	Performans Parametresi
Dönel Viskozimetre (RV)	Bağlayıcının yüksek sıcaklık özelliklerini belirlemek	Aktarma ve pompalama
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Bağlayıcının yüksek ve orta sıcaklık özelliklerini belirlemek	Kalıcı deformasyon ve yorulma çatlağı direnci
Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT)	BSK üretimi ve yapımı süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Yapım süresince yaşlanma direnci
Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV)	BSK hizmet ömrü süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Hizmet ömrü süresince yaşlanma direnci
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci

#### 1.5.2.1. Dönel Viskozimetre Deneyi (Rotational Viscosimeter, RV)

Dönel viskozimetre deneyi, asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık ve pompalanabilirlik karakteristiklerini belirlemek için yapılmaktadır. Deney sırasında AASHTO TP48 standardına uygun olarak Brookfield viskozimetresi kullanılmaktadır. Pompalama ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olup olmadıklarının tespit edilmesi amacıyla bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri belirlenmektedir. Dönel viskozimetre deneyi yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Superpave şartnamesine göre bağlayıcı sınıflandırmasında, Pascal-saniye (Pa.s) birimi kullanılır ve bağlayıcının 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s’yi (3000 cP) aşmaması istenir. Dönel viskozimetre değeri, silindirik bir çubuğun sabit bir sıcaklıkta asfalt numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile tespit edilir. Viskozite

deneyinde bağlayıcı içerisinde 20 rpm hızla dönen bir milin dönmeye karşı gösterdiği dirençle viskozite değeri elde edilir (Şekil 10). Bu deney sırasında bağlayıcıdan 30 gr civarında numune alınmakta ve 150°C'den daha düşük sıcaklıktaki etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilmektedir. Asfalt numunesinden yaklaşık 11 gr alınarak silindirik tüp bölmesine dökülür, tüp sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilir, numune 10-15 dakika sabit sıcaklıkta bekletildikten sonra deney yapılır [118, 128, 150-152].

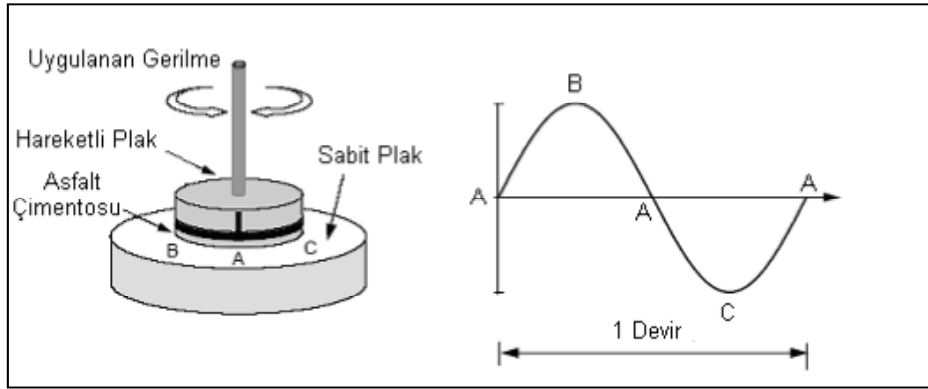


Şekil 10. Brookfield viskozimetre deney aleti

Deney sırasında yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine ulaşıldıktan sonra üç adet okuma yapılır ve bu üç değerın ortalaması alınarak asfalt bağlayıcının viskozite değeri hesaplanır. Viskozite değeri sıcak asfalt karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla kullanılır. Bu amaçla RV deneyi, genellikle 135°C ve 165°C sıcaklıklar arasında uygulanır. Çizilen sıcaklık–viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilir. Asfalt bağlayıcının agrega ile karıştırılmasında  $170 \pm 20$  cP, elde edilen sıcak asfalt karışımların sıkıştırılmasında ise  $280 \pm 30$  cP viskozite değerine sahip olması beklenilir. Superpave şartnamesine göre, asfalt bağlayıcının, 135°C sıcaklıkta ölçülen viskozite değerinin 3000 cP değerini aşmaması gerekir [128].

### 1.5.2.2. Dinamik Kayma Reometresi Deneyi (Dynamic Shear Rheometer, DSR)

DSR deneyi, asfaltın tekerlek izi ve yorulma çatlaklarına karşı dirençlerini tespit etmek amacıyla kullanılan bir deneydir. Bu deney ile asfaltın orta ve yüksek sıcaklıklardaki özellikleri belirlenir. Asfalt bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla işlem görmemiş (yaşlandırılmamış) ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken, bağlayıcıların yorulma davranışlarını tespit etmek için ise PAV yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını tespit etmek için ise 8 mm çapında ve 2000 mikron yüksekliğinde numuneler kullanılmaktadır. DSR deneyinde Şekil 11’de görüldüğü gibi asfalt bağlayıcı birbirine paralel iki plaka arasına yerleştirilir. Alttaki plaka sabit, üstteki plaka ise hareketlidir. Üstteki plaka A noktasından B’ye, B noktasından tekrar A’ya, A noktasından C’ye ve C noktasından tekrar A’ya hareket eder. Bu harekete salınım veya devir denir. Deney boyunca bu salınım devam eder. Deneyde dönme frekansı yaklaşık olarak 1.59 devir/sn (10 rad/sn)’dir. DSR deneyinde ortam şartlarını yansıtması amacıyla ön koşullandırma yapılmakta ve sonrasında 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır [128, 150, 153, 154]. Şekil 12’de DSR deney aleti görülmektedir.



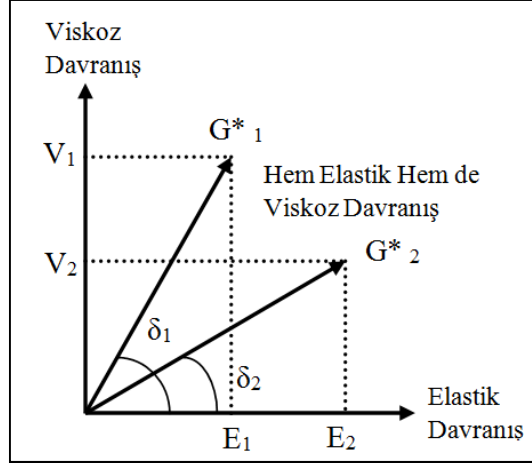
Şekil 11. DSR deneyi deformasyon yönleri



Şekil 12. Bohlin DSR II dinamik kayma reometrisi

Dinamik kayma reometreleri gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü olmak üzere iki ayrı türde olabilmektedir. Gerilme kontrollü reometreler, plakayı A noktasından B noktasına hareket ettirecek sabit bir burulma kuvveti ile çalışır. Burulma kuvveti bağlayıcının sertliğine bağlı olarak değişir. Bu nedenle her salınımında farklı yer değiştirme olabilir. Deformasyon kontrollü reometrelerde ise sabit bir deformasyon gerçekleştirilir ve deformasyon sağlayacak kuvvet her salınımında değişebilir [118, 130, 151, 153, 155].

Dinamik kayma reometresi deneyi, asfalt bağlayıcının kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) ve faz açısını ( $\delta$ ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir.  $G^*$ , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı asfalt bağlayıcının gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem  $G^*$  hem de  $\delta$  değerleri asfalt bağlayıcının sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Asfalt bağlayıcının viskoelastik özelliği

DSR deneyi sonucunda belirlenen  $G^*$  ve  $\delta$  değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan  $G^*/\sin\delta$  değeri tespit edilmektedir.  $G^*/\sin\delta$  değeri asfaltın tekerlek izi direnç parametresidir. Yüksek tekerlek izi direnci için  $G^*/\sin\delta$  değeri orijinal bağlayıcılar için en az 1.00 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise en az 2.20 kPa olmalıdır. Superpave bağlayıcı şartnamesinde bağlayıcının performans seviyesi PG X-Y olarak belirtilir. Burada X bağlayıcının özelliklerini kaybetmeden hizmet verdiği en yüksek sıcaklığı, Y ise en düşük sıcaklığı temsil etmektedir. DSR deneyi sonucunda  $G^*/\sin\delta$  değerinin sağlanması gereken en küçük değeri veren en yüksek sıcaklık değeri, bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesini temsil eder [60, 128, 134, 153, 154].

### 1.5.2.3. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)

Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ile asfalt bağlayıcının karıştırma ve yapım sırasındaki kısa süreli yaşlanması, laboratuvar ortamında simüle edilir. RTFOT, AASHTO T240 veya ASTM D2872 şartnamelerine göre yapılmaktadır. Bu deneyde ince bir film halinde hareket eden asfalt bağlayıcıda, sıcaklık ve havanın etkisiyle oluşan uçucu madde kaybının belirlenmesi ve deneyden sonra yaşlanmış asfalt bağlayıcının fiziksel özelliklerinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır [118, 128, 150, 156, 157, 158].

RTFOT deneyi, Şekil 14'de gösterildiği gibi 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır. Deneyde her bir şişeye 35 gram asfalt doldurulup düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika boyunca döndürülmektedir.

Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici ile şişelere, akışı  $4000 \pm 200$  mL/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle asfalt, şişeleri tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmaktadır. Bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır. Süre bitiminde, 2 şişede bulunan numune kütle kaybını tayin etmek amacıyla, geri kalan 6 şişe ise asfalt bağlayıcıların yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır [118, 154, 158]. Kütle kaybı Formül 3’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [144].

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{(\text{İlk Kütle} - \text{Son Kütle})}{\text{İlk Kütle}} \cdot 100 \quad (3)$$



Şekil 14. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi



#### 1.5.2.4. Basınçlı Yaşlandırma Kabı Deneyi (Pressure Aging Vessel, PAV)

Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi, arazide servis sırasında asfaltta meydana gelen oksidasyon yaşlanmasını (uzun süreli yaşlanma) laboratuara yansıtılabilmek amacıyla geliştirilmiştir. PAV deneyi, RTFOT deneyinden elde edilen asfalt bağlayıcılara uygulanır. Bu sayede kaplamanın karıştırma, yapım ve hizmet sırasında karşılaşılabileceği çevresel koşullar deney ortamına yansıtılmış olmaktadır [118, 154, 156, 157].

PAV deneyinde AASHTO PP1 standardına uygun olarak her bir numune kabına 50 gram RTFOT deneyinden elde edilen asfalt bağlayıcı konulmaktadır. Bağlayıcı sınıfına göre 90°C, 100°C veya 110°C sıcaklıkta numunelere 20 saat süreyle 2070 kPa'lık (21 bar) basınç uygulanmaktadır. Bağlayıcı sınıfına göre değişen deney sıcaklıkları Tablo 2'de, deney ile ilgili görüntüler Şekil 15'de sunulmuştur.

Tablo 2. Bağlayıcı sınıfına göre PAV deneyinin uygulanma sıcaklıkları

Bağlayıcı Sınıfı	PAV Deney Sıcaklığı (°C)
PG 46-Y	90
PG 52-Y	90
PG 58-Y	100
PG 64-Y	100
PG 70-Y	100-110
PG 76-Y	100-110
PG 82-Y	100-110



Şekil 15. PAV deneyi

RTFOT ve PAV deneylerinden elde edilen yaşlandırılmış asfalt bağlayıcılara DSR ve BBR deneyleri uygulanarak performansları ve şartname kriterlerine uygunlukları tespit edilmektedir [118, 130, 151, 159]

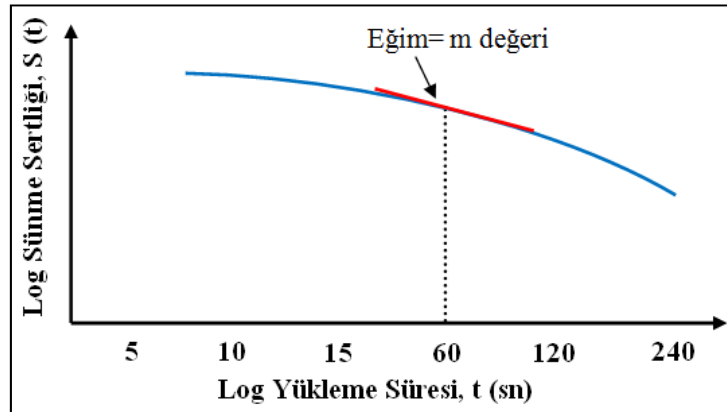
#### 1.5.2.5. Kiriş Eğme Reometresi Deneyi (Bending Beam Rheometer, BBR)

Soğuk iklime sahip olan bölgelerde inşa edilen esnek kaplamalarda, iklim ve çevre şartları nedeniyle oluşan ve termal çatlak olarak adlandırılan düşük sıcaklık çatlaklarının tespit edilmesi amacıyla kiriş eğme reometresi geliştirilmiştir (Şekil 16). BBR deneyi ile asfaltın belli bir sıcaklıkta sabit yük altında sünme ya da defleksiyon özellikleri tespit edilir. Bu deney, RTFOT ve PAV deneyleri ile yaşlandırılmış asfalt bağlayıcılar üzerinde de yapılabildiğinden, asfalt bağlayıcıların zaman içerisinde nasıl bir değişim gösterdikleri de belirlenebilmektedir [150, 160].



Şekil 16. Kiriş Eğme Reometresi deney aleti

BBR deneyinde standart ölçülerdeki (12.5x25x6.25 mm) kiriş şeklinde bulunan asfalt çubuğa sabit bir tekil kuvvet ( $980 \pm 5$  mN) uygulanır ve deney süresi boyunca (240 saniye) çubuğun ortasında oluşan defleksiyon ölçülerek sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) hesaplanır. Yükleme sıcaklık azaldıkça asfalt kaplamanın maruz kaldığı termal gerilmeleri temsil etmektedir [155]. Sünme sertliği bağlayıcının sünme gerilmelerine karşı gösterdiği dirençtir. Sünme oranı ise yükleme süresi boyunca bağlayıcının sertliğindeki değişimdir [40]. Supervave şartnamesine göre 60 sn yükleme süresi için sünme sertliği değeri en fazla 300 MPa olmalıdır. Sünme oranı ise zamana bağlı olarak sünme sertliği değişimini ifade etmekte olup, Şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 17. Sünme oranı değerinin belirlenmesi

Şekil 17’de görüldüğü gibi farklı yüklemelerdeki sertlik ölçülerek, sertlik-zaman eğrisindeki 60. saniyedeki teğetin eğimi  $m$  değeri olarak ele alınmaktadır. Termal gerilmeler devam ettikçe asfalt bağlayıcıdaki sertlik zamanla değişeceğinden yüksek  $m$ -değerleri tercih edilmektedir. Yüksek  $m$  değerinde asfalt kaplamada oluşacak çekme gerilmeleri azalacak ve termal çatlaklar oluşmayacaktır. Bu nedenle bağlayıcı şartnamesinde 60 sn yüklemesi sonunda  $m$  değerinin en az 0.300 olma şartı yer almaktadır [118, 134, 151].

## **1.6. Sıcak Asfalt Karışımlar**

Sıcak asfalt karışımlar, sürüş konforu, üst düzeyde servis performansı, stabilite, durabilite ve suya karşı dayanım sağlaması nedeniyle yol üst kaplamalarında en çok tercih edilen kaplama türüdür [47].

### **1.6.1. Sıcak Asfalt Karışımların Özellikleri**

Sıcak asfalt karışımların özellikleri stabilite, rijitlik, dayanıklılık (durabilite), yorulma mukavemeti, esneklik (fleksibilite), geçirimsizlik, kayma direnci ve işlenebilirliktir. Bu bölümün alt başlıklarında her bir özellik ayrı ayrı açıklanmıştır.

#### **1.6.1.1. Sıcak Asfalt Karışımların Stabilitesi**

Stabilite, mukavemetle yakından ilgili bir terim olup, sıcak asfalt karışımlardan elde edilen yol kaplamalarının trafik yükü altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği dirençtir. Sıcak asfalt karışımların stabilitesi ne kadar düşüğe trafik yükleri altında oluşabilecek deformasyonlarda o kadar fazladır. Hem çok düşük stabilite hem de çok yüksek stabilite zararlıdır. Çünkü çok yüksek stabiliteye sahip asfalt karışımlar gerilmelere maruz kaldığında esnek davranış gösteremeyip kaplamada çatlakların oluşmasına neden olacaktır. Kaplamaların stabilitesi, sıcak karışımın içsel sürtünme direncine ve kohezyonuna bağlıdır. Sıcak asfalt karışımların stabilitesine etki eden hususlar kayma mukavemeti, ısı ve eylemsizlik direncidir. Sıcak asfalt karışımların kayma mukavemeti ( $\tau$ ) Formül 4’deki gibi hesaplanır [118, 128, 136, 160, 161, 162].

$$\tau=c+\sigma\tan\phi \quad (4)$$

Formülde,  $\phi$  agrega daneleri arasında bulunan içsel sürtünme açısını,  $c$  kohezyon olup agrega ile asfalt arasındaki adezyon kuvvetini,  $\sigma$  ise normal gerilmeyi temsil etmektedir.

### 1.6.1.2. Sıcak Asfalt Karışımların Rijitliği

Sıcak asfalt karışımlar, viskoelastik ve termoplastik özelliğe sahip olduklarından mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla "Rijitlik modülü ( $R_m$ )" kullanılır. Belli bir yüklemeye altında kaplama tabakalarında oluşan deformasyonlar, sıcak asfalt karışımların rijitliğiyle yakından ilgilidir. Bunun için rijitliği yüksek olan karışımların yük uygulandığı esnada göstereceği deformasyon miktarı, aynı şartlar altında yüklenen daha düşük rijitliğe sahip karışımlara göre daha az olacaktır [123]. Sıcak asfalt karışımların rijitliği sabit olmayıp sıcaklık ve yüklemeye hızına bağlı olarak Formül 5'deki gibi hesaplanır.

$$R_{m(t, T)}=\sigma/\varepsilon \quad (5)$$

Burada;

$\sigma$  : Gerilme ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$\varepsilon$  : Şekil değiştirme (deformasyon)

$T$  : Sıcaklık

$t$  : Yükleme süresi veya hızı

Formülden de anlaşıldığı gibi rijitlik sıcak asfalt karışımların yüklemeye süresi (veya hızı) ve sıcaklık etkisi altında gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkisinin ifadesidir. Kısaca rijitlik genel olarak;

- Yükleme süresi azaldıkça (veya yüklemeye hızı arttıkça)
- Sıcaklık azaldıkça
- Karışım yoğunluğu arttıkça
- Asfaltın penetrasyonu azaldıkça artar [160].

### 1.6.1.3. Sıcak Asfalt Karışımların Dayanıklılığı (Durabilitesi)

Sıcak asfalt karışımların durabilitesi, trafiğin aşındırıcı etkilerine ve sıcaklık, hava, su gibi çevresel şartlara karşı koyma (direnç göstermesi) yeteneği ile ilgilidir. Yani dayanıklılık ya da durabilite, asfalt özelliklerinin değişmesine (yaşlanma-sertleşme), agrega danelerinin kırılması, ufalanması ve asfaltın soyulmasına karşı kaplamanın dayanıklı olmasıdır. Dayanıklılık genellikle;

- Yüksek asfalt oranı,
- Sert asfalt (düşük penetrasyonlu) ve kalın film tabakası,
- Yüksek soyulma direnci,
- İyi sıkışma (düşük boşluk oranı ve permabilite),
- Yoğun gradasyon sayesinde artış gösterir.

Yukarıda sıralanan şartlar sağlandığında geçirimsizlik artacağından karışımın içine daha az hava ve su girmesi sağlanacak bu da durabiliteyi artıracaktır. Bilindiği gibi hava ve su asfaltın oksidasyonunu hızlandırarak asfaltın sertleşmesine yani yaşlanmasına neden olur. Asfalt film tabakasının kalın olması zaman içinde daha az sertleşmesine neden olur. Asfalt miktarının optimuma kadar artması sonucu karışım içerisindeki boşluklar azalarak stabilite artar. Bu sayede su ve hava az gireceğinden dolayı asfaltın yaşlanması geciktirilerek durabilite artırılmış olur [129, 160].

### 1.6.1.4. Sıcak Asfalt Karışımların Yorulma Mukavemeti

Sıcak asfalt karışımların yorulma mukavemeti, kaplamada tekrarlanan yükler etkisiyle ortaya çıkan gerilmelere karşı, kalıcı olmayan deformasyonlar oluşmasına imkân verebilen mukavemet değeridir. Yorulma mukavemeti;

- Rijitlik arttıkça,
- Asfalt miktarı arttıkça,
- Kaplama kalınlığı arttıkça,
- Eğilme gerilmesi azaldıkça,
- Gradasyon ve yoğunluk arttıkça,
- Asfalt penetrasyonu arttıkça (yumuşadıkça), artış göstermektedir [160].

Bir kaplamanın yorulma ömrünü tanımlayan genel bağıntı Formül 6'da gibi ifade edilmektedir [123, 160].

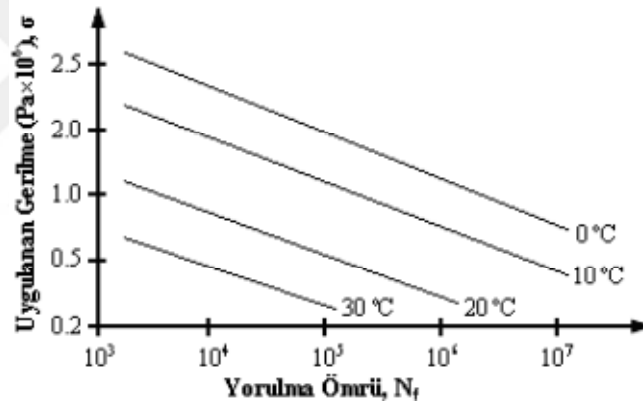
$$N_f = K(1/\varepsilon)^n \quad (6)$$

$N_f$ : Yorulma çatlak meydana gelmesi için gereken tekrarlı yük uygulama sayısı (yorulma ömrü)

$\varepsilon$ : Uygulanan şekil değiştiriminin maksimum değeri (deformasyon)

$K$  ve  $n$ : Asfalt karışımın özelliklerine ve kompozisyonuna bağlı katsayılar

Özellikleri aynı asfalt karışımların farklı sıcaklık ve sabit gerilme altındaki yorulma ömürleri Şekil 18'de gösterilmiştir [123].



Şekil 18. Karışımların sıcaklık, gerilme ve yorulma ömrü ilişkisi

#### 1.6.1.5. Sıcak Asfalt Karışımların Esnekliği (Fleksibilitesi)

Sıcak asfalt karışımların fleksibilitesi yani esnekliği, zeminin ve temel tabakaların trafik ve çevre etkileriyle uzun süreli oturma yapması durumunda, çatlama olmadan hafifçe eğilebilme ve oluşan çökmelere uyum sağlayabilme yeteneğidir. Genellikle esneklik;

- Asfalt içeriği arttıkça,
- Nispeten açık gradasyonlu karışıma sahip olduğunda artış göstermektedir.

Kaplamanın esnekliği arttığında stabilitesi azalmaktadır. Düşük esnekliğe sahip karışımlarda aşırı çatlama, yüksek esnekliğe sahip karışımlarda ise yorulma çatlakları

oluşabilmektedir. Kaplamanın esnekliği yeterli olduğunda ise kaplamada çatlama olmadan sadece geçici deformasyon oluşur [160, 163].

#### **1.6.1.6. Sıcak Asfalt Karışımların Geçirimsizliği**

Sıcak asfalt karışımlarda geçirimsizlik, kaplamanın içine hava ve su girmesine karşı gösterdiği dirençtir. Kaplamadaki boşluk miktarı ve boşlukların birbiri ile bağlantısı, su, hava ve su buharının kaplama içerisinde yer değiştirmesi için gerekli koridorları oluşturur. Geçirimsizlik arttıkça hava ve suyun etkisi ile asfaltın yaşlanması hızlanır, soyulma mukavemeti azalır, donma ve çözümlerin tekrarlanması sonucu agreganın parçalanmasına sebep olur. Genel olarak geçirimsizlik;

- Asfalt miktarı arttıkça,
- Agregada gradasyonunun ve karışımın yoğunluğu arttıkça,
- Sıkıştırma arttıkça artış gösterir [160, 163, 164].

#### **1.6.1.7. Sıcak Asfalt Karışımların Kayma Direnci**

Kayma direnci, bir asfalt kaplamanın üzerinden geçen araçların frenleme sırasında emniyetle durabilmesi ve kurlarda merkezkaç kuvvetinden dolayı savrulmaması için teker ile kaplama arasında bulunması gereken sürtünme kuvvetini temsil eder. Kayma direnci genel olarak;

- Düşük asfalt miktarı,
- Kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agregada,
- Cilalanma direnci yüksek agregada,
- Açık ve kaba gradasyonlu karışım ile artmaktadır.

Kaplamanın yüzey düzgünlüğü arttıkça sürüş konforu artmakta ancak kayma direnci önemli oranda azalmaktadır. Sıcak asfalt karışımlardan yapılan esnek kaplamaların pürüzsüz ve çok düzgün yüzeylerinden dolayı özellikle yağışlı havalarda sık eğimli kesimlerde ve keskin kurlarda sürüş emniyeti azalmaktadır. Bu tür kesimlerde aşınma tabakası üzerine aşınma direnci yüksek, tek boyutlu ve silisli kırmataş agregada serilip silindirle kaplamaya gömülmesi ya da sathi kaplama uygulanmasıyla kayma direncinin artırılması sağlanabilir [118, 160].



### 1.6.1.8. Sıcak Asfalt Karışımların İşlenebilirliği

İşlenebilirlik, karışımın serilmesi ve sıkıştırılması esnasında gösterdiği kolaylığın ölçüsüdür. Genel olarak işlenebilirlik [160];

- Karışım ısısı düştükçe,
- Filler miktarı aşırı arttıkça,
- Asfaltın viskosluğu arttıkça,
- Kaba agregası miktarı arttıkça,
- Kırmataş agregası kullanıldıkça,
- Maksimum dane boyutu arttıkça,
- Asfalt penetrasyonu düştükçe (katılaştıkça),
- Ara boyutlu malzeme miktarı aşırı arttıkça,
- Agregası yüzeyinin pürüzlülüğü ve kırılmışlık arttıkça azalmaktadır.

İşlenebilirliği düşük olan karışımların serilmesi ve sıkıştırılması sırasında birtakım güçlükler oluşmaktadır. Bu güçlükler sonucunda yeterli sıkışma sağlanamadığı için karışımın stabilitesi azalmaktadır ve homojen olmayan kaplamalar elde edilmektedir. Sıcak asfalt karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler Tablo 3’de verilmiştir [160].

Tablo 3. Sıcak asfalt karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler

Karışım Özelliği	Bağlayıcı				Agrega				Yoğunluk (Sıkışma)		Isı		Yükleme Hızı		Kaplama Kalınlığı	
	Miktar		Katılık		Yoğunluk		Agrega Tipi		Çok	Az	Çok	Az	Yüksek	Düşük	Çok	Az
	Fazla	Az	Katı	Yumuşak	Çok Yoğun	Az Yoğun	Köşeli Pürüzlü Poroz	Yuvarlak Cilalı Az Poroz								
Stabilite	Opt. (1)		x		x		x		x			x	x		x	
Rijitlik	(2)		x		x		x		x			x	x		x	
Dayanıklılık	x		x		x		x		x			(4)	x		x	
Yorulma Mukavemeti	x			x	x		x		x		(6)		x		x	
Esneklik	x			x		x		x		x	x		-	-		x
Geçirgenlik	x		x		x			(5)	x			(7)	-	-	x	
Kayma Direnci		x	x			x	x		x			x	-	-	-	-
İşlenebilirlik		(3)		x		x		x	-	-	x		-	-		x

**Notlar:**

1. Asfalt yüzdesi optimum civarında ancak optimumdan daha az ise yüksek stabilite, aksi takdirde düşük stabilite elde edilir.
2. Asfalt katı ve ısı düşük ise fazla asfalt yüzdesinde, aksi halde az asfalt yüzdesinde oluşur.
3. Genel olarak az asfalt yüzdesinde olur.
4. Isının dayanıklılık üzerindeki etkisi; ısı çok yüksek ise soyulma, ısı çok düşük ise büzülme çatlakları artar.
5. Genel olarak geçirimsizlik yoğunluk ile artar.
6. Isının yorulma mukavemeti üzerinde direkt etkisi yoktur.
7. Düşük ısıda karışımın boşluk oranı, tasarım boşluk oranı civarındadır.

## 1.6.2. Sıcak Asfalt Kaplamalarda Oluşan Bozulmalar

Asfalt kaplamalar genellikle yol trafiğe açıldıktan sonra, trafik yükleri, çevre ve iklim koşulları ile yol altyapısından kaynaklanan bozulmalara maruz kalırlar. Türkiye’de ise tasarım yönteminin ve malzemesinin yanlış seçimi, iklimsel koşullar, trafiğin hızlı ve kontrolsüz şekilde artması, teknik ve proje açısından uygun olmayan altyapı inşaları, bakım üniteleri ve diğer üniteler arasındaki koordinasyon eksiklikleri, asfalt kaplamalarda bozulmalara neden olmaktadır [121]. Bu bozulmalar ise deformasyon, çatlak gibi kalıcı izli hasarlara sebebiyet vermektedir [165, 166].

Asfalt kaplamalarda meydana gelen bozulmalar genel olarak [160];

- Deformasyonlar (Stabilite Bozuklukları)
- Ayrışmalar (Yüzeysel kopmalar ve bozulmalar, parçalanmalar)
- Çatlaklar olmak üzere üç başlık altında görülmektedir. Aşağıda her bir başlık detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

### 1.6.2.1. Deformasyonlar

Deformasyonlar, asfalt kaplamanın imalatından bir süre sonra görülen yapısal ve sürüş konforu, emniyeti açısından sorun teşkil eden kalıcı bozukluklardır. Deformasyonlar genel olarak düşük stabiliteli sıcak asfalt karışımların imalatından kaynaklanır. Ancak;

- Kaplama tabakalarının yetersiz sıkıştırılması,
- Aşınma tabakasında aşırı filler ve asfalt kullanımı,
- Alt tabakalarda ve zeminde aşırı hacim değişikliği olması,
- Tabaka kalınlıklarının yetersiz oluşu,
- Yetersiz drenaj deformasyonlara neden olan önemli etkenlerdir [160].

#### 1.6.2.1.1. Tekerlek İzi Oluşumu

Tekerlek izi ya da oluklanma, asfalt kaplamalarda özellikle ağır taşıtların geçtiği şeritler üzerinde ve tekerleklerin temas ettiği bölümlerde oluşan, kanal görünümünde kalıcı deformasyonlardır [167]. Tekerlek izi deformasyonları en fazla hızlı taşıtlar için sürüş

emniyeti açısından tehlikeli bir durum oluştururken, sürüş konforu açısından tüm hızdaki taşıtlar için sorun teşkil eden bir durumdur (Şekil 19).

Ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda sıklıkla karşılaşılan tekerlek izine neden olan faktörler aşağıda verilmiştir [121, 160].

- Yetersiz sıkışma
- Yüksek hava sıcaklığı
- Yuvarlak dere malzemesi
- Yüksek penetrasyonlu asfalt
- Ağır trafik yükü ve tekerrür sayısının fazlalığı
- Ağır taşıtların yavaş hızı (tırmanma şeridi gibi)
- Aşırı asfalt ve filler yüzdesi veya filler/bitüm yüzdesi
- Yetersiz temel tabaka kalınlığı ve zemin mukavemeti



Şekil 19. Tekerlek izi oluşumu [168].

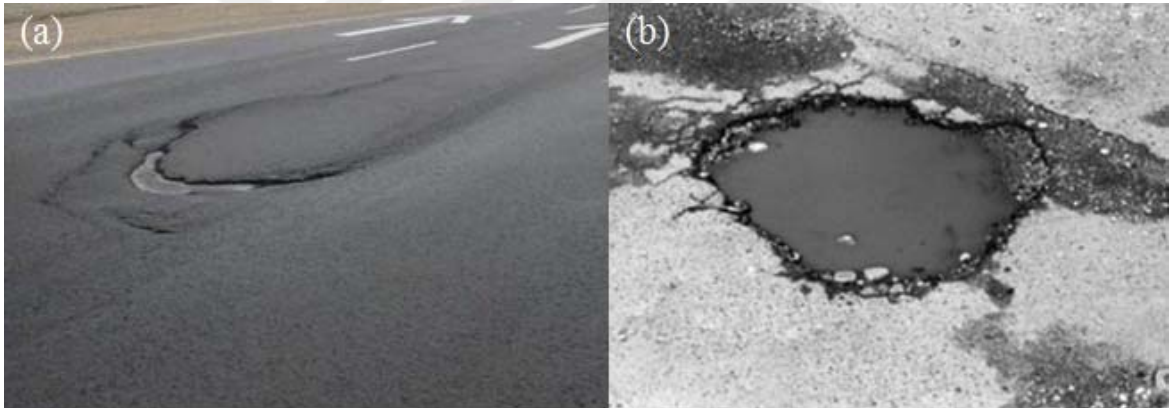
#### 1.6.2.1.2. Oturmalar ve Çökmeler

Oturmalar, kaplama altında bulunan alt tabakalarda meydana gelen bozulmaların yüzeye yansması sonucu ve genellikle 0.5-2 m yarıçaplı dairesel veya daireye yakın boyutlarda oluşur. Asfalt tabakalar, bilhassa esneklikleri nedeniyle çatlamadan alt tabakaların yeni kotuna intibak ederler fakat kırılğan özelliğe sahip asfalt kaplamalarda

çatlamalar görülür (Şekil 20a) [118, 163, 169, 170]. Bunların yanında genellikle çatlamalar [160];

- Yetersiz sıkıştırma
- Yetersiz gradasyon
- Kaplamada su içeriğinin aşırı artması
- Yüzeysel kaplamada parçalanmaların artmış olması
- Drenaj, zemin ve imalat problemleri gibi bölgesel nedenlere bağlı olarak oluşurlar.

Çökmeler ise orijinal kaplama sathına göre alçakta kalmış, 0.5-1.5 m dairesel çapta, derinlikleri 2-5cm ya da daha fazla olabilen ve içlerinde su biriken küçük çukurlardır. Yukarıda bahsedilen oturma sebepleri çökmeler için de geçerlidir (Şekil 19b) [118, 121, 128, 160].



Şekil 20. Kaplamada oturma (a) ve çökme (b) [171, 172].

### 1.6.2.1.3. Ondülasyonlar (Dalganmalar veya Yığılmalar) ve Kabarmalar

Ondülasyonlar, dalgaya benzeyen, aralıkları yaklaşık olarak eşit olan, yol üzerinde trafiğin akışına göre enine doğrultuda oluşan deformasyonlardır (Şekil 21) [173, 174]. Bu türden deformasyonlar yaya geçitleri, otobüs durakları, kavşaklar, tırmanma şeritleri gibi kesimlerde görülür. Bu tür deformasyonlar genellikle;

- Aşırı asfalt
- Binder tabakası eksikliği
- Zayıf yapıştırma tabakası

- Düşük stabiliteli karışımlar
- Yetersiz aşınma tabakası kalınlığı
- Yüksek penetrasyonlu ya da çok düşük viskoziteli asfalt
- Çok dik kesimlerde ağır taşıtların durma ve kalkma hareketi
- Kavşaklarda, otobüs duraklarında vb. kesimlerde frenleme ve kalkma hareketleri gibi nedenlerden kaynaklanır [160].

Kabarmalar ise üstyapının bir kısmının ya da tabii zeminin şişmesi sonucu yukarı yönde yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Bu türden bozulmaların en yaygın nedeni, üstyapı içindeki granüler tabakalar ya da zemin içinde oluşan buzun genleşmesidir. Şişmeye neden olan nem sonucu da kabarmalar oluşabilmektedir [163, 166, 167].



Şekil 21. Kaplamada ondülasyon oluşumu [175].

#### 1.6.2.2. Ayrışmalar

Trafik ve iklimsel etkilerden dolayı aşınma tabakasından agrega danelerinin küçük parçalar halinde kopması sonucu ayrışmalar meydana gelir (Şekil 22). Genellikle;

- Yapım hataları,
- Homojen olmayan karışım,
- Serim sırasında segregasyon,
- Düşük kaliteli malzeme (Kırlı ve ıslak agrega kullanımı),

- Yetersiz ve yüksek penetrasyonlu asfalt (yetersiz adezyon), gibi nedenler sonucu ayrışmalar meydana gelir [60]. Ayrışmalar soyulmalar ve söklmeler olmak üzere iki kategori altında ele alınır.



Şekil 22. Kaplamada ayrışma oluşumu [175].

#### 1.6.2.2.1. Sökülmeler

Trafik ya da hava koşulları nedeniyle sürekli olarak kaplama yüzeyinde meydana gelen malzeme kaybı söklme olarak adlandırılmaktadır. Sökülmeler, agrega danelerinin yavaş yavaş yüzeyden aşağı doğru kopması sonucu oluşmaktadır. İlk olarak ince malzemelerin kopmasıyla çok küçük çukurlar oluşmakta sonrasında aşındırma ile gitgide daha büyük parçalar koparak söklmeler meydana gelmektedir (Şekil 23).

Sökülmeler genellikle;

- Asfalt miktarının azlığı,
- Kirli ve segrega olmuş agrega,
- Soğuk ve nemli havada imalat,
- Çok ince aşınma tabakasının yapılması,
- Karışım sırasında asfaltın aşırı ısıtılması,
- Yetersiz sıkıştırma ya da üniform olmayan sıkıştırma gibi nedenlerden oluşur [118, 160, 165, 167].



Şekil 23. Kaplamada sökölme oluşumu [175].

#### 1.6.2.2.2. Soyulmalar

Agrega ile asfalt bağlayıcı arasındaki adezyon bağının zayıflaması sonucu sıcak asfalt karışımların zamanla yapısında oluşan bozulmalar soyulma olarak adlandırılır (Şekil 24). Soyulma genellikle asfalt kaplamanın, alt tabakalarından başlayıp yukarı doğru hareket eder. Agregası ve bağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri, aralarındaki etkileşim, karışım tasarımı, üstyapı tasarımı, serim ve sıkıştırma, yüzey ve alt tabakalardaki drenaj ve trafik soyulmada önemli rol oynayan faktörlerdir. Bu tür bozulmaların en önemli nedeni agrega ve asfalt ara yüzeyinde su ve nemin olmasıdır [118].



Şekil 24. Kaplamada soyulma oluşumu [175].



### 1.6.2.3. Çatlaklar

Çatlaklar, kaplama yüzeyinde trafik, çevre ve iklimin etkisi ile çok çeşitli şekilde, genişlikte ve derinlikte oluşan kusurlardır. Çatlaklar genellikle stabilite, yorulma ve yansıma çatlakları olmak üzere üç grup altında toplanır. Stabilite çatlakları, trafik yüklerinin etkisiyle kaplamanın altında oluşan çekme gerilmelerinin kaplamanın çekme mukavemetini aşması sonucu oluşur. Kaplamaya etki eden trafik yükleri, kaplamanın her tabakasında basınç ve çekme gerilmeleri oluşturur. Basınç gerilmeleri tabakanın üstünde, çekme gerilmeleri ise tabakanın altında maksimumdur. Bu yüzden stabilite çatlakları önce tabakaların altında oluşmakta, trafiğin etkisi sonucu zamanla tabakaların üst tarafına doğru ilerlemektedir [160].

Yansıma çatlakları genellikle aşınma tabakalarında görülen ve alt tabakalardaki çatlakların zamanla yükselmesiyle oluşan çatlaklardır. Genellikle beton kaplamalar ve çimento ile stabilize edilmiş temeller üzerine serilen takviye tabakalarında yansıma çatlaklarına rastlanır. Yansıma çatlakları kaplama altındaki beton plaklardan başlayarak yukarı doğru ya da yüzeyden başlayarak aşağıya doğru oluşabilmektedir [163, 165-167, 176]. Yorulma çatlakları ise ağır trafik yüklerinin tekerrürü ile kaplamanın yorulma mukavemetini aşması sonucu oluşur [160].

#### 1.6.2.3.1. Timsah Sırtı Çatlaklar

Timsah sırtı çatlakları, timsah derisine ya da kümes teline benzer görünümde, değişik boyutta bloklar halinde kaplamanın tüm kesitinde ya da belirli kesimlerinde oluşan çatlaklardır (Şekil 25). Bu tür deformasyonlar, genellikle yetersiz drenaj nedeniyle zemin veya temel tabakasının doygun hale gelmesi sonucu oluşan oturmalarından kaynaklanır. Timsah sırtı çatlaklar genellikle yapısal olarak yetersiz, bozuk bir granüler temel ya da zayıf bir tabii zemin üzerine serilmiş kaplamalarda görülür [160, 163, 166].



Şekil 25. Timsah sırtı çatlaklar [168].

#### 1.6.2.3.2. Düşük Isı Çatlakları

Düşük ısı çatlakları soğuk havalarda asfalt kaplamanın büzülmesi sonucu oluşur. Bu türden çatlaklar trafik etkilerinden ziyade mevsimsel etkiler sonucu meydana gelirler. Düşük ısı çatlakları genellikle; asfalt kaplama yüzeylerinde oluşan çatlaklar ve kaplamanın tüm kalınlığınca oluşan çatlaklar olmak üzere iki grup altında ele alınmaktadırlar (Şekil 26). Düşük ısı çatlaklarının oluşmasında en önemli faktör, asfaltın penetrasyonu ve ısıya olan duyarlılığıdır. Soğuk havanın hakim olduğu bölgelerde yumuşak (yüksek penetrasyonlu) ve ısıya az duyarlı asfalt kullanmak bu türden çatlakların oluşmasını önlemede etkili olabilir. Ayrıca düşük ısı çatlaklarının oluşumunda; asfalt (ısıya duyarlılık, yaşlanma, penetrasyon), karışım (rijitlik, çekme mukavemeti, ısıl genleşme katsayısı), çevresel faktörler (sıcaklık, yıllık sıcaklık farkı ve ısınma-soğuma tekerrürleri) ve diğer faktörler (kaplama kalınlığı, tabakalar arası sürtünme kuvveti) etkili olmaktadır [160].



Şekil 26. Düşük ısı çatlakları [177, 178].

#### 1.6.2.3.3. Diğer Çatlaklar

Kenar çatlakları, derz çatlakları, kayma çatlakları, büzülme çatlakları ve enine çatlaklar gibi çatlak türleri diğer çatlaklar kategorisinde ele alınabilir. Kenar çatlakları genellikle kaplama kenarından 30-50 cm içeride oluşurlar. Banketlerdeki yanal desteğin azlığı, bankette oturma, yetersiz drenaj ve don etkisi, kaplamaya yakın yerlerde bitki örtüsü bulunması ve nem gibi nedenler kenar çatlaklarının oluşmasına neden olur. Derz çatlakları, kaplama ek yerlerinin serme ve sıkıştırma esnasında, uygun olmayan işçilik ve sıkıştırma yapılması nedeniyle zamanla oluşur. Büzülme çatlakları, timsah sırtı çatlaklara benzemelerine rağmen keskin açılı ve genellikle dik açılı olmaları ve blokların büyük olması nedeniyle farklılık göstermektedir. Büzülme çatlakları asfalt karışımından ya da zeminde görülen hacim değişikliklerinden kaynaklanmaktadır. Kayma çatlakları, kaplama tabakasının temel tabaka üzerinde kayması sonucu oluşur. Genellikle yetersiz kaplama kalınlığı, yetersiz yapışma tabakası, aşırı ağır taşıtlar ve karışımın kum içermesi gibi nedenler kayma çatlaklarının oluşmasına neden olur. Enine çatlaklar ise yol eksenine dik olarak oluşan ve nadir görülen çatlaklardır. Genellikle yetersiz drenaj, düşük sıcaklık, yetersiz üstyapı kalınlığı, sericinin uzun süreli duraklaması ve alt tabakadaki çatlağın

yansıması gibi faktörler enine çatlakların oluşmasına neden olmaktadır [118, 160, 169]. Kaplamada oluşan bu çatlak tipleri Şekil 27’de sunulmuştur.



Şekil 27. Kaplamada oluşan çatlak tipleri [168].

### 1.7. Sıcak Asfalt Karışımlarda Kullanılan Agregalar

Asfalt kaplamaların iki temel malzemesinden biri agregadır. Agregada, kum, çakıl, cüruf, kırma taş ve diğer mineral bileşiklerin bağlayıcı bir ortamda (asfalt karışım, portland çimentosu betonu, harç, mastik vb.) ya da bağlayıcısız kullanılmak üzere (demir yollarında balast malzemesi gibi) bir araya getirilmiş halidir [160, 161, 179]. Bağlayıcısız temel ve alttemel tabakalarının tamamı, sıcak asfalt karışımların ağırlıkça %90-95’i ve hacimce %80-85’i, beton (rijit) kaplamaların ağırlıkça %70-80’i ve hacimce %60-75’i agregadan sağlanır. Agregada hem kaplamanın stabilitesine olan katkısı hem de büyük oranda gereksinim duyulması nedeniyle önemli bir yol malzemesidir [160].

Asfalt karışımlarda kullanılan agregalar, asfalt tabakaların daha çok gerilme alması ve trafiğin aşındırıcı etkisine daha çok maruz kalması nedeniyle, temel tabakalarda kullanılan agregalara göre daha üstün niteliklere sahip olmalıdır. Bu nedenle agregaların kaplama tipi için şartnamelerde verilen fiziksel özellikleri sağlaması gerekmektedir [129, 160].

### **1.7.1. Agregaların Sınıflandırılması**

Agregalar, minearolojik, boyut, gradasyon, biçim ve yüzey yapısı, porozite, özgül ağırlık, yüzey alanı ve boşluk olarak sınıflandırılmaktadır [160].

#### **1.7.1.1. Agregaların Mineralojik Sınıflandırılması**

Agregalar genel olarak dere malzemesi, kırmataş ve yapay taşlar olarak elde edilirler. Dere malzemesi, kum-çakıl karışımından meydana gelir ve sahip olduğu olumsuz özellik nedeniyle alttemel hariç yol kaplamalarında tercih edilmezler. Fakat konkasörde kırılarak elde edilen kırma çakıl ve kırma kum kaplama yapımında kullanılabilir. Yapay taşlar, çok gevrek ve porozdurlar. Ayrıca yeterli miktarda üretilemezler ve üretilen miktarlar da çimento sanayinde kullanıldıkları için yol kaplamalarında kullanılmazlar. Kırmataş mineral agregalar, yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agregalardır. Püskürük (magmatik veya katılaşım), tortul (sedimenter) ve metamorfik (başkalaşım) olarak sınıflandırılan doğal kayaların kırılması ile elde edilirler. Püskürük sınıfa dahil olan kayalar, bazalt, andezit, granit, gabro, kuars ve grafirdir. Çok sert yapıya sahiptirler ve porozlukları genellikle düşüktür. Tortul sınıfa sahip kayalar kumtaşı, kalker, kum-çakıl ve konglomeradır. Metaformik kayalar ise püskürük ve tortul kayaların zaman içinde yüksek basınç ve ısı etkisinde minearolojik ve dokusal değişime uğraması ile oluşurlar. Mermer, serpantin, şist, kuvarsit vb. kayalar metaformik kayalardır [160, 161].

#### **1.7.1.2. Agregalarda Boyut Sınıflandırması**

Agregalar boyutlarına göre kaba, ince ve mineral filler olmak üzere üç grup altında sınıflandırılırlar. Kaba agregası, kırılmış ve elenmiş, taş, çakıl ya da bunların karışımından oluşur. 4.76 mm'lik (No.4) eleğin üstünde kalan kısım kaba agregadır. Temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı malzemenin olmalıdır. Sıcak asfalt karışımlarda kullanılacak kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri [132].

Deney	Şartname Limitleri <sup>c</sup>		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	≤ 30 (LA <sub>30</sub> )	≤ 27 (LA <sub>27</sub> )	TS EN 1097-2 <sup>a</sup> AASHTO T 96
Aşınma Direnci (Micro-Deval) <sup>b</sup> , % Kayıp	≤ 25 (M <sub>DE</sub> 25)	≤ 20 (M <sub>DE</sub> 20)	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (Donma deneyi, MgSO <sub>4</sub> ile kayıp) , %	≤ 18 (MS <sub>18</sub> )	≤ 16 (MS <sub>16</sub> )	TS EN 1367-2
Kırılmışlık, ağırlıkça % (Tüm yüzeyi kırılmış-tüm yüzeyi yuvarlak)	≥ 95 - ≤ 0 (C <sub>95/0</sub> )	≥ 95 - ≤ 0 (C <sub>95/0</sub> )	TS EN 933-5
Yassılık İndeksi, %	≤ 30	≤ 25	BS 812
	≤ 25 (FL <sub>25</sub> )	≤ 20 (FL <sub>20</sub> )	TS EN 933-3 <sup>a</sup>
Cilalanma Değeri, %	≥ 35 (PSV <sub>35</sub> )	≥ 50 (PSV <sub>50</sub> )	TS EN 1097-8
Su Emme, %	≤ 2.5 (WA <sub>24</sub> 2.5)	≤ 2.0 (WA <sub>24</sub> 2.0)	TS EN 1097-6
Soyulma Mukavemeti, % Asfalt Kaplı Yüzey (24 saat 60°C suda bekletmeden sonra)	≥ 60	≥ 60	TS EN 12697-11
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, %	≤ 0.3	≤ 0.3	(ASTMC 142) AASHTO T 112
<sup>a</sup> Referans metot.			
<sup>b</sup> Gerek görüldüğünde yapılacaktır.			
<sup>c</sup> Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043'deki sınıfını gösterir.			

İnce agrega, 4.76 mm'lik (No.4) elekten geçerek, 0.075 mm'lik (No.200) elek üzerinde kalan malzemedir. İnce agrega, kırılmış taş, çakıl ve kum ile bunların karışımından oluşur. Temiz, sağlam ve dayanıklı olmalıdır. Sıcak asfalt karışımlarda kullanılacak ince agrega özelliklerinin Tablo 5'de verilen şartname değerlerini sağlaması gerekmektedir.

Tablo 5. İnce agreganın özellikleri [132].

Deney		Şartname Limitleri		Deney Standardı
		Binder	Aşınma	
Plastisite İndeksi, maksimum %		NP	NP	TS 1900-1
Organik Madde (%3 NaOH ile)		Negatif	Negatif	TS EN 1744-1 Madde 15.1
Su Emme, %		≤ 2.5 (WA <sub>24</sub> 2.5)	≤ 2.0 (WA <sub>24</sub> 2.0)	TS EN 1097-6
Metilen Mavisi, g/kg	İnce agreganın 0-2 mm kısmına	≤ 1.5 (MB <sub>1.5</sub> ) ≤ 3.0 (MB <sub>3.0</sub> )*	≤ 1.5 (MB <sub>2.0</sub> ) ≤ 3.0 (MB <sub>3.0</sub> )*	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0-2 mm kısmına	≤ 3.0 (MB <sub>3.0</sub> )*	≤ 3.0 (MB <sub>3.0</sub> )*	
*Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanamaması durumunda bu şart aranacaktır.				

Mineral filler, tamamı 0.425 mm (No.40) elekten geçip, ağırlıkça en az %70'i 0.075 mm (No.200) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır (Tablo 6). Mineral filler, taş tozu, sönmüş kireç, mermer tozu, çimento, uçucu kül gibi maddelerden oluşur. İçerisinde kil, toprak, organik ve zararlı madde olmamalıdır [118, 128, 160].

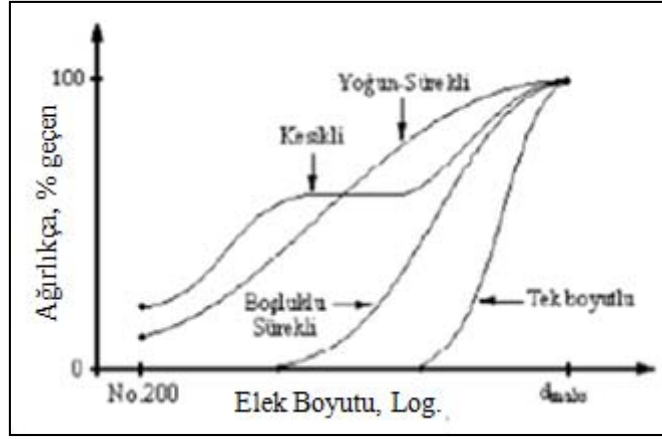
Tablo 6. Mineral fillerin gradasyon limitleri [132].

Elek Boyu, mm (No)	Ağırlıkça, % geçen
0.425 (No.40)	100
0.075 (No.200)	70-100

### 1.7.1.3. Agregalarda Gradasyon Sınıflandırması

Gradasyon, agregaya harmanını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımıdır. Agregada gradasyonu karışımın stabilite ve işlenebilirlik özelliğini ortaya koyar. Belirli bir karışım için maksimum dane boyutu ve belirli boyuttaki danelerin ağırlıkça miktarlarının sınırları belli şartnameler ile ölçülür. Maksimum dane boyutu arttıkça işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşır, segregasyon artar, boşluk miktarı ve agregada danelerinin toplam yüzeyi azalır, yoğunluk ve stabilite artar ve bağlayıcı ihtiyacı azalır.

Agregalar gradasyon yönünden kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli ve tek-boyutlu gradasyon olmak üzere dört grup altında ele alınır (Şekil 28).



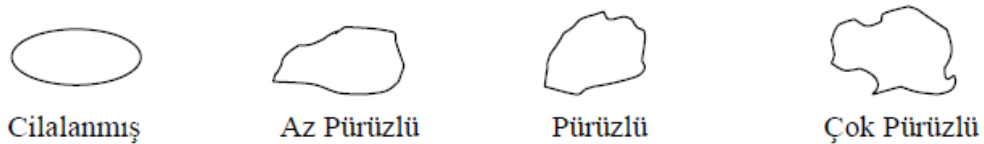
Şekil 28. Agregada gradasyon tipleri [160].

#### 1.7.1.4. Agregalarda Biçim ve Yüzey Yapısı

Agrega danelerinin biçimleri yol kaplamalarında kullanılan karışımların; sıkışma direnci, işlenebilirlik, yoğunluk, stabilite, kayma mukavemeti ve içsel kilitleme ve içsel sürtünme açısı özelliklerini etkiler.

Yuvarlak biçimli agregaların açısız (köşeli) biçimli agregalara kıyasla işlenebilirlik özellikleri daha yüksektir. Açısız biçimli agregalar ise stabilite açısından daha üstün özelliklere sahiptir.

Agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğü ya da cilalılık durumu agregaların yüzey yapısı ile ilgilidir. Agreganın yüzey yapısı, agreganın bağlayıcı ile kurduğu bağ üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Şekil 29). Agregada danelerinin yüzey pürüzlülüğü arttıkça karışımın işlenebilirliği azalmakta ancak içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma direnci ve asfalt ile adezyon kuvveti artmaktadır. Fakat karışımın boşluk hacmi, sıkışmaya karşı direnci ve gradasyon gibi olumsuz özellikleri de artmaktadır [118, 160].



Şekil 29. Agregaların yüzey yapısı sınıflandırması [160].



### 1.7.1.5. Agregalarda Porozite, Yüzey Alanı ve Boşluk

Agrega danelerinin porozitesinin (su emme yeteneğine sahip boşlukların miktarı) belli bir düzeyde olması gereklidir. Yeterli poroziteye sahip agregada daneleri asfaltın emilmesine olanak sağlar, agregada ile bağlayıcı film tabakası arasında kuvvetli bir adezyon oluşturarak stabilitenin artmasına ve suyun etkisi ile film tabakasındaki soyulmanın azalmasına neden olur. Ancak aşırı poroz (gözenekli) agregalar özgül ağırlıklarının az olmasına, yoğunluğunun ve stabilitesinin düşük olmasına neden olur. Ayrıca gerekli olan miktardan fazla asfalt kullanımı sıcak havalarda kuma-terleme problemlerine yol açar. Genel olarak sıcak asfalt karışımlarında %0.5-2.5, temel tabakalarında ise don direncinin yüksek olabilmesi için sıfır porozite istenir. Porozite, Şekil 30’da görüldüğü gibi “çok gözenekli”, “az gözenekli” ve “gözeneksiz” olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılır [160].



Şekil 30. Porozite sınıflandırması [160].

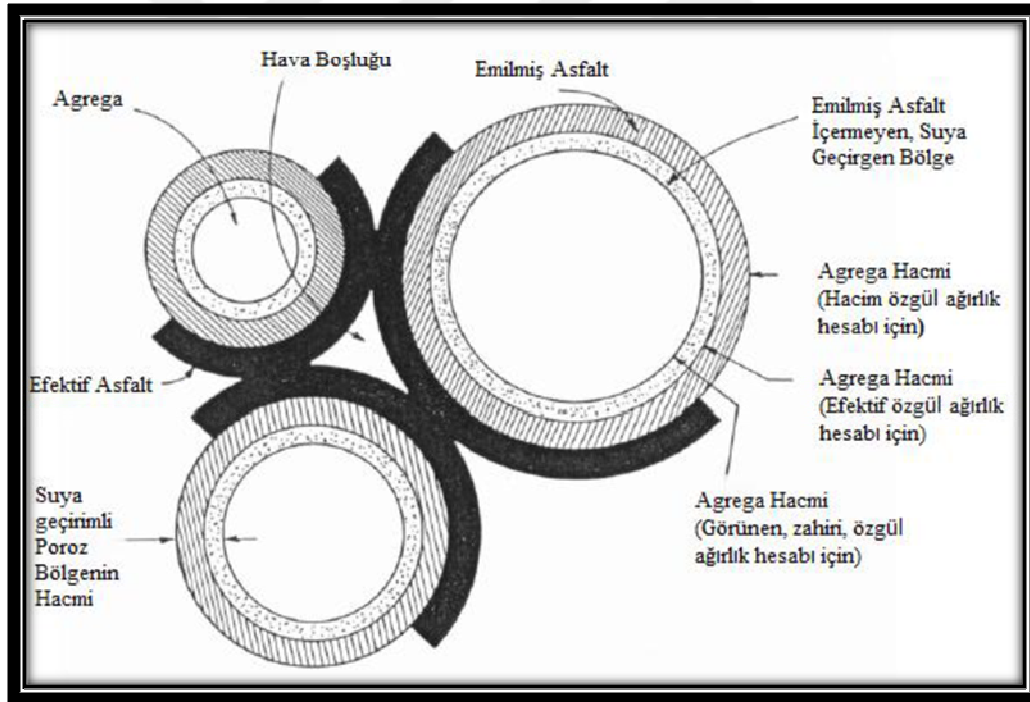
Agregada danelerinin sahip oldukları yüzey alanlarının toplamı ile agregada daneleri arasındaki boşlukların toplamı, bağlayıcı veya bağlayıcısız karışımların tüm özelliklerine doğrudan etki eder. Toplam yüzey alanı ve boşluk alanı hacmi, gradasyon, dane biçimi, dane çapı gibi özelliklere bağlıdır. Agregada dane çapı küçüldükçe toplam yüzey alanı ve boşluk hacmi önemli ölçüde artmakta, buna bağlı olarak gerekli bağlayıcı ihtiyacı artmakta ve boşluk miktarının artması sonucu karışımın yoğunluğu azalmaktadır. Bu nedenle esnek üstyapı kaplamalarında kullanılacak agregaların maksimum dane çapı karışımın özelliklerini optimize edecek şekilde seçilmelidir [160].

### 1.7.1.6. Agregalarda Özgül Ağırlık

Özgül ağırlık, bir maddenin birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25°C'deki suyun ağırlığına oranıdır. Agreganın özgül ağırlığı sıcak asfalt karışımlarda kullanılacak bağlayıcı oranını belirlemeye yardım eder. Sıcak asfalt karışımlarda kullanılan agregalar için seçilecek özgül ağırlık, sıkıştırılmış kaplamada hesaplanan hava boşlukları miktarını en doğru şekilde vermelidir [129].

Karışım hesapları için agregaların özgül ağırlıklarının bilinmesi gerekir. Agregada üç tip hacim içerdiğinden dolayı;

- Zahiri (görünür) özgül ağırlık,
- Hacim özgül ağırlığı veya kuru özgül ağırlık,
- Efektif özgül ağırlık olmak üzere üç farklı özgül ağırlığa sahiptir (Şekil 31).



Şekil 31. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimler [124].

Agreganın özgül ağırlığı hesaplanırken zahiri özgül ağırlık kullanılırsa, asfaltın su geçirimli tüm boşluklar tarafından absorbe edildiği kabul edilir. Hacim özgül ağırlık kullanıldığında, asfaltın su geçirimli boşluklar tarafından absorbe edilmediği kabul edilir. Efektif özgül ağırlık, agregada tarafından absorbe edilen asfalt miktarını dikkate aldığından,

sıkıştırılmış asfalt kaplama karışımındaki boşluk hesabı için en doğru sonucu vermektedir [164].

### **1.7.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri**

Agregaların stabilitesi, durabilitesi ve adezyonu, doğrudan ya da dolaylı olarak yol kaplamalarının tüm özelliklerine etki eder. Bu nedenle agreganın fiziksel özellikleri, yol kaplamalarının stabilitesi ve performansı için çok önemlidir. Agregaların stabilitesi, trafik yüklerinden ya da zeminin hacim değiştirmesi nedeniyle deformasyonlara karşı gösterdiği dirençtir. Stabilite, kayma mukavemeti, CBR, esneklik modülü ya da yatak atsayısı ile ölçülerek belirlenir. Agregaların durabilitesi, kırılma, aşınma ve parçalanmaya karşı gösterdiği dirençtir. Aşınmayla ince malzeme miktarı artarak agreganın gradasyonu bozulur ve dren kabiliyeti azalır. Parçalanma, agrega danelerinin mekanik etkilerden ziyade fiziko-kimyasal etkilerle parçalanması ile oluşur. Bu türden aşınma, suyun etkisi, agreganın porozluğu ve mineralojik yapısıyla ilgilidir. Asfaltla kaplı agrega danelerinin suyun etkisi ile soyulmaması için agrega ile bağlayıcı arasındaki adezyonun yüksek olması gerekmektedir. Agregaların adezyon kabiliyeti yüzey pürüzlülüğü, porozluk ya da absorpsiyon özelliği, yüzey alanı, yüzeysel çekim enerjisi, karıştırma ısısı ve temizliği arttıkça artar [118, 160].

### **1.8. Sıcak Asfalt Karışımlara Uygulanan Deneyler**

Yol üstyapısının etkili bir tasarımı için, üstyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin ve karışımların özellikleri net bir şekilde bilinmelidir. Üstyapı tasarımında iki grup malzeme özelliği dikkate alınmaktadır. Birincisi, yapının analizi için gerekli olan yük-deformasyon veya gerilme-şekil değiştirme özellikleri; ikincisi ise bozulma şeklini (deformasyon) belirleyen özelliklerdir.

Üstyapı tasarımı yapılırken arazideki malzemenin mekanik özelliklerinin kullanılması ideal olan yoldur fakat arazi deneyleri yapmak birçok güçlük içermektedir. Bu nedenle özelliklerin tespit edilmesi için sıklıkla laboratuvar deneyleri tercih edilir. Laboratuvar deneylerinde sıcaklık, yükleme süresi, gerilme durumları, sıkıştırma gibi koşullar mümkün olduğunca arazi şartlarına benzer olacak şekilde düzenlenmelidir. Arazi

davranışlarının belli başlı bazı yönlerini sağlayan birçok basitleştirilmiş deney bulunmaktadır [118, 128].

### 1.8.1. Marshall Metodu ile Karışım Dizaynı

Marshall metodu, maksimum dane boyutu 2.54 cm (1 inch) ya da daha küçük agrega ihtiva eden ve bağlayıcı olarak asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanan sıcak asfalt kaplama karışımlarına uygulanır [161]. Sıcak karışımların laboratuvar dizaynı ve sıcak asfalt karışım kaplamalarının uygulamadaki kontrollerinde Marshall Metodu kullanılır [180-183].

Marshall metodu ile sıcak asfalt karışımların dizaynı yapılırken ilk olarak karışımda kullanılacak agreganın elek analizi yapılarak karışımın granülometrisi belirlenir ve granülometri eğrisi çizilir. Sonrasında karışım granülometrisinin tolerans sınırları belirlenerek tolerans eğrileri çizilir. Daha sonra şartname sınır eğrileri ve şartname sınırlarının ortalaması ile ideal şartname eğrisi çizilir. Karışım granülometri eğrisi ile şartname ideal eğrisinin çakışmasını ya da ona çok yakın bir granülometri eğrisi elde edilmesini sağlayan karışım oranları belirlenir [128, 161].

Karayolu Teknik Şartnamesi'ne göre aşınma tabakası için gradasyon limitleri ve tolerans sınırları sırasıyla Tablo 7 ve 8'de verilmiştir.

Tablo 7. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri [132].

Elek boyutu	TİP-1	TİP-2	TİP-3 Çok İnce Aşınma
19 mm (3/4")	100		
12.5 mm (1/2")	88-100	100	100
9.5 mm (3/8")	72-90	80-100	90-100
6.0 mm (1/4")	-	-	25-33
4.75 mm (No.4)	42-52	55-72	23-31
2.00 mm (No.10)	25-35	36-53	20-27
0.425 mm (No.40)	10-20	16-28	12-18
0.180 mm (No.80)	7-14	8-16	
0.075 mm (No.200)	3-8	4-8	7-11

Tablo 8. Karışımın tolerans sınırları [132].

Malzeme	Toleranslar
4.75 mm (No.4) ve daha büyük eleklerden geçenler	±%4
2.00 mm(No.10)-0.180 mm (No.80) eleklerden geçenler	±%3
0.075 mm (No.200) eleğinden geçen	±%2
Asfalt bağlayıcı	±%0.2

Agrega karışımı, herbiri değişik özgül ağırlıklara sahip kaba agregaya, ince agregaya ve mineral fillerden oluşur. Toplam agreganın hacim ve zahiri özgül ağırlıkları Formül 7 ve 8 ile efektif özgül ağırlığı ise Formül 9 ile hesaplanır.

$$G_{sb} = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{G_{kb}} + \frac{\%İ}{G_{ib}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad (7)$$

$$G_{sa} = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{G_{ka}} + \frac{\%İ}{G_{ia}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad (8)$$

$G_{sb}$  : Agregaya karışımının hacim özgül ağırlığı

$G_{sa}$  : Agregaya karışımının zahiri özgül ağırlığı

$\%K, \%İ, \%F$  : Kaba, ince ve filler agregaların ağırlıkça yüzdeleri

$G_{kb}, G_{ib}$  : Agregaların hacim özgül ağırlıkları

$G_{ka}, G_{ia}, G_{fa}$  : Agregaların zahiri özgül ağırlıkları

$$G_{ef} = \frac{100}{\frac{100 + W_a}{D_t} - \frac{W_a}{G_b}} \quad (9)$$

$G_{ef}$  : Agregaya efektif özgül ağırlığı

$W_a$  : Kuru agreganın yüzdesi olarak asfalt

$D_t$  : Gevşek kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı

$G_b$  : Asfalt özgül ağırlığı

Hesaplar sonunda elde edilen agreganın efektif özgül ağırlık değeri, hacim ve zahiri özgül ağırlık değerleri arasında olmalıdır. Şayet efektif özgül ağırlık, bu iki değer arasında çıkmazsa, gevşek kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlık ( $D_t$ ) deneyi tekrarlanır. Eğer bu aralıklarda  $D_t$  elde edilemiyorsa hacim ve zahiri özgül ağırlıkların ortalaması efektif özgül ağırlık olarak alınabilir.

Optimum asfalt içeriğini tespit etmek için belirli bir orandan başlayarak ardışık olarak agreganın %0.5'i oranında artan 4-7 farklı asfalt içeriğinde ve her asfalt içeriği için üçer Marshall briketi hazırlanır. Her bir briket için belirlenen gradasyonda 1100-1200 gr agregaya tartılır. Hazırlanan agregaya ve asfalt şatnamede belirtilen sıcaklık aralıklarında (Tablo 9) agregaya daneleri tamamen asfalt ile kaplanıncaya kadar karıştırılır [128,136, 161].

Tablo 9. Malzemelerin Karıştırma Sıcaklıkları [132].

Asfalt Bağlayıcı	Asfalt		Agrega	
	Min (°C)	Max (°C)	Min (°C)	Max (°C)
40/60, 50/70 pen asfalt ile hazırlanan karışımlarda	145	160	150	165
70/100 pen asfalt ile hazırlanan karışımlarda	140	155	145	160

Asfalt ve agreganın karıştırılması tamamlandıktan sonra karışım kalıba doldurulur ve 45.7 cm'den serbest düşüş yapan Marshall tokmağı yardımıyla her iki yüzüne 75 darbe uygulanarak sıkıştırılır (Şekil 32). Sıkıştırılan briketler soğutulduktan sonra, kalıptan çıkarılarak havadaki ağırlıkları (A), doygun kuru yüzey ağırlıkları (B) ve sudaki ağırlıkları (C) tartılır. A, B, C ağırlıkları briketlerinin özgül ağırlıkları, boşluk oranları ve asfaltla dolu boşluk oranlarının belirlenmesinde kullanılır (Formül 10-16 ).



Şekil 32. Marshall briketi üretimi

$$D_p = A / (B - C) \quad (10)$$

$$D_t = \frac{100 + W_a}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (11)$$

$$P_{ba} = 100 \cdot \frac{G_{ef} - G_{sb}}{G_{sb} \cdot G_{ef}} \quad (12)$$

$$P_{be} = W_a - P_{ba} \quad (13)$$

$$VMA = 100 - \frac{D_p \cdot (100 - \frac{W_a \cdot 100}{100 + W_a})}{G_{sb}} \quad (14)$$

$$V_h = \frac{D_t - D_p}{D_t} \cdot 100 \quad (15)$$

$$V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \cdot 100 \quad (16)$$

- $D_p$  : Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı  
 $P_{ba}$  : Absorbe edilen asfalt, agreganın ağırlıkça yüzdesi  
 $P_{be}$  : Efektif asfalt, agreganın ağırlıkça yüzdesi  
 $VMA$  : Agregalar arası boşluk  
 $V_h$  : Toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşluğu  
 $V_f$  : Asfaltla dolu boşluk

Yükseklikleri ve gerekli ağırlıkları belirlenen briketler Marshall stabilitelerinin ve akmalarının belirlenmesi amacıyla briketler, 60°C sıcaklıktaki suda 30-40 dk bekletildikten sonra Marshall stabilite cihazına yerleştirilerek yüklenir. En yüksek yük değeri bulununcaya kadar yükleme devam ettirilir ve en yüksek yükleme değerinde akma okunur (Şekil 33).



Şekil 33. Briketlerin su banyosunda kür edilmesi ve Marshall deneyi

Marshall stabile deneyinde, standart briket yüksekliği 63.5 mm'dir. Bu yükseklikten farklı yükseklikte ölçülen briketlerin stabilite değerleri Ek Tablo 13'de verilen düzeltme katsayılarıyla çarpılır.

Briketlerin boşluk, yoğunluk ve stabilite analizleri yapıldıktan sonra optimum asfalt içeriğinin belirlenmesi için  $D_p - W_a$ ,  $V_f - W_a$ ,  $V_h - W_a$  ve stabilite- $W_a$  grafikleri çizilir.

- $D_p - W_a$  grafiğinden maksimum  $D_p$  değerini sağlayan  $W_a$  değeri  $W_{a1}$ ,
- $V_f - W_a$  ve  $V_h - W_a$  grafiklerinden şartname limitlerinin (Tablo 10) ortalamasını sağlayan  $W_a$  değerleri  $W_{a2}$  ve  $W_{a3}$ ,
- Stabilite- $W_a$  grafiğinden maksimum stabiliteyi sağlayan  $W_a$  değeri  $W_{a4}$  olmak üzere optimum asfalt içeriği Formül 17 ile hesaplanır [128, 161].

$$\text{Optimum asfalt içeriği} = (W_{a1} + W_{a2} + W_{a3} + W_{a4}) / 4 \quad (17)$$



Tablo 10. Asfalt betonu dizayn kriterleri [132].

Özellikler	Binder		Aşınma TİP-1, TİP-2		Aşınma TİP-3		Deney Standardı
	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	75		75		75		TS EN 12697-30
Marshall Stabilitesi, kg	750	-	900	-	400	-	TS EN 12697-34
Boşluk, %	4	6	3	5	5	12	TS EN 12697-8
Asfaltla Dolu Boşluk, %	60	75	65	75	-	-	TS EN 12697-8
Agregalar Arası Boşluk (VMA), %	13	15	14	16	-	-	TS EN 12697-8
Akma, mm (10 <sup>-2</sup> in)	2(8)	4(16)	2(8)	4(16)	2(8)	4(16)	TS EN 12697-34
Filler/Asfalt Oranı	-	1.4	-	1.5			
Asfalt (Ağırlıkça, 100'e)	3.5	6.5	4.0	7.0	5.0	8.0	TS EN 12697-1
Sıkıştırılmış Asfalt Karışımların Sudan Kaynaklarına Bozulmalara Karşı Direnci, İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı, min. %	80		80		80		AASHTO T283
Tekerlek İzinde Oturma (30.000 devirde, 60°C'de), max. %	-		8		-		TS EN 12697-22
Tekerlek İzinde Oturma (3.000 devirde, 60°C'de 5 cm kalınlığında numune), max. %)					7		TS EN 12697-22
Not: Tabakalar arası yapışma dayanımı TS EN 12697-48'e göre yapılabilecektir.							

### 1.8.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, AASHTO T245 ya da ASTM D4123 standartlarına göre yapılır. Deney, Marshall stabilitesi deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney ekipmanları kullanılarak, silindirik asfalt numunesinin çap düzlemi doğrultusuna paralel bir şekilde 50 mm/dakika hızda sabit bir basınç yükü uygulanarak yapılır (Şekil 34). Numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilerek numunenin aldığı en büyük yük değeri kaydedilir [118, 169, 184-186].



Şekil 34. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi sonrasında, mukavemet değeri Formül 18 ile hesaplanır:

$$ITS = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot h \cdot d} \quad (18)$$

ITS : Dolaylı çekme mukavemeti ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$P_{\max}$  : Maksimum yük (kg)

h : Numune yüksekliği (cm)

d : Numune çapı (cm)

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, genellikle asfalt karışımların çekme mukavemeti özelliklerini ve karışımın kohezyon kuvvetini değerlendirmek amacıyla kullanılır. Ayrıca asfalt karışımların yorulma ve sıcaklık nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder. Bunların yanında dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, asfalt karışımlarda yorulma çatlaklarının oluşma potansiyelinin ve optimum asfalt içeriğinin tespit edilmesinde de kullanılabilir [118, 128].

### 1.8.3. Dolaylı Çekme Deneyi

Dolaylı çekme deneyi (Indirect Tensile Strength Modulus) dinamik yükler altındaki asfalt karışımların esnekliğini tespit etmek amacıyla yapılan bir deneydir. Sıcak asfalt karışımların esneklik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direk basınç, burulma ve dolaylı çekme deneyleri uygulanabilmektedir. Bu deneylerin her biri, viskoelastik bir malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığı kabulüne dayanmaktadır. Deney yöntemleri periyodik olarak uygulanan yükü ve bu esnada oluşan ani deformasyonları içermektedir. Esneklik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır [118, 128, 187].

Asfalt kaplamaların en önemli performans özelliği esneklik modülüdür ve asfalt kaplamalarda yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Esneklik modülü, trafik etkisiyle kaplamanın altında meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonları kontrol eder. Dolaylı çekme deneyi, farklı sıcaklıklarda ve yükleme süreleri altında yapılır, her bir sıcaklık ve yükleme süresi için numunelere ait esneklik modülü değerleri belirlenir [169, 188, 189].

Dolaylı çekme deneyi, BS DD 213 standardına göre tanımlanmış hasarsız ve deformasyon kontrollü bir deneydir. Deney, Asfalt Tester cihazı kullanılarak yapılır. Asfalt Tester cihazı Şekil 35'te sunulmuş olup, deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Bu deneyde standart sıcaklık 25°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde farklı sıcaklıklarda deney yapılabilir. Deney öncesinde numuneler en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, tahmini poisson oranı, hedef yatay deformasyon, yük etki süresi ve yük artış süreleri, tahmini rijitlik modülü gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Sonrasında numuneler, Şekil 36'da gösterildiği biçimde yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler ayarlanmaktadır.



Şekil 35. Asfalt Tester cihazı



Şekil 36. Dolaylı çekme deneyi

Dolaylı çekme deneyinde, numuneye dolaylı çekme mukavemeti değerinin %10'u ile %50'si arasında değişen bir yük belirlenen bir periyot boyunca beş kez yarı sinüzoidal

(haversin) olarak uygulanır. Numune içerisinde oluşan yatay ve düşey deformasyonlar ölçülür. Esneklik modülü değeri için bir numuneye iki defa deney yapılır. İlk deney bittikten sonra numune 90° çevrilerek ikinci defa deneye tabi tutulur ve esneklik modülü değeri olarak iki deney sonucunun ortalaması alınır [136]. Esneklik modülü ( $E_m$ ), uygulanan yük, kabul edilen veya hesaplanan poisson oranı ve numune yüksekliğine bağlı olarak Formül 19'daki gibi hesaplanır.

$$E_m = \frac{P \cdot (\nu + 0.2734)}{H_y \cdot h} \quad (19)$$

- $E_m$  : Esneklik modülü (MPa)  
 $P$  : Maksimum yük (N)  
 $H_y$  : Toplam yatay deformasyon (mm)  
 $h$  : Numune kalınlığı (mm)  
 $\nu$  : Poisson oranı

Sıcaklık, yükleme frekansı ya da hızı ve karışımın hava boşluğu, karışımın esneklik modülünü etkileyen en önemli faktörlerdir. Düşük sıcaklıklar, yüksek yükleme hızı ve yüksek viskoziteli asfalt kullanımı karışımın esneklik modülünü arttırmaktadır. Esneklik modülü, deneyde kullanılan numunenin büyüklüğüne ve poisson oranına göre farklılık gösterdiğinden 100 mm ve 150 mm'lik numunelerin poisson oranları Formül 20 ve 21 ile hesaplanabilir [128].

$$\nu = 3.59 \cdot \frac{H_y}{V_d} - 0.27 \quad (100 \text{ mm}' \text{lik numuneler için}) \quad (20)$$

$$\nu = 4.09 \cdot \frac{H_y}{V_d} - 0.27 \quad (150 \text{ mm}' \text{lik numuneler için}) \quad (21)$$

- $H_y$  : Yatay deformasyon (mm)  
 $V_d$  : Düşey deformasyon (mm)

Dolaylı çekme deneyi, BS DD 213 ve ASTM D4123 standartları ile belirlenmekte ve numunelere zarar vermemektedir. Bu nedenle bir numune ile birden fazla deney yapma

imkanı bulunmaktadır. Numunede kalıcı deformasyonları azaltmak için deneye en düşük sıcaklıklarda, en kısa yükleme süresi ve en düşük yükte başlanmalıdır [118, 128, 190, 191].

#### 1.8.4. Statik Sünme Deneyi

Statik sünme deneyi, sıcak asfalt karışımların statik yükler altındaki dayanımlarını tespit etmek amacıyla numune üzerine bir yük uygulayıp yük kaldırıldıktan sonra oluşan kalıcı deformasyonun ölçülmesi esasına dayanır. Bu deney, yoğun gradasyonlu sıcak karışımların dairesel ve tek eksenli basınç yüklemesi altında sünme modülü değerinin belirlenmesini içermektedir. Karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerini değerlendirmek amacıyla da kullanılmaktadır. Statik sünme deneyi sonucunda elde edilen sünme modülü değeri, ısı ve dingil yükleriyle karşılaşan sıcak karışımların düşük sıcaklıktaki sertliğinin tahmininde, çatlama potansiyeli veya tekerlek izinin hesaplanmasında kullanılır. Ayrıca statik sünme modülü değeri, numunelerin değerlendirilmesi yanında üstyapı tasarımında ve değerlendirme modellerinde kullanılabilir [118, 123, 169, 185, 192, 193]. Deney sırasında bir saatlik süre boyunca numuneye belirli bir statik eksenel gerilme ( $\sigma$ ) uygulanarak, zamanın bir fonksiyonu olarak eksenel deformasyonlar ölçülmektedir. Numunenin ilk yüksekliği belli olduğundan, eksenel şekil değiştirme ( $\epsilon$ ) ve sıcaklık ile yükleme zamanına bağlı olarak, Sünme modülü ( $E_{cq}$ ) değeri Formül 22'deki gibi hesaplanır.

$$E_{cq}(t) = \sigma / \epsilon_c(t) \quad (22)$$

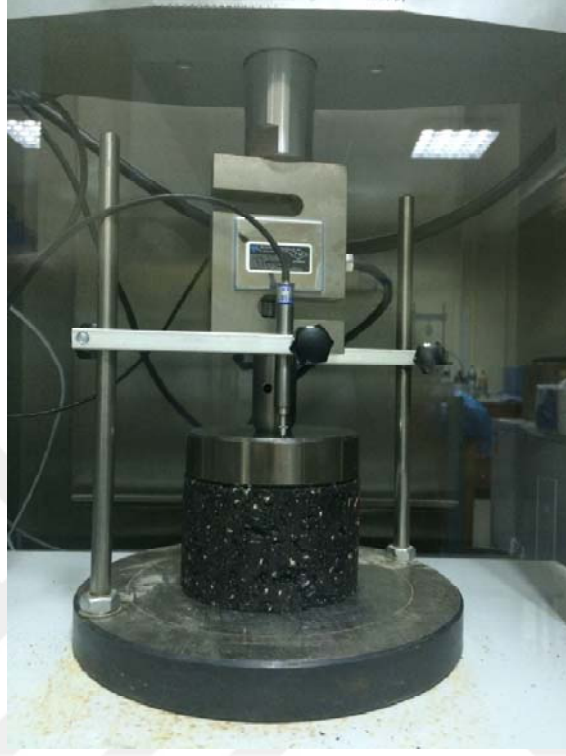
$E_{cq}(t)$  : t anındaki sünme modülü (MPa)

$\sigma$  : Uygulanan gerilme (Mpa)

$\epsilon_c(t)$  : t anında oluşan toplam kalıcı deformasyon (mm/mm)

Statik sünme deneyi Şekil 37'de gösterildiği gibi deney düzeneği kullanılarak Asfalt Tester cihazında yapılır. Deneye başlamadan önce karışım numuneleri, deney sıcaklığında en az 3 saat bekletilir. Sonrasında numuneler yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek düşey deformasyonu ölçecek sensörler ayarlanır. Numune yüksekliği ve çapı bilgisayara girilir. Cihaz kabini içindeki referans numunesinin içerisinde ve yüzeyinde bulunan

sıcaklık ölçen sensörlerin aynı sıcaklık değerini göstermesi ile deneye başlanır [118, 194-196].



Şekil 37. Statik sünme deney düzeneği

### 1.8.5. Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deneyi

Sıcak asfalt karışımların kalıcı deformasyon (tekerlek izi) oluşumuna karşı dayanımını belirlemek amacıyla en sık kullanılan deneylerden biri dinamik sünme (tekrarlı sünme) deneyidir. 1970’li yıllardan itibaren kaplama malzemelerinin kalıcı deformasyona karşı dayanımlarını karakterize etmek amacıyla tekrarlı sünme deneyi kullanılmaktadır. Bu deneyin kolay olması ve kalıcı deformasyon oluşumu ile tutarlı bir ilişkiye sahip olması diğer deneylere göre daha çok tercih edilmesine neden olmaktadır [136, 154, 197, 198].

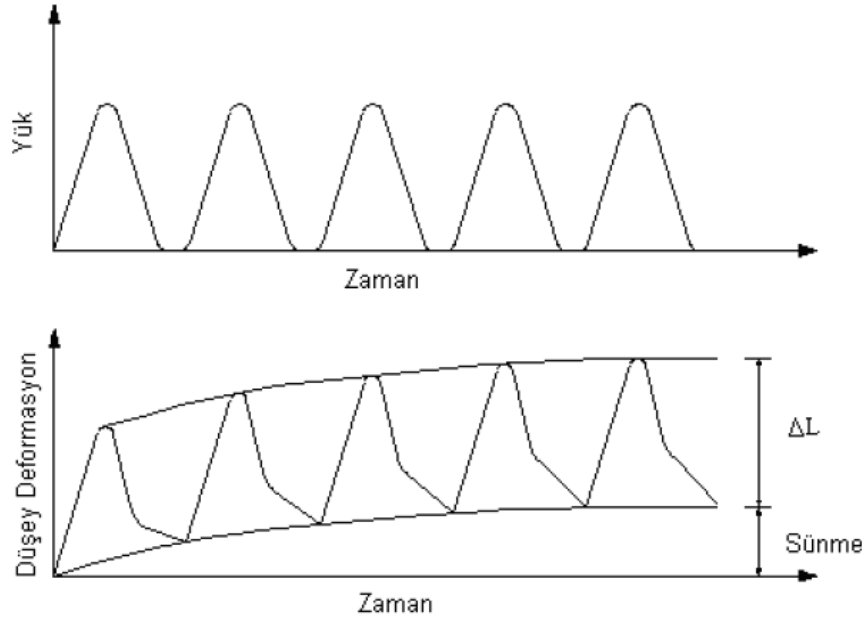
Dinamik sünme deneyinde, numunelere belirli bir vuruş periyodu içerisinde, tek eksenli tekrarlanan basınç yüküne maruz bırakılır ve her bir yük tekrarından sonra numune içerisinde oluşan kalıcı deformasyon ölçülür. Bu deneyde de statik sünme deneyinde olduğu gibi Asfalt Tester cihazı kullanılır (Şekil 38). Dinamik sünme deneyinin, statik sünme deneyinden temel farkı hareketli trafik yükünü temsil kabiliyetidir [136, 167].



Şekil 38. Dinamik sünme deney düzeneği

Dinamik sünme deneyinde sabit bir değerdeki yük, laboratuvarında üretilen ya da araziden alınan silindirik numunenin üzerine tekrarlı olarak uygulanmaktadır. Deney farklı sıcaklıklarda ve yüklemelerde yapılabilmektedir. Tekrarlı sünme deneyi öncesinde sıcaklığın numune bünyesine tam anlamıyla işleyebilmesi için numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, ön yükleme süresi, uygulanacak gerilme, ön yükleme gerilmesi, yük artış süresi ve yük periyodu gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune yükleme çerçevesine yerleştirildikten sonra, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanarak deneye başlanmaktadır. Deneyde ilk olarak girilen süre ve gerilme değerinde ön yükleme uygulanarak birincil oturma oluşması hedeflenmektedir. Ön yükleme süresinin sonunda normal gerilme seviyesinde tekrarlı yük uygulanmaktadır [154]. Uygulanan yük ile numunede oluşan deformasyonların zamana göre değişimi Şekil 39'da gösterilmiştir.





Şekil 39. Yük-zaman ve deformasyon ilişkisi

Sünme ve esneklik modül değerleri Formül 23-27 ile hesaplanabilmektedir [154, 194].

$$\varepsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (23)$$

$$\varepsilon_r = (L2_n - L3_n) / [G - (L3_n - L1)] \quad (24)$$

$$\sigma = F / A \quad (25)$$

$$E_c = \sigma / \varepsilon_c \quad (26)$$

$$E_r = \sigma / \varepsilon_r \quad (27)$$

$\varepsilon_c$  : Toplam plastik (kalıcı) aksenal birim şekil değiştirme

$\varepsilon_r$  : Toplam elastik aksenal birim şekil değiştirme

$E_c$  : Sünme modülü (sertliği)

$E_r$  : Esneklik modülü (sertliği)

$G$  : Numunenin başlangıç yüksekliği (mm)

$L1$  : LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı (mm)

$L2_n$  : n darbe sayısındaki maksimum deplasman (mm) (elastik+plastik)

$L3_n$  : (n+1). darbe uygulanmadan önceki deplasman (mm) (plastik)

$\sigma$  : Maksimum düşey gerilme (kPa)

$F$  : Maksimum düşey yük (N)

$A$  : Numunenin kesit alanı (cm<sup>2</sup>)

### 1.8.6. Dolaylı (İndirekt) Çekme Yorulma Deneyi

Karayollarında kullanılan asfalt malzemeler, az da olsa her taşıt geçişinde bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler mikro hasarlara, mikro hasarlar ise zamanla yorulma çatlakları olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına sebep olmaktadır [199].

Laboratuvar ortamında sıcak asfalt karışımların yorulma dayanımlarını tespit etmek için geliştirilmiş çok sayıda deney bulunmaktadır. Bu deneylerin türlerine göre yükleme şekli, numune geometrisi ve numunede oluşan gerilme artışları farklılık gösterdiğinden yorulma ömürleri de farklılık gösterebilmektedir. Yapılan çalışmalar deformasyon kontrollü deneylerden elde edilen yorulma ömürlerinin, gerilme kontrollü deneylere göre daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır [154].

İndirekt çekme yorulma deneyi ile numune kırılıncaya kadar etki eden yük tekerrür sayısı olarak tanımlanan yorulma ömrü belirlenmektedir. Ayrıca her bir numune türü değişik gerilme seviyelerinde yorulma deneyine tabi tutularak farklı gerilme seviyelerindeki kırılmalara neden olan yük tekerrür sayıları tespit edilmektedir ( $N_f$ ).  $N_f$  ile gerilme ( $\sigma$ ) arasındaki klasik yorulma ilişkisi logaritmik ölçekte çizilen grafikten ya da Formül 18'den yararlanılarak hesaplanmaktadır [154, 200].

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (28)$$

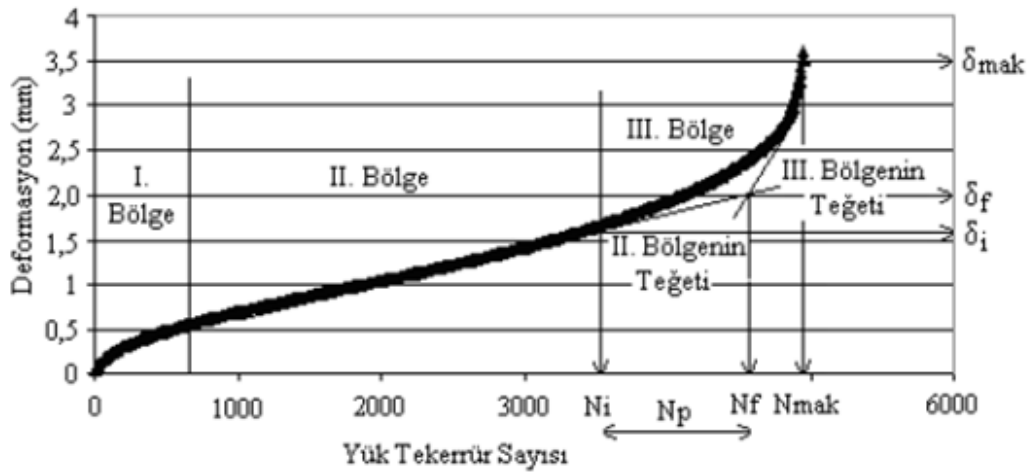
- $N_f$  : Yorulma ömrü  
 $k_1$  ve  $k_2$  : Malzeme karakteristikleri  
 $\sigma$  : Uygulanan gerilme

Sıcak asfalt karışımların yorulma dayanımlarını belirlemek amacıyla eğilme, direkt veya indirekt çekme deneyleri uygulanabilmektedir. İndirekt çekme yorulma deneyi, hem basit olması hem de geometrisi nedeniyle (numunelerin laboratuvar ortamı ya da araziden rahatlıkla temin edilebilmesi) en fazla tercih edilen deneylerden biridir. İndirekt çekme yorulma deneyi, tekrarlı yükleme altında asfalt karışımların yorulma dayanımını karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Deney, Asfalt Tester cihazı ile yapılmaktadır (Şekil 40).



Şekil 40. İndirekt çekme yorulma deney düzeneği

İndirekt çekme deneyi öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune çapı, yüksekliği, uygulanacak gerilme yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune yükleme çerçevesine yerleştirildikten sonra, düşey deformasyonu okuyacak doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Numuneler tam olarak kırılıncaya kadar deneye devam edilmektedir. Gerilim kontrollü yorulma deneyi sonucunda Şekil 41’de görüldüğü gibi yük tekerrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir [154].



Şekil 41. Temsili deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisi

I. bölgede numunedeki boşluklar nedeniyle önce aşırı deformasyon değişimi oluşmakta ardından aksenal deformasyon oranı azalmaktadır. II. bölgede sabit oranda deformasyon mevcuttur ve yaklaşık olarak lineer değişim meydana gelmektedir. III. bölgede çatlak oluşumu başlamıştır. Bu bölgede deformasyon değişimi artmaktadır. Çatlak ilerleme oranı ( $r_p$ ), çatlak oluşuktan itibaren yorulma ömrünün sonuna kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısını belirtmektedir. Çatlak ilerleme oranı Formül 29'da verilmiştir. Çatlak ilerleme oranı çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir [154, 201, 202].

$$r_p = \frac{N_p}{\delta_f - \delta_i} \quad (29)$$

- $r_p$  : Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı, mm)  
 $N_p$  : Çatlama ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı  
 $\delta_f$  : Bozulma anında toplam deformasyon (mm)  
 $\delta_i$  : Çatlak başladığı andaki toplam deformasyon (mm)

### 1.9. Asfalt Modifikasyonu

Esnek üstyapılarda yalnızca uygun tasarım ve kaliteli malzeme kullanımı yeterli değildir. Yapım sürecinde gerekli şartların sağlanmasına da dikkat edilmelidir. Eğer gerekli şartlar yerine getirilmezse deformasyon, ayrışma, çatlama gibi üstyapı performansını azaltan bozulmalar hem daha kısa sürede hem de daha fazla miktarda oluşabilir. Bu durum üstyapının hizmet ömrünün azalmasına neden olur. Fakat her ne kadar uygun tasarım ve yapım koşulları göz önünde bulundurulsa da zamanla trafik, iklim ve çevresel etkiler nedeniyle üstyapılarda bozulmalar meydana gelebilmektedir. Bu bozulmaların başlıcaları tekerlek izi ve çatlaklardır. Bu bozulmalarda esnek üstyapılarda kullanılan asfaltın davranışı önemli rol oynamaktadır. Bu bozulmaların önlenmesi, kaplama ömrünün ve performansının daha üst düzeylere çıkarılabilmesi için son yıllarda asfalt bağlayıcıya ve/veya karışıma çeşitli katkı maddeleri ilave edilerek modifiye edilmesi yönündeki çalışmalarda önemli artışlar olmuştur [118, 128, 129, 153].

Asfalt ve asfalt karışımların modifiye edilmesindeki genel amaç; yol kaplamalarının yüksek hava sıcaklıklarında yeterli rijitliğe sahip olarak kalıcı deformasyonlara karşı dirençli olması, düşük hava sıcaklıklarında ise yeterli esnekliğe sahip olarak çatlama ve kırılmalara karşı dirençli olmalarını sağlamaktır. Asfaltın modifiye edilme sebepleri şu şekilde sıralanabilir [206]:

- Yansıma çatlaklarını geciktirmek,
- Kusmayı ya da terlemeyi azaltmak,
- Düşük kaliteli bağlayıcıların verimini artırmak,
- Yaşlanmaya karşı bağlayıcının direncini artırmak,
- Düşük kaliteli agregaları kullanılabilir hale getirebilmek,
- Karışımın işlenebilirliğini ve sıkışmasını geliştirmek,
- Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek,
- Kaplamanın her bakımdan performansını yükseltmek,
- Kaplamanın uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak,
- Daha ince kaplama tabakası yapılmasını mümkün kılmak,
- Karışımların stabilitesini, mukavemetini ve yorulma direncini artırmak,
- Yüksek sıcaklıklarda daha rijit karışımlar elde ederek tekerlek izlerini azaltmak,
- Agregası ve bağlayıcı arasındaki adezyon kuvvetini artırarak soyulmayı azaltmak,
- Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde ederek çatlakları azaltmak.

### 1.9.1. Asfalt Katkı Maddeleri ve Katkılı Asfaltlarda Aranacak Özellikler

Modifikasyonda kullanılacak katkı maddelerinin ve modifiye edilmiş asfaltların uygulamada etkili, uygun ve ekonomik olması için bazı koşulları sağlaması gereklidir. Bu koşullar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır [118, 121, 128].

a. Asfalt katkı maddelerinde aranacak özellikler:

- Düşük maliyetli olmalıdır.
- Kolay elde edilebilmelidir.
- Asfaltla homojen olarak karışabilmelidir.
- Asfalt, karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidir.

- Düşük sıcaklıklarda asfalt çok kırılğan ya da sert olmamalıdır.
  - Asfaltın, karıştırma ve serme sıcaklıklarında akışkanlığa karşı direncini artırmalıdır.
- b. Katkılı asfaltlarda aranan özellikler:
- Uygun ekipmanla işlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdır.
  - Standart uygulama sıcaklıklarında püskürtebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilmelidir.
  - Uygulama, hizmet ve depolama sırasında sahip oldukları özellikleri korumalı, fiziksel ve kimyasal olarak stabil kalmalıdır.

### **1.9.2. Asfalt Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması**

Asfalt katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Tablo 11’de katkı maddelerinin tipi, örnekleri ve asfalt kıvamına etkisini gösteren genel sınıflandırma verilmiştir.

Tablo 11. Asfalt katkı maddelerinin genel sınıflandırması [121].

Tip	Örnek Katkı Maddeleri	Asfalt Kıvamına Etkisi	
1. Filler	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sülfür</li> <li>Karbon siyahı</li> <li>Mineral filler: Taş tozu Kireç Portland çimentosu</li> </ul>	Sertleştirme	
2. Ekstender (Genleştirici)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sülfür</li> <li>Lignin (Odun özü)</li> </ul>	Sertleştirme	
3. Kauçuk a. Doğal lateks b. Yapay lateks c. Blok kopolimer d. İşlenmiş kauçuk	POLİMERLER	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doğal kauçuk</li> <li>Dönüştürülmüş kauçuk</li> <li>Stiren-Butadien-Stiren (SBS)</li> <li>Stiren-Butadien-Rubber (SBR)</li> </ul>	-
4. Plastik		<ul style="list-style-type: none"> <li>Polietilen</li> <li>Polipropilen</li> <li>Polivinil-Klorid (PVC)</li> <li>Etilen-Vinil-Asetat (EVA)</li> </ul>	Sertleştirme
5. Bileşim		<ul style="list-style-type: none"> <li>3 ve 4 deki polimerlerin karışımı</li> </ul>	-
6. Fiber	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doğal fiber Asbest Taş yünü</li> <li>Yapay Fiberglas Polyester Polipropilen</li> </ul>	Sertleştirme	
7. Oksidan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manganez tuzu</li> </ul>	Sertleştirme	
8. Antioksidan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Karbon</li> <li>Kalsiyum tuzu</li> <li>Kurşun karışımları</li> </ul>	Yumuşatma	
9. Hidrokarbon	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sertleştirme ve doğal asfaltlar</li> <li>Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları</li> </ul>	Yumuşatma veya sertleştirme	
10. Soyulma önleyici	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kireç</li> <li>Aminler</li> </ul>	Yumuşatma	

Katkı maddeleri, polimer ve polimer olmayan katkı maddeleri olmak üzere iki sınıf altında ele alınabilir. Tablo 12’de bu sınıflandırmalar ve örnekleri verilmiştir.

Tablo 12. Polimer, polimer olmayan katkı maddeleri ve örnekleri [121].

Modifikasyon tipi	Örnekler
1. Polimer modifikasyon A. Plastikler a. Termoplastikler  b. Termosetler B. Elastomerler a. Doğal kauçuklar b. Yapay elastomerler  C. İşlenmiş kauçuklar D. Fiberler	Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil-Klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen-Vinil-Asetat (EVA) Epoksi reçineler  Stiren-Butadien-Rubber (SBR) Stiren-Butadien-Stiren (SBS) İsobüten-İsopren kopolimer (IIR)  Polyester fiberler, Polipropan fiberler
2. Polimer olmayan katkı ile modifikasyon A. Fillerler B. Soyulma önleyici katkıları C. Ekstender (Genleştiriciler) D. Antioksidanlar  E. Organo-metal bileşimleri F. Diğerleri	Kil, uçucu kül, karbon siyahı Amidler ve organik aminler Sülfür, lignin Aminler, çinko antioksidanlar, kurşun antioksidanlar, fenolikler Organo-manganez bileşimleri Organo-karbon bileşimleri
3. Kimyasal reaksiyon modifikasyonu	Katkı reaksiyonu (Asfalt+Monomer) Vulkanizasyon (Asfalt+Sülfür) Nitrasyon reaksiyonu (Asfalt+Nitrik asit)

Literatür incelendiğinde bazı modifiyerlerin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkileri Tablo 13’de verilmiştir.



Tablo 13. Yaygın kullanılan bazı modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkisi [121].

Modifiyer	Modifiyerin Bağlayıcı Üzerindeki Etkisi
Yağ	Asfaltın yapısı, bağlayıcılık, viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası
Fiberler	Tiksotropik, çatlak direnci, viskozite
Solvent	Viskozite
Balmumu	Viskozite (sıcak), sertlik (soğuk), bağlayıcılık, adezyon
Filler tozu	Yumuşama noktası, sertlik, viskozite, yoğunluk, maliyet, mekanik sağlamlık
Emülsifikasyon	Viskozite, ıslatma kabiliyeti, uygulama sıcaklığı
Islatma ajanları	Islatma kabiliyeti, adezyon
Ataktik-Polipropilen (APP) Etilen-Vinil-Asetat (EVA)	Sertlik, penetrasyon, Frass kırılma noktası, yumuşama noktası
Stiren-Butadien-Stiren (SBS)	Penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönüş, düşüş sıcaklık kırılabilirliği

Asfalt karışımlarda kimyasal katkıları da sıklıkla kullanılmaktadır. Tablo 14’de asfalt karışımlara eklenen kimyasal katkıların olumlu etkileri verilmiştir. Tablo 15’de ise yaygın olarak kullanılan asfalt modifiyerlerin bozulmalar üzerindeki olumlu etkileri verilmiştir.

Tablo 14. Asfalt karışımlara eklenen kimyasal katkıların olumlu etkileri [169].

Kimyasal Katkılar	Kimyasal Katkıların Rolü								
	Yaşlanma	Nem zararı	Agrega bağlayıcı değişikliği	İşlenebilirlik	Adezyon	Stabilite	Tekerlek izi	Soyulma	Sertlik
Hidrate Kil	x	x		x	x	x	x	x	x
Portland Çimentosu				x	x	x	x		
Manganez Modifiyesi			x	x	x		x	x	x
Katyonik Yüzey Aktif Ajanları	x	x		x	x	x			
Sülfür				x		x	x		x
Organik Polimerler				x		x	x		

x: Olumlu etki

Tablo 15. Yaygın kullanılan asfalt modifiyerlerinin bozulmalar üzerindeki olumlu etkileri

Sınıfı	Modifiyer Tipi	Bozulmalara Etkisi				
		Kalıcı Deformasyon	Yorulma Çatlakları	Düşük Isı Çatlakları	Nem Hasarı	Yaşlanma
Fillerler	Siyah karbon	x				x
	Mineral: Sönmüş kireç	x			x	x
	Uçucu kül	x				
	Portland çimentosu	x				
	Kiremit tozu	x				
Ekstenderler (Genleştiriciler)	Sülfür	x	x	x		
	Odun lignini				x	
Polimerler-Elastomerler	Stiren-Butadien di-block (SB)	x		x	x	
	Stiren-Butadien-Stiren (SBS)	x	x	x		
	Stiren-Butadien-Rubber (SBR)	x		x		
	Polychlorophene lateks	x	x			
	Doğal kauçuk	x				
	Acrylonite-Butadien-Stiren (ABS)	x				
Polimerler-Plastomerler	Etilen-Vinil-Asetat (EVA)	x	x			
	Etilen-Propilen-Diene-Monomer (EPDM)	x				
	Etilen-Acrylate (EA)	x				
	Polyisobutylene	x				
	Polietilen (Düşük ve yüksek yoğunluklu)	x		x		
	Polipropilen	x				
Ufalanmış kauçuk	Farklı boyutlar, iyileştirmeler, işlemler	x	x	x		
Oksidanlar	Manganez bileşikleri	x				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			x		
	Naftenik					
	Parafiniks/mum			x		
	Vakum gaz yağı			x		
	Asfaltenler: Yüksek işlem reçineler	x				
	SDA asfaltenler	x				
	Asfaltenler: DEMEX asfaltenler	x				
	Shale oil				x	x
	Doğal asfaltlar: Trinidad	x	x	x	x	
	Gilsonit	x			x	
Soyulma önleyiciler	Aminler: Amidoaminler				x	
	Poliaminler				x	
	Poliamidler				x	
	Organo-metalikler				x	
Fiberler	Polipropilen	x	x	x		
	Polyester	x				
	Fiberglas					
	Çelik	x	x	x		
	Güçlendiriciler	x	x	x		
	Doğal: Selüloz	x				
	Mineral	x				
Antioksidanlar	Karbamatlar: Kurşun			x		x
	Çinko			x		x
	Siyah karbon	x				x
	Kalsiyum tuzlar					x
	Fenoller					x
	Aminler				x	x

## **1.10. Yapısal Analiz Yöntemleri**

Bu bölümde, sentezlenen bor içerikli katkı maddesinin ve/veya asfalt bağlayıcıların kimyasal, morfolojik ve ısıl stabilite özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan FT-IR, NMR, SEM ve TG analiz yöntemleri açıklanmıştır.

### **1.10.1. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)**

Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR, Fourier Transform Infrared Spevtroskopy), katı, sıvı ya da gaz numunelerden, kızılötesi (infrared) spektrumu elde edilen bir tekniktir. Matematiksel Fourier dönüşümü spektroskopisinde ışımaya şiddeti, zamanın bir fonksiyonudur. Her dalga boyutunu ayrı ayrı taramaya gerek duyulmadan hızlı ve yüksek çözünürlükte spektrumlar elde edilebilir. FT-IR ile moleküler bağ karakterizasyonu yapılarak organik bileşiklerin yapısındaki fonksiyonel gruplar, iki bileşiğin aynı olup olmadığı, yapıdaki bağların durumu, bağlanma yerleri tespit edilebilir. FT-IR oldukça hızlı bir tekniktir. H ve C gibi elementleri içeren minerallerin çalışılmasında, mineral yapı içerisindeki uçucu bileşenlerin konsantrasyonlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır [207, 208].

### **1.10.2. Nükleer Manyetik Rezonans (NMR)**

Nükleer manyetik rezonans (NMR), atom çekirdeklerinin manyetik özelliklerine bağlıdır. NMR spektroskopisi bir molekül hakkında fiziksel, kimyasal ve yapısal bilgi edinmek için kullanılan önemli tekniklerden biridir. Moleküllerin, çözelti içinde üç boyutlu yapıları hakkında ayrıntılı bilgi veren tek yöntem NMR'dır [209]. Ayrıca NMR organik bileşiklerin yapılarının tespit edilmesinde kullanılan en güçlü tekniktir. H, C, N, F ve P elementlerinin çalışılmasında kullanılabilir [210]. Ayrıca NMR ile bir bileşik içindeki atomların bağlanma şekilleri, kimyasal bağların niteliği gibi yapısal özelliklerin aydınlatılması mümkündür [211].

### 1.10.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-Scanning Electron Microscopy), belirli bir yüzeyin, çok küçük alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla taranması prensine dayanır. SEM, birçok dalda araştırma-geliştirme çalışmalarında kullanılmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu sayesinde, yüksek büyütmelerde yüksek çözünürlüklü görüntü alınabilir. Ayrıca SEM ile x300.000 ya da daha fazla büyütmelere kadar morfolojik, yapısal ve elementel bilgiler elde edilebilmektedir [208, 212].

### 1.10.4. Termogravimetrik Analiz (TG)

Termogravimetrik analiz, ağırlığın yani numune kütlesinin, numune sıcaklığına veya zamana göre ölçümüdür. TG’de numune genellikle sabit sıcaklık değerinde ısıtılır veya sabit bir sıcaklıkta tutulur. TG eğrilerinin birinci türevleri, DTG eğrileri olarak adlandırılır. DTG, kütle değişimini gösterir ve zaman ya da sıcaklığa bağlı olarak kullanılabilir. TG ölçümünün sonunda kütle veya % kütlenin zamana ya da sıcaklığa karşı grafiği TG eğrileri olarak görüntülenebilir [213].

## 1.11. Bor

Bor, periyodik cetvelin 5. elementidir. B harfi ile gösterilir ve atom ağırlığı 10.8’dir. Bor siyah renkli, metalle ametal arası yarı iletken özelliğe sahip bir element olup, Şekil 42’de gösterilmiştir. Bor cevherleri ve bileşikleri geniş kapsamlı kullanım alanlarıyla günümüz modern ve ileri teknoloji endüstrilerinin önemli bir unsurudur. M.Ö. 8. yüzyıldan itibaren kullanılan bor bileşiklerinin en önemli kullanım alanları; cam ve emaye üretimi, yakıtlar, alev almayı geciktiriciler, temizleme ve ağartma, metalürji, elyaf ve kompozitler, zirai, tıbbi ve nükleer uygulamalardır [214-217]. Ayrıca binlerce yıl önce Babiller, kıymetli eşyaların eritilmesinde; Mısırlılar, mumyalamada; Romalılar cam yapımında; Eski Yunanlılar ve Romalılar temizlikte; Mısırlılar, Mezopotamya uygarlıkları ve Araplar, bazı hastalıkların tedavisinde bordan yararlanmışlardır [218, 219]. Bor çeşitli sanayi dallarında da sıklıkla kullanılmaktadır (Tablo 16).

Tablo 16. Borun çeşitli sanayi dallarındaki kullanımları [220].

Kimya	Kibrit, yapıştırıcı, soğutucu, pasta-cila, elektrolitler, kireç önleyici, yanmayan boya, petrol ve tekstil boyası, mürekkep
Barınma	Isı yalıtımı, güneş pili (sabah depolanan enerjinin akşam kullanılması), dış cephe kaplamaları
Otomotiv	Hava yastıkları, hidrolikler, yağlar, plastik ve metal akşamların sertleştirilmesi, ısı ve ses yalıtımı, sürtünmenin azaltılması
Tıp ve Tarım	Ostropoz, menopoz, beyin kanseri tedavisi, alerjik hastalıklar, psikiyatri, manyetik rezonans görüntüleme (MR) cihazları, tarımsal verimliliği artırıcı kimyasallar
Haberleşme	Bilgisayar iletkenleri, hard diskler, cep telefonları, modemler, likit kristal ekranlar (LCD)
Dezenfeksiyon	Temizlik ve kozmetik malzemeleri, sıvı sabun, deterjan, ilaç yapımı, atıkların ayrıştırılması, temizlenmesi
Savunma Sanayi	Çeliğin daha dayanıklı hale getirilmesi, namluların güçlendirilmesi, roket yakıtları (Cruise Füzelere), Radara yakalanmayan savaş uçaklarının dış kaplamaları, nükleer silah ve nükleer güçle çalışan reaktörler, savaşuçağı, helikopter, uydu yapımı



Şekil 42. Bor cevheri görünümü

Yeryüzünde bor cevheri yatakları, Kaliforniya, And Dağları, Türkiye ve Orta Asya gibi bazı bölgelerde yoğunlaşmıştır. Ancak bu bölgeler içerisinde en büyük pay Türkiye'ye aittir. Ayrıca Türkiye'deki bor rezervleri ana ulaşım hatları ile kentlere yakın bölgelerde bulunmaktadır ve tüm yıl boyunca işlenmesi kolaydır.

Dünya toplam bor rezervi ve bugünkü tüketim değerleri dikkate alındığında, dünyada çok uzun yıllar bor cevheri sıkıntısı yaşanmayacağı düşünülmektedir [221, 222]. Tablo 17'de ticari öneme sahip bor mineralleri ve bileşikleri verilmiştir [215, 216, 223]. Tablo 18 de ise bor minerallerinin kullanım alanlarına yer verilmiştir [224].

Tablo 17. Ticari öneme sahip bor mineralleri ve bileşikleri

Mineral/Bileşik Adı	Kimyasal Formül	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> içeriği, %
Mineraller		
Kolemanit	Ca <sub>4</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .5H <sub>2</sub> O	50.8
Üleksit	NaCaB <sub>3</sub> O <sub>9</sub> .8H <sub>2</sub> O	43.0
Bileşikler		
Boraks Dekahidrat	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	36.5
Boraks Pentahidrat	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .5H <sub>2</sub> O	48.8
Susuz Boraks	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	69.12
Borik Asit	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	56.4
Sodyum Perborat Tetrahidrat	NaBO <sub>3</sub> 4H <sub>2</sub> O	23.45
Sodyum Perborat Monohidrat	NaBO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	34.88
Bor Oksit	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100.00

Tablo 18. Bor minerallerinin kullanım alanları

Kalayıtm Borat Cevherleri	Kalsiyum Sodyum Borat Cevherleri	Sodyum Perborat	Sodyum Borat Cevherleri-Borlu Göl Suları
-Cam -Metalurji -Nükleer -Tekstil Türü -Fiberglas	-Selülozik -İzolasyon -Fiberglas -Metalürji -Nükleer -Cam	-Deterjan ve ağartıcılar -Dezenfektan -Tekstil boyaları -Cam ve boyaları	-Rafine boraks pentahidrat ve boraks dekahidrat, -Susuz boraks
<b>Boraks Penta ve Deka Hidrat, Susuz Boraks</b>	<b>Susuz Borik Asit</b>	<b>Borik Asit</b>	
-Gübre -Fiberglas -İzolasyon -Metalurji -Cam ağartıcıları -Cam -Yapıştırıcılar -Kozmetik ve ilaç -Tarım -Fotoğraf -Tekstil boyaları -Dericilik -Yün koruyucu -Emaye, frit, sır -Metalurji	-Antiseptik -Kozmetik -Yangın söndürücü -Deri -Böcek mücadelesi -Metalurji -Naylon ve tekstil sanayi -Sabun ve deterjanlar -Sır kaplama -Fotoğraf	-Cam -Zirai mücadele -Böcek öldürücü -Böcek mücadelesi -Fotoğraf -Sabun ve deterjan -Naylon -Tekstil boyaları -Balmumu yumuşatıcı -Ağaç koruyucu -Sır kaplama	-Antiseptik -Kozmetik -Yangın söndürücü -Sır kaplama -Metalurji -Nükleer -Sabun ve deterjan -Tekstil -Tekstil-fiberglas -Sır kaplama

Yeryüzünde bor yatakları birkaç yerde yoğunlaşmıştır ve bunların yaklaşık % 75'i Türkiye'dedir ve diğer ülkelere kıyasla daha kalitelidir [217, 221]. Türkiye'de bulunan bor rezervlerinin yerleri ve cinsleri Tablo 19 ve Şekil 43'de verilmiştir. Türkiye'de bor

yatakları 1865 yılında bulunduktan sonra yabancılar tarafından işlenmiş, 1950'lerden itibaren Türk özel sektörü ve Etibank tarafından işletilmeye başlanmıştır. 1978'de devletleştirme sonucu sadece Etibank tarafından işletilmeye devam edilmiştir.

Tablo 19. Türkiye'deki bor cevherlerinin yerleri ve cinsleri [225].

Şehir	İlçe-Yöre	Maden Yatağı	Maden Cinsi
Balıkesir	Susurluk	Aziziye, Sultançayırı	Kolemanit Uleksit
	Bigadiç	Ankara, Acep, Domuz	
	Sındırgı	Kireçlik, Kurtpınar	
	Küçükler	Faraş, Günevi, Beğendikler, Yeniköy	
Kütahya	Emet	Hisarcık, Harmanköy, Espey, Killik	Kolemanit
Bursa	Kestelek	Kestelek	Kolemanit
Eskişehir	Kırka	Göcenoluk, Harmankaya	Tinkal



Şekil 43. Türkiye'deki bor cevherlerinin yerleri

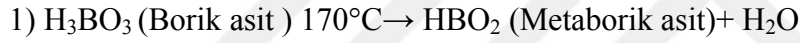
Tabiatta 230'dan fazla bor minerali vardır [221]. Oksijenle bağ yapmaya yatkın olması sebebiyle pek çok değişik bor-oksijen bileşimi bulunmaktadır. Bor-oksijen bileşimlerinin genel adı borattır. Borik asit ise beyaz, parlak, altıgen pulcuklar halinde kristalleşen ve suda eriyen bir asittir. Suda erime oranı 0°C'de 2.52g/100 ml; 20°C'de 4.72g/100 ml; 25°C'de 5.70g/100 ml; 80°C'de 19.10g/100 ml; 100°C'de 27.53 g/100 ml'dir. Ergime derecesi 169°C, yoğunluğu ise 1.435 g/cm<sup>3</sup>'dür. Endüstride en çok kullanılan bor ürünlerinden birisi borik asittir. Borik asit, boraks, kernit, kolemanit, üleksit, borasit ve boraks ihtiva eden göl sularından çeşitli tekniklerle elde edilmekte, granüle ya da kristalize olarak pazarlanmaktadır [226]. Şekil 44'de borik asitin görüntüsü verilmiştir.



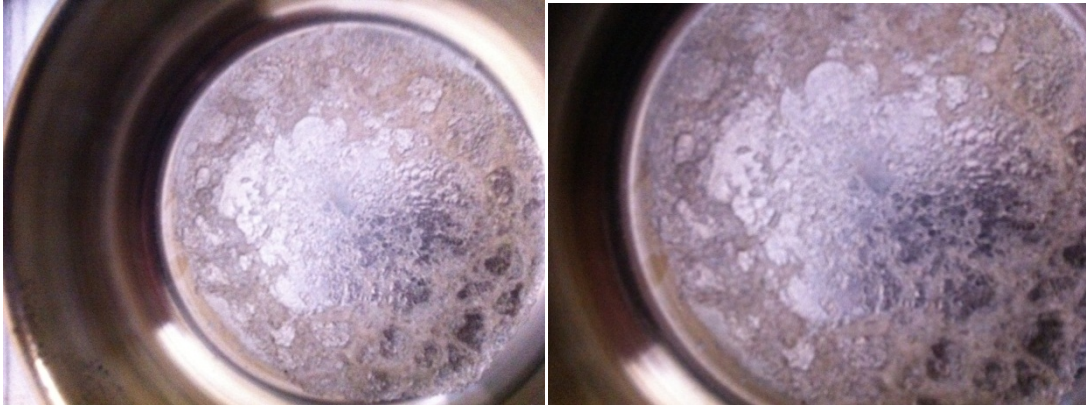
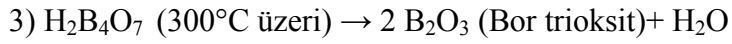
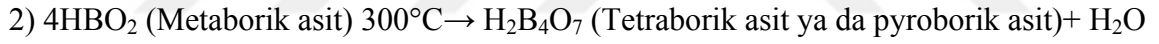


Şekil 44. Borik asit

Borik asit  $170^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa kadar ısıtılınca metaborik asite (Şekil 45) dönüşür. Metaborik asit  $300^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa kadar ısıtılınca tetraborik aside dönüşür. Tetraborik asit ise  $300^{\circ}\text{C}$  sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda bor trioksite dönüşür. Bu bilgilere ait kimyasal denklemler aşağıda verilmiştir.



$\text{HBO}_2$  (Metaborik asit) ergime sıcaklığı  $236^{\circ}\text{C}$ 'dir.



Şekil 45. Borik asitin ısıtılmasıyla elde edilen  $\text{HBO}_2$  (Metaborik asit) görünümü

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bor içerikli organik bir katkı maddesi sentezleyerek asfaltın modifiye edilmesi ve asfalt kaplamaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi kapsamında girişilen bu çalışmada kullanılan malzemeler ve uygulanan deneyler çerçevesinde izlenen yöntem aşağıdaki gibidir.

### ***Kullanılan malzemeler:***

- B50/70 penetrasyonlu asfalt çimentosu
- Sentezlenen Halkalı Borat Ester katkısı
- Agregası

### ***İzlenen Yöntem:***

Halkalı Borat Ester katkı maddesinin sentezlenme aşaması ve işlem basamakları Katkı Maddesinin Kimyasal Sentezi adlı bölümde ayrıca açıklanmıştır. Bunun dışında malzemelere ve karışımlara uygulanan deneyler aşağıdaki gibidir.

#### ***a) Yapı Aydınlatması İçin Uygulanan Deneyler:***

- NMR
- FT-IR
- TG/DTG
- SEM

#### ***b) Fiziksel ve Reolojik Özellikler İçin Uygulanan Deneyler:***

- Penetrasyon
- Yumuşama Noktası
- Düktilite
- Parlama Noktası
- Özgül Ağırlık
- Trikloretilende Çözünürlük
- Fraass Kırılma Noktası
- Nicholson Soyulma
- DSR
- RTFOT
- RV

- PAV
  - BBR
- c) *Asfalt Karışımlara Uygulanan Deneyler:*
- Marshall Stabilite ve Akma
  - Dolaylı Çekme Mukavemeti
  - Dolaylı Çekme
  - Su Hasarı
  - Statik Sünme
  - Dinamik Sünme
  - İndirekt Çekme Yorulma, şeklindedir.

## 2.1. Asfalt Çimentosu

Çalışmada, Tüpraş İzmit Rafinerisinden temin edilen ve sıcak asfalt karışımlarda kullanılan B50/70 penetrasyon dereceli asfalt kullanılmış olup, fiziksel özellikleri Tablo 20’de verilmiştir.

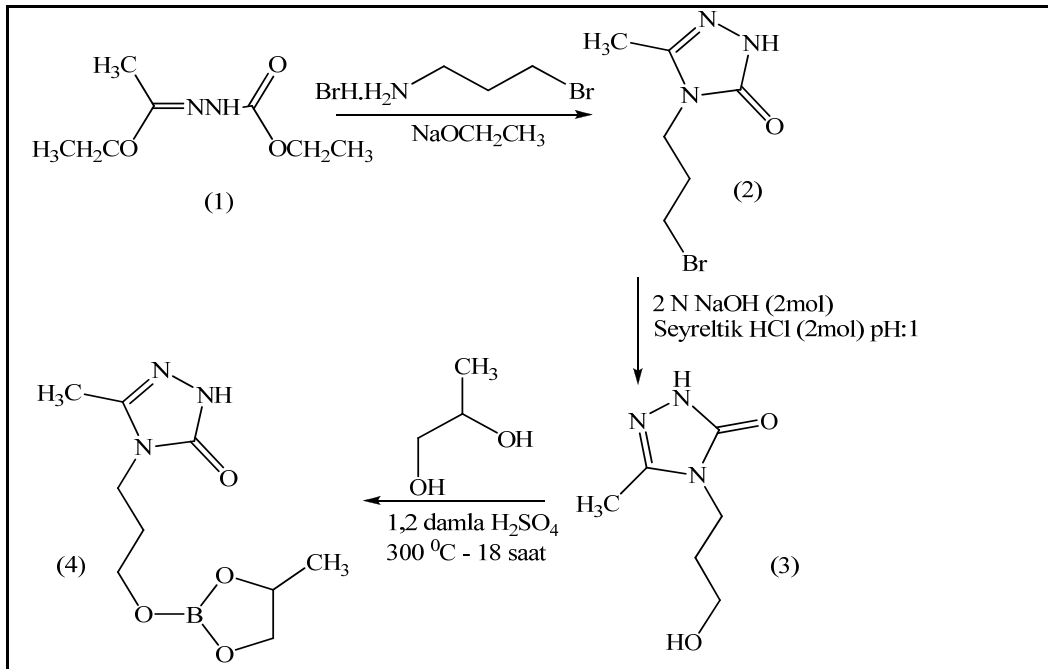
Tablo 20. Orijinal asfalta ait fiziksel özellikler

Deney	Standart	Değer
Penetrasyon (100g, 25°C, 5sn), dmm	ASTM D5	57
Yumuşama Noktası, °C	ASTM D36	50
Düktilite (25°C, 5cm/dk), cm	ASTM D113	100+
Parlama Noktası, °C	ASTM 92	248
Özgül Ağırlık, (25°C), g/cm <sup>3</sup>	ASTM D70	1,022
Fraass Kırılma Noktası, °C	IP80	-10
Trikloretilende Çözünürlük, %	EN 12592	99.9
Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Sonrası		
Penetrasyon (100g, 25°C, 5sn), dmm	ASTM D5	29
Kalıcı Penetrasyon (%)	ASTM D5	50.88
Yumuşama Noktası, °C	ASTM D36	56.2
Düktilite (25°C, 5cm/dk), cm	ASTM D113	100+
Kütle Kaybı (%)	ASTM D2872	0.06

## 2.2. Katkı Maddesinin Kimyasal Sentezi

Bu bölümde, laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenen ve Şekil 46'da sunulan dört farklı bileşiğin sentezlenme aşamaları anlatılmakta ve genel reaksiyon denklemi sunulmaktadır. Bor içerikli katkı maddesi sentezlenirken (1), (2), (3) nolu bileşiklerden faydalanılmıştır. (1) nolu bileşiğin genel kimyasal adı (*ethyl(E)-2-(1-ethoxyethylidene)hydrazine-1-carboxylate*), (2) nolu bileşiğin genel kimyasal adı (*4-(3-bromopropyl)-5-methyl-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazol-3-one*), (3) nolu bileşiğin genel kimyasal adı (*4-(3-hydroxypropyl)-5-methyl-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazol-3-one*) şeklindedir. (4) nolu bileşik, hedeflenen bor içerikli katkı maddesidir. Katkı maddesinin genel kimyasal adı *5-methyl-4-(3-((4-methyl-1,3,2-dioxaborolan-2-yl)oxy)propyl)-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazol-3-one* olup, kısaca "Halkalı Borat Ester" şeklinde adlandırılabilir.

Hedeflenen katkı maddesi elde edilinceye kadar, farklı bor türevlerini içeren katkıları elde edilmiş; bu katkılarla ön denemeler yapılmış, sentezleri gerçekleştirilmiş ancak istenilen performans değerlerine ulaşamadığından yeni bir sentez yapma gerekliliği ortaya çıkmış ve bu sebeple çalışma kapsamında Halkalı Borat Ester katkısına ulaşılmıştır.



Şekil 46. Sentezlenen katkı maddesinin genel reaksiyon denklemi

(1) nolu bileşik literatürdeki [227, 228] yöntemlere göre sentezlenmiştir. Bu çalışma kapsamında sentezlenen orijinal nitelikteki (2), (3) ve (4) nolu bileşiklerin sentez aşamaları aşağıda sunulmuştur:

➤ **(2) nolu bileşiğin (*4-(3-bromopropyl)-5-methyl-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazol-3-one*) sentezlenmesi:**

Daha önceden sentezlenmiş 1 nolu bileşik (10 mmol, 1.74 g) ile 3-bromopropilamin hidrobromür (10 mmol, 2.18 g) 10 ml saf etanollu ortamda muamele edilerek karışıma sodyum etoksit (10 mmol, 0.68 g) damlatıldı ve altı saat süreyle geri soğutucu altında kaynatıldı. Bu işlemden sonra elde edilen kalıntı saf alkolde çözündürülüp filtre edildi ve vakum altında kurutulduktan sonra sarı renkli sıvı kalıntı saf olarak izole edildi.

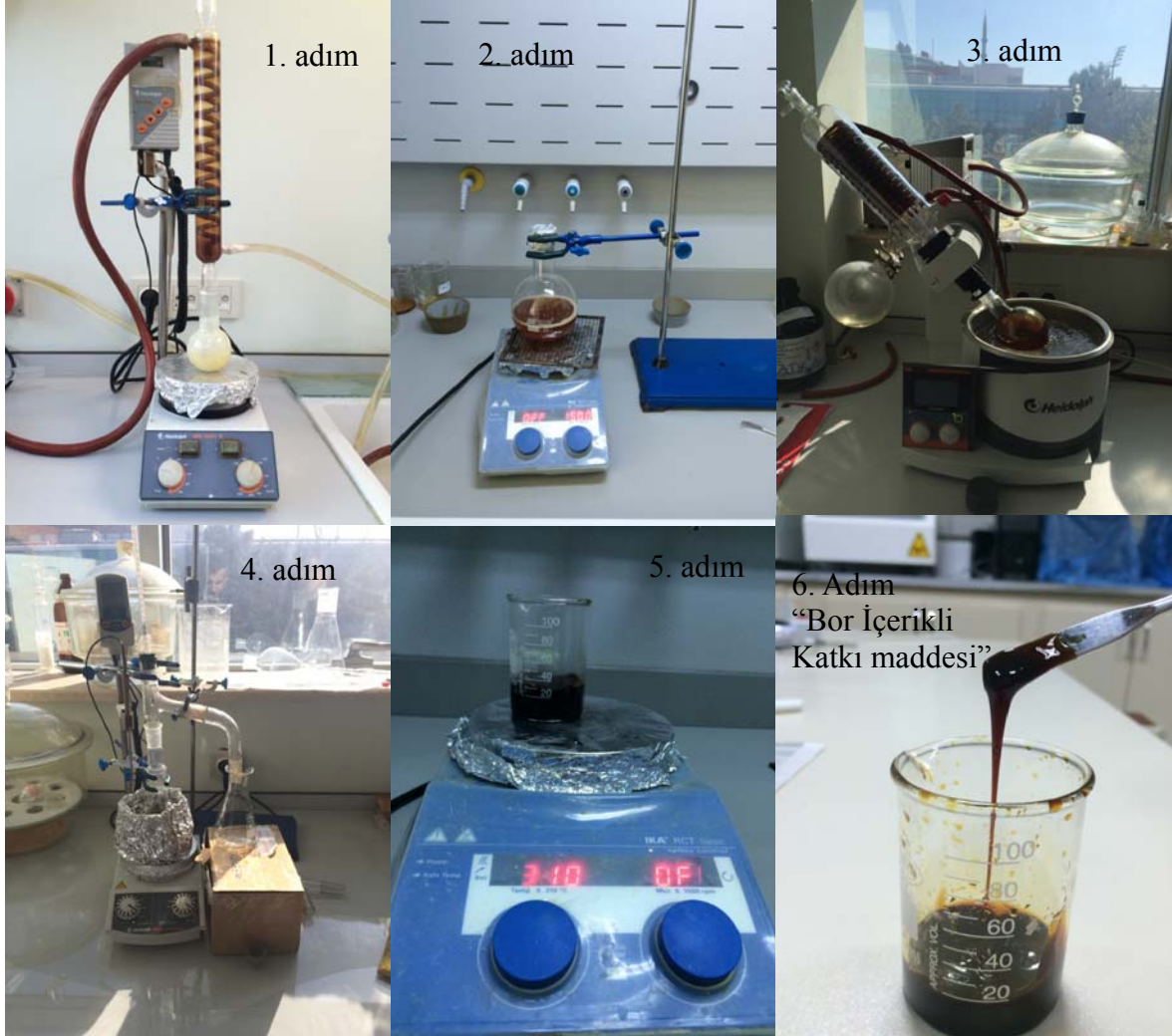
➤ **(3) nolu bileşiğin (*4-(3-hydroxypropyl)-5-methyl-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazol-3-one*) sentezlenmesi:**

(2) nolu bileşik (10 mmol, 2.20g) ve sodyum hidroksit (2mol/L) ile nükleofilik yer değiştirme reaksiyonu üzerinden sekiz saat oda sıcaklığında muamele edildi. Bu süre sonunda 2N HCl ile pH~1-2 olacak şekilde asitlendirildi. Kalıntı düşük basınç altında evapore edildi. Yağimsı kalıntı etanolla çözündürüldü ve oluşmuş olan tuz ortamdan uzaklaştırıldı. Aynı işlem birkaç kez tekrarlanarak (3) nolu alkol türevi saflaştırıldı.

➤ **(4) nolu bileşiğin *5-methyl-4-(3-((4-methyl-1,3,2-dioxaborolan-2-yl)oxy)propyl)-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazol-3-one* sentezlenmesi:**

(3) nolu bileşik (1 mol), 2,3-hidroksipropanol (1 mol) ve borik asit (1 mol) birkaç damla derişik sülfürik asit eşğinde (Şekil 47'de 4. adımda gösterilen reaksiyon sistemi kullanılarak) reaksiyona sokuldu. Karışım 300°C taban sıcaklığında on sekiz saat geri soğutma işlemine tabi tutuldu. Reaksiyon sırasında oluşan su destilasyon sisteminin yan borusundan toplama kabına alındı. Su ayrılma süreci tamamlandığında reaksiyon içeriği oda sıcaklığında soğutuldu. Viskoz kalıntı birkaç kez susuz etanolla çözündürülüp süzüldü ve buharlaştırıldı. Ortamda oluşan tuz ve reaksiyona girmeyen az miktardaki borik asit ortamdan uzaklaştırıldı ve etanolde çözündürülmüş homojen katkı çözeltilisi buharlaştırıldı

ve saflaştırıldı. Katkı maddesinin ((4) nolu bileşik) sentezlenme adımları Şekil 47’de sunulmuştur.



Şekil 47. Katkı maddesinin sentezlenme adımları

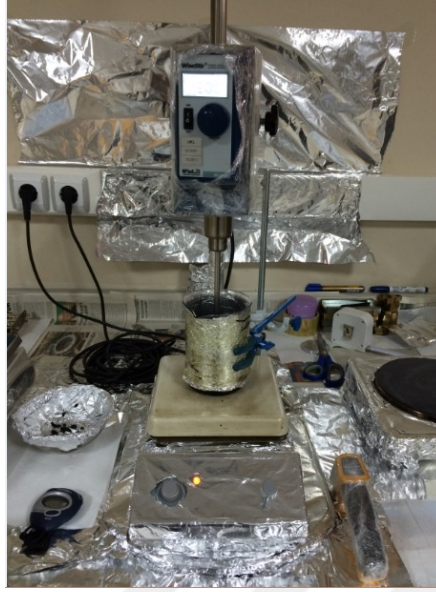
Sentezlenen katkı maddesinin kimyasal yapısı, FT-IR, NMR ve TG/DTG analizleriyle ortaya konmuştur. Katkı maddesi için FT-IR ve TG/DTG analizleri asfalt bağlayıcılara uygulandığı şekilde yapılmış olup analizlerin yapılaş şekli Bölüm 2.3’de anlatılmıştır. NMR analizi için ise katkı maddesi dimetil-sülfoksit (DMSO) içerisinde çözdürülmüş ve standart başlangıç noktası olarak tetra-metil-silan (TMS) kullanılarak, 25°C sıcaklıkta Agilent Teknoloji marka spektrometre cihazı vasıtasıyla veriler elde edilmiştir (Şekil 48).



Şekil 48. Agilent Teknoloji marka NMR spektrometresi

### 2.3. Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Hazırlanması

B50/70 penetrasyon sınıfı orijinal asfalt bağlayıcı 150°C sıcaklığa kadar etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilmiştir. Aynı sıcaklığa ayarlanmış karıştırma kabının içerisine belli bir miktar asfalt bağlayıcı dökülerek, asfalt ağırlığının %1, %2, %4 ve %6 oranlarında bor içerikli katkı maddesi ayrı ayrı ilave edilmiştir. Katkı ve asfalt, 150°C sıcaklıkta, 1000 rpm hızda, 15 dakika mekanik dört kollu karıştırıcı yardımıyla karıştırılarak modifiye asfalt bağlayıcıların üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 49).



Şekil 49. Modifiye asfalt bağlayıcıların üretilmesi

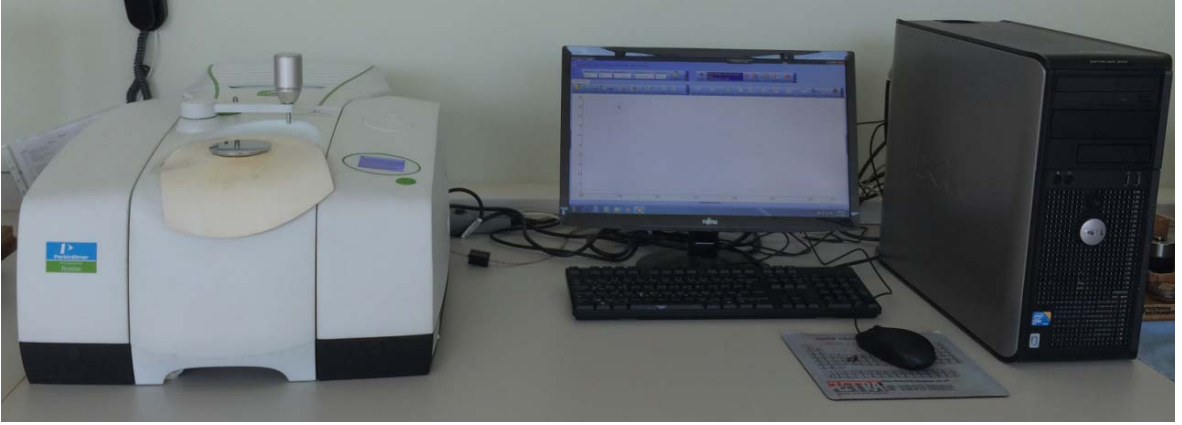
#### 2.4. Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi

Katkı maddesi ilavesiyle orijinal asfalt bağlayıcının yapısındaki kimyasal değişimler FT-IR analizi ile ortaya konulmuştur. Katkı maddesinin, asfalt içerisinde homojen olarak dağılımının gerçekleşip gerçekleşmediğini belirlemek ve katkı maddesi ile asfalt arasında faz ayrımının olup olmadığını, diğer bir deyişle modifiye işleminin doğru şartlar altında gerçekleşip gerçekleşmediğini tespit etmek amacıyla SEM analizi yapılmıştır. Ayrıca, asfalt bağlayıcıların ısıl bozunma sıcaklıkları ve kütleli değişimleri TG/DTG analizi ile incelenmiştir.

##### 2.4.1. FT-IR Analizi

Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların kimyasal yapı karakterizasyonu Perkin Elmer marka FT-IR spektrometresi ile incelenmiştir. 1-2 mg asfalt numunesi cihazın numune tablasının üzerine yerleştirilmiş ve oda sıcaklığında ölçüm yapılmıştır (Şekil 50).

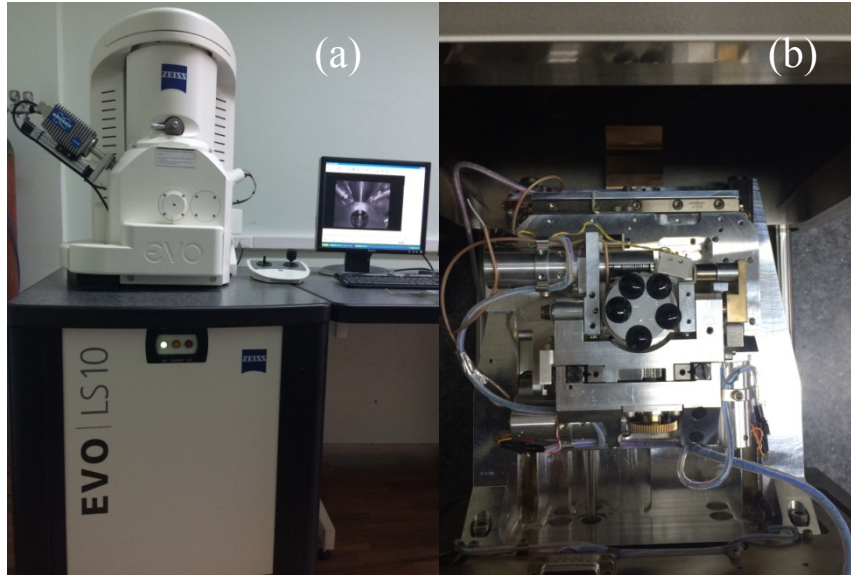




Şekil 50. Perkin Elmer marka FTIR spektrometresi

#### 2.4.2. SEM Analizi

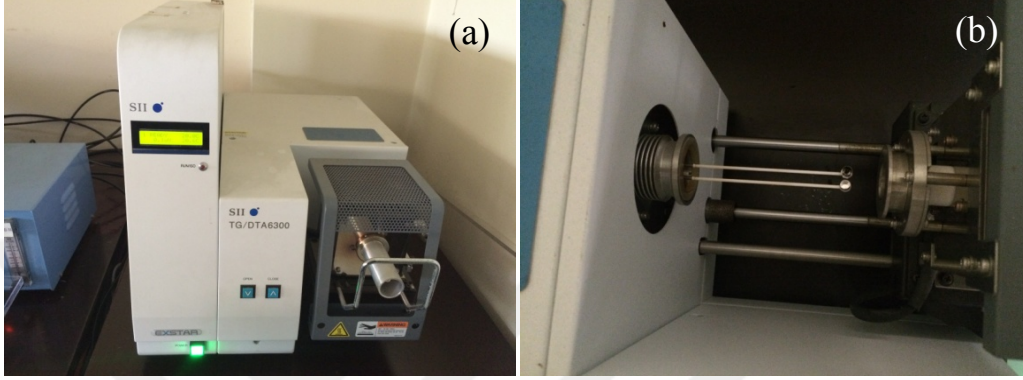
Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların morfolojik yapısı Zeiss Evo Ls-10 marka SEM cihazı ile belirlenmiştir. Bağlayıcılar, iletken bir karbon bant üzerine konulmuş ve SEM cihazının numune bölmesine yerleştirilmiştir. Cihaz ayarları 0.5 kV güç ve 250 büyütme oranına ayarlanarak SEM fotoğrafları elde edilmiştir (Şekil 51).



Şekil 51. SEM cihazı (a) ve iletken karbon bant üzerindeki asfalt numuneler (b)

### 2.4.3. TG/DTG Analizleri

TG/DTG analizleri için Exstar SII TG/DTA 6300 model cihaz kullanılmıştır. Asfalt bağlayıcılardan 7-10 mg alınarak, platinyum pota içerisinde konulmuştur. Analiz, 20°C sıcaklıktan 500°C sıcaklığa kadar 10°C artışlarla yapılmıştır (Şekil 52).



Şekil 52. TG/DTA cihazı (a) ve platinyum pota içerisindeki asfalt numunesi (b)

## 2.5. Asfalt Bağlayıcıların Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama noktası, trikloretilende çözünürlük, özgül ağırlık, Fraass kırılma noktası ve Nicholson soyulma deneyleri yapılmıştır. Reolojik özelliklerin belirlenmesi amacıyla DSR, RV, RTFOT, PAV ve BBR deneyleri uygulanmıştır.

### 2.5.1. Nicholson Soyulma Deneyinin Yapılışı

Sıkıştırılmamış agrega-asfalt karışımının su etkisiyle soyulmaya karşı dayanımını belirlemek amacıyla Nicholson soyulma deneyi yapılmıştır. 9.5-6.3 mm elekler arasında kalan yıkanmış ve kurutulmuş agregadan 100 gr alınmıştır. Sonra agregalar 150°C'lik etüvde 1 saat ısıtılmış ve 5 gr ağırlığındaki asfalt çimentosuyla 250 ml beher içerisinde 90 sn karıştırılmıştır. Karışım petri kabına dökülmüştür. Petri kabı, içerisinde saf su bulunan tepsiye konmuş ve üzerinde 3 cm'lik su filmi oluşması sağlanmıştır. Daha sonra petri

kaplarını içeren tepsiler 60°C'lik etüvde 24 saat bekletilmiş ve etüvden çıkartılmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 53'de gösterilmiştir.



Şekil 53. Nicholson soyulma deneyi için hazırlanan numuneler

### 2.5.2. DSR Deneyinin Yapılışı

Asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını tespit etmek için DSR deneyi yapılmıştır. Bohlin DSR II reometre cihazı kullanılarak bağlayıcılara ait kompleks kayma modülü ( $G^*$ , Pa), faz açısı ( $\delta$ ) ve tekerlek izi dayanım parametresi ( $G^*/\sin\delta$ , Pa) değerleri 58°C, 64°C ve 70°C sıcaklıklarda bulunmuştur. Deneyde, 25 mm çapında paralel plaklar kullanılmış olup, plaklar arası boşluk 1 mm ayarlanmıştır. Numunelere, kontrollü gerilme altında 120 Pa sabit gerilme 1.59 Hz (10 rad/sn) frekansta uygulanmıştır.

### 2.5.3. RV Deneyinin Yapılışı

Asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla RV deneyi yapılmıştır. Brookfield DV2T marka dönel viskozimetre cihazı kullanılarak 90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklarda numunelerin viskozite değerleri bulunmuştur. Numunelerin 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri viskozite-sıcaklık grafiğinde işaretlenerek  $170\pm 20$  cP ve  $280\pm 30$  cP değerlerine karşılık gelen sıcak asfalt karışımlardaki karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları hesaplanmıştır.

#### **2.5.4. RTFOT ve PAV Deneylerinin Yapılışı**

Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların kısa süreli yaşlanma özellikleri RTFOT deneyi ile belirlenmiştir. Yaşlandırma işlemi sonrasında bağlayıcılara penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve DSR deneyleri uygulanarak yaşlanma sonrası özellikleri tespit edilmiştir. Uzun süreli yaşlanma özelliklerinin belirlenmesi için RTFOT deneyinden elde edilen numunelere PAV deneyi uygulanmıştır. PAV deneyi, 100°C sıcaklıkta, 21 bar basınç altında ve 20 saat bekleme süresinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda numuneler, içerisinde biriken gazdan arındırılmak üzere 170°C sıcaklıkta 30 dakika süreyle yüksek vakum altına alınmıştır. Bu işlemden sonra numuneler, DSR ve BBR deneyleri için hazır hale getirilmiştir. Numunelerin yorulma dirençlerinin ( $G^* \cdot \sin \delta$ ) belirlenmesi için DSR deneyi 22°C, 25°C ve 28°C sıcaklıklarda yapılmıştır. DSR deneyi 8 mm çapındaki paralel plaklar ve plaklar arası boşluk 2 mm ayarlanarak gerçekleştirilmiştir.

#### **2.5.5. BBR Deneyinin Yapılışı**

PAV deneyinden elde edilen numunelerin düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımları -6°C ve -12°C sıcaklıklarda yapılan BBR deneyi ile belirlenmiştir. AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılan kiriş eğme reometresi deneyinde 6.35x127x12.7 mm. boyutlarındaki asfalt kirişin orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN kuvvetindeki yük etki ettirilmiştir. Deney sonucunda sünme rijitliği (S-değeri) ve sünme oranı (m-değeri) değerleri belirlenmiştir.

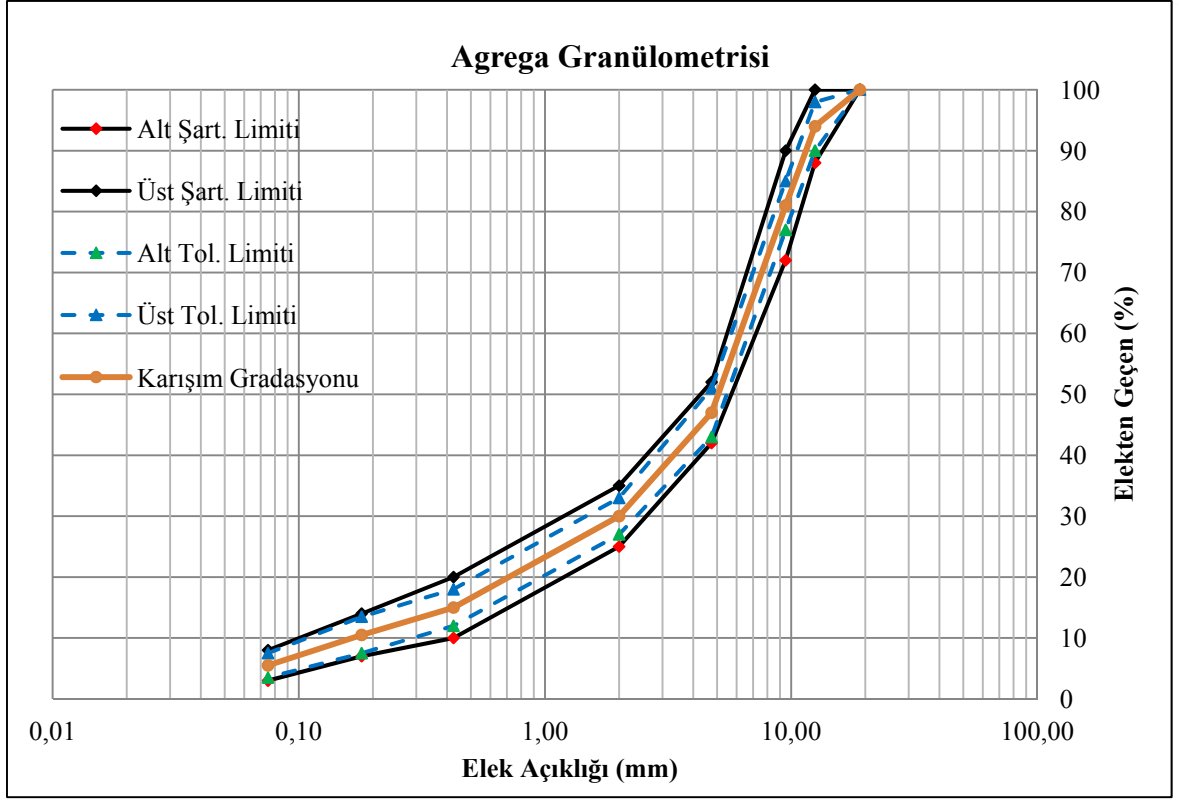
#### **2.6. Sıcak Asfalt Karışımların Hazırlanması**

Çalışmada kullanılan agrega Bayburt İli Kaleardı Mevkii Kalker Taşocağından temin edilmiş olup, fiziksel özellikleri Tablo 21'de verilmiştir.

Tablo 21. Agrega fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	Kaba Agrega	İnce Agrega	Filler
Aşınma Kaybı (%) (LosAngles)	ASTM C131	25.0	-	-
Donma Kaybı (%) (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	ASTM C88	1.0	-	-
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) Hacim özgül ağırlık Zahiri özgül ağırlık	ASTM C127	2.683 2.717	-	-
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) Hacim özgül ağırlık Zahiri özgül ağırlık	ASTM C128	-	2.662 2.711	-
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) Zahiri özgül ağırlık	ASTM D854	-	-	2.666
Su Emme (%)	ASTM C127	0.46	0.68	-
Yassılık indeksi (%)	BS 812	4	5	-

Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılarla sıcak asfalt karışımların hazırlanabilmesi için Karayolları Teknik Şartnamesi [132] aşınma tabakası Tip-1 gradasyon limitleri seçilmiştir. İdeal gradasyon eğrisine göre karışım gradasyonu oluşturulmuştur. Agrega granülometrisi Şekil 54'de ve agrega elek analizleri ile kullanılan granülometri değerleri Tablo 22'de verilmiştir.



Şekil 54. Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi

Tablo 22. Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi ve şartname sınırları

Elek Çapları (inç)	Elek Çapları (mm)	Tip -1 Aşınma Tabakası (% Geçen)		Tolerans Limitleri (%Geçen)		İdeal Geçen (%)	İdeal Kalan (%)	Karışım Geçen (%)	Karışım Kalan (%)	Karışım Kalan (gr)
3/4"	19.00	100	100	100.00	100.00	100	0	100	0	0
1/2"	12.50	88	100	90.00	98.00	94	6	94	6	69
3/8"	9.50	72	90	77.00	85.00	81	19	81	19	218.5
No:4	4.75	42	52	43.00	51.00	47	53	47	53	609.5
No:10	2.00	25	35	27.00	33.00	30	70	30	70	805
No:40	0.425	10	20	12.00	18.00	15	85	15	85	977.5
No:80	0.180	7	14	7.50	13.50	10.5	89.5	10.5	89.5	1029.25
No:200	0.075	3	8	3.50	7.50	5.5	94.5	5.5	94.5	1086.75
Tava	Tava					0.0	100	0,0	100	1150

## 2.7. Sıcak Asfalt Karışımların Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu bölümde, agreganın asfalt bağlayıcı ile Marshall tasarımına göre karıştırılması ve üretilen briketlere uygulanan deneylerin yapılış yöntemleri anlatılmaktadır.

### 2.7.1. Marshall Tasarımı

Sıcak asfalt karışımların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ilk olarak Marshall tasarımı yapılmıştır. Orijinal asfalt bağlayıcı ile on sekiz adet Marshall briketi üretilmiştir. Üretilen briketlerin yoğunluk-boşluk analizleri yapılmıştır. Numunelere ait boşluk, asfaltla dolu boşluk ve agregalar arası boşluk değerleri hesaplanmıştır. Marshall stabilite cihazında kırılan numunelerin stabilite ve akma değerleri de belirlenerek karışıma ait optimum asfalt içeriği elde edilmiştir. Optimum asfalt içeriğine göre her bir katkı oranı için on sekizer adet, toplamda doksan adet Marshall briketi üretilmiştir (Şekil 55). Üretilen bu briketlerden her bir katkı oranı için üçer adet kullanılarak; Marshall Stabilite, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Dolaylı Çekme, Statik Sünme, Dinamik Sünme ve Dolaylı Çekme Yorulma deneyleri yapılmıştır. Bahsi geçen doksan adet briketin de yoğunluk-boşluk analizleri yapılarak boşluk, asfaltla dolu boşluk ve agregalar arası boşluk değerleri hesaplanmış olup, Ek Tablo 1-6'da verilmiştir.





Şekil 55. Üretilen Marshall briketleri

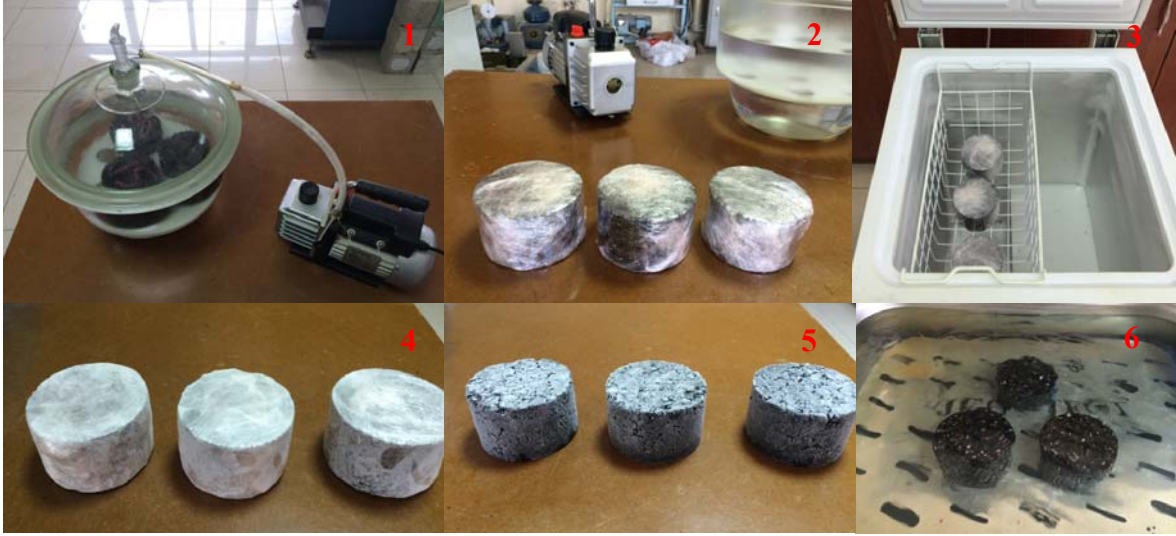
### 2.7.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinin Yapılışı

Dolaylı Çekme Mukavemeti deneyinde kullanılmak üzere, her bir katkı oranında üretilen üçer adet Marshall briketi, 24 saat boyunca 25°C'lik su banyosunda bekletilmiştir. Bekletilen briketler, su banyosundan çıkarılarak Marshall stabilite cihazına entegre edilen dolaylı çekme başlığı (ASTM D4123) ile 50 mm/dk hızda kırılmıştır.

### 2.7.3. Dolaylı Çekme ve Su Hasarı Deneylerinin Yapılışı

Dolaylı Çekme deneyinde kullanılmak üzere, her bir katkı oranında üretilen üçer adet Marshall briketi, 5°C, 25°C ve 40°C sıcaklıklarda deformasyon kontrollü olarak deneye tabi tutulmuştur. Her bir sıcaklık için yükleme periyodu 1000 ms, 2000 ms ve 3000 ms, yük artış süresi (rise time) 40 ms, 60 ms ve 80 ms olarak belirlenerek deney

gerçekleştirilmiştir. Deneye başlanmadan önce numuneler 24 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler tek tek yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçecek sensörler (LVDT) ayarlanmıştır. Numune yüksekliği, çapı ve poisson oranı (0.35) bilgisayara girilmiştir. Cihaz kabini içindeki referans numunesinin içerisinde ve yüzeyinde bulunan sıcaklık ölçen sensörlerin aynı sıcaklık değerini göstermesinden sonra deneye başlanmıştır. Briketlere önceden belirlenen parametrelerde beş kez yarı sinüzoidal (haversin) yük uygulanmıştır. Numune içerisinde oluşan yatay ve düşey deformasyonlar cihaz tarafından otomatik olarak kaydedilmiştir. Esneklik modülü değeri için bir numuneye birbirine dik iki eksen doğrultusunda iki defa deney yapılmıştır. İlk deney tamamlandıktan sonra numune 90° döndürülerek ikinci kez deneye tabi tutulmuştur. Esneklik modülü değeri olarak üç örneğe uygulanan altı deney sonucunun ortalaması alınmıştır. Deneyin tahribatsız olması nedeniyle, bir numuneye birden fazla deney yapılması imkânı vardır. Bu nedenle aynı numuneler üzerinde su hasarı etkisi de incelenmiştir. Su hasarı etkisinin tespit edilmesi amacıyla, deneye tabi tutulan numuneler, vakum altında suya doyurulduktan sonra 16 saat süreyle -18°C sıcaklığa ayarlanmış bir dondurucuya yerleştirilmiştir. Dondurucudan çıkartılan numuneler 60°C sıcaklığındaki su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra çıkartılarak 25°C sıcaklığındaki su banyosuna konulmuş ve burada da 2 saat bekletilerek koşullandırılmıştır. Su hasarı ile ilgili koşullandırma aşamaları Şekil 56'da gösterilmiştir. Koşullandırılmış numuneler 25°C sıcaklıkta, yükleme periyodu 1000 ms ve yük artış süresi 40 ms olacak şekilde deneye tekrar tabi tutularak esneklik modül değerleri bulunmuştur. Aynı şartlar altında deneye tabi tutulan koşullandırılmamış numunelerin esneklik modül değerleri ile oranlanmıştır.



Şekil 56. Su hasarına maruz bırakılan numunelerin koşullandırma aşamaları

#### 2.7.4. Statik Sünme Deneyinin Yapılışı

Statik sünme deneyi için her bir katkı oranında üretilen üçer adet Marshall numunesi, 25°C sıcaklıkta, 3600 sn boyunca 150 kPa'lık basınç yüküne maruz bırakılmış ve 3600 sn boyunca oluşan deformasyonlar ölçülmüştür. Bu sürenin sonunda numuneler üzerindeki yük kaldırılarak 3600 sn yüksüz bırakılmış ve bu sürenin sonunda geriye dönen deformasyon miktarları ölçülmüştür. Ayrıca, her numune için ölçülen deformasyon değerlerine karşılık gelen sünme modülü değerleri hesaplanmıştır.

#### 2.7.5. Dinamik Sünme Deneyinin Yapılışı

Dinamik (tekrarlı) sünme deneyi için her bir katkı oranında üretilen üçer adet Marshall numunesi, 25°C sıcaklıkta, 1000 ms vuruş periyodu boyunca 500 ms yüklü, 500 ms yüksüz olmak üzere 100 kPa'lık tek eksenli basınç yüküne 12.5 saat (45000 yük tekrarı) boyunca maruz bırakılmış ve numunelerde oluşan kalıcı deformasyon miktarları ölçülmüştür. Her numune için ölçülen deformasyon değerlerine karşılık gelen sünme modülü değerleri hesaplanmıştır.

### 2.7.6. İndirekt Çekme Yorulma Deneyinin Yapılışı

İndirekt çekme yorulma deneyi için her bir katkı içeriğinde hazırlanan üçer adet Marshall numunesi, 25°C sıcaklığa ayarlanmış Asfalt Tester cihazının kabininde 3 saat süre bekletilerek numunelerin deney sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Deney gerilme kontrollü olarak 300 kPa'lık gerilme altında gerçekleştirilmiştir. Yükleme periyodu 1500 ms olarak seçilmiş, bu sürenin 124 ms'si yük etki süresi, geriye kalan 1376 ms ise dinlenme süresi (rest time) olarak ayarlanmıştır. Numuneler tam olarak kırılıncaya kadar deney devam etmiş ve kırılmanın olduğu yük tekrar sayıları belirlenmiştir.

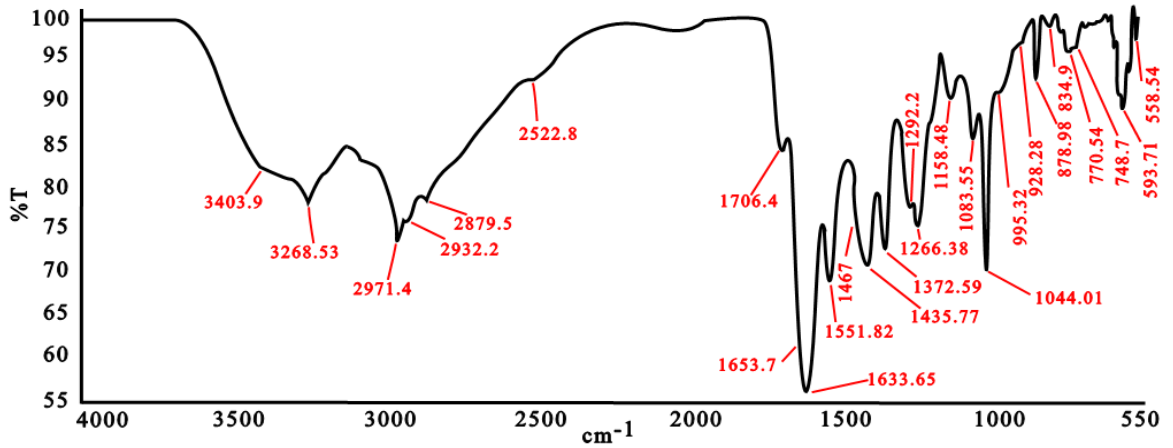


### 3. BULGULAR VE İRDELEME

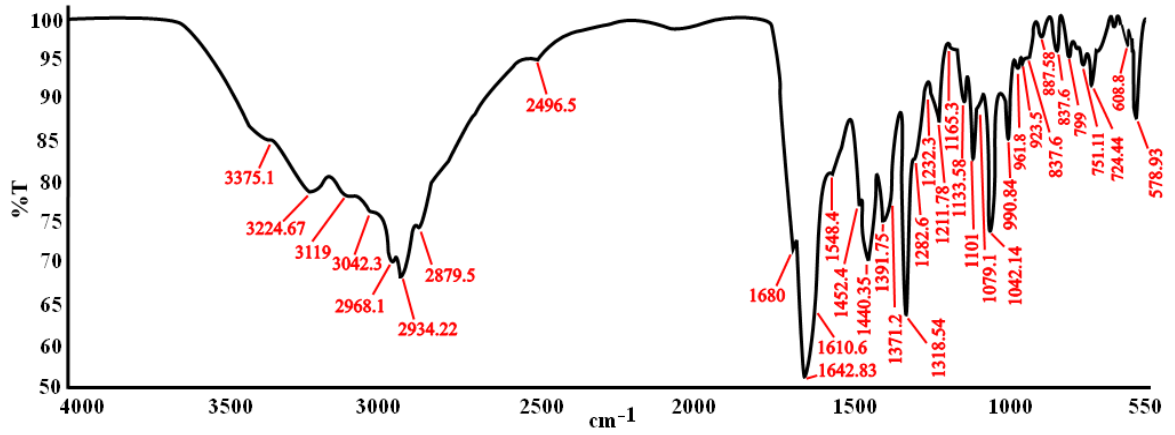
Bu bölümde, katkı maddesinin yapı analizine ilişkin bulgular, çeşitli değişkenlere göre orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılara uygulanan performans deneylerinden elde edilen bulgular ile grafikleri verilmekte ve bu grafikler doğrultusunda deney sonuçlarına ilişkin irdeleme ve değerlendirmeler yapılmaktadır. Ayrıca deneylerden elde edilen veriler, bir istatistik yazılımı olan SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) paket programında ayrı ayrı analiz edilmiş ve elde edilen bulgular ekte sunulmuştur.

#### 3.1. Katkı Maddesinin Yapısal Analiz Sonuçları

Kimyasal olarak laboratuvar ortamında sentezlenen bileşiklerin yapısal analizini ortaya koyan FT-IR ve <sup>1</sup>H-NMR spektrumları ve bunlara ilişkin spektral veriler Şekil 57-60'da ayrıntılı değerlendirmeleriyle birlikte sunulmuştur.



Şekil 57. (3) nolu bileşiğin FT-IR spektrumu

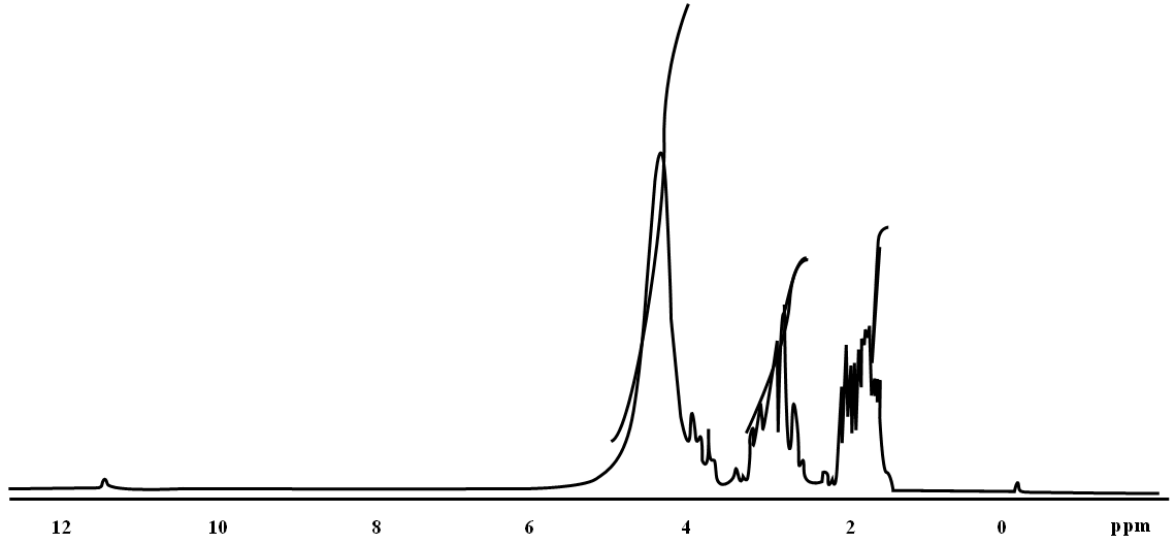


Şekil 58. (4) nolu bileşiğin FT-IR spektrumu

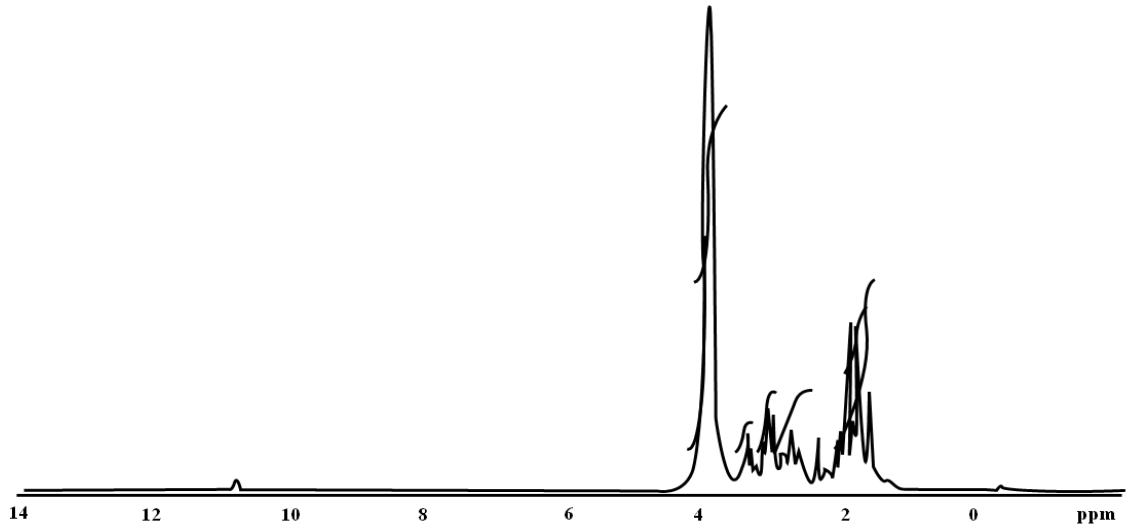
Tablo 23. (3) ve (4) nolu bileşiklerin FT-IR spektrum verileri (KBr,  $\text{cm}^{-1}$ )

Bileşik No	OH	NH	CH	HOH	C=O	C=N	C-O	B-O
3	3403	3268	2971, 2932	1706	1653	1638	1044	-
4	-	3224	2968, 2934	-	1680	1642	1042	1318

Tablo 23'deki (3) ve (4) nolu bileşiklere ilişkin FT-IR verileri incelendiğinde önerilen her iki hedef yapıyı teyit edici veriler bulunduğu görülmektedir. Nitekim (3) nolu bileşikte beklenen OH gerilim bandının ( $3403.9 \text{ cm}^{-1}$ ) borik asit ile koordinasyonu sonucu (4) nolu bileşikte kaybolduğu gözlenmektedir. Ayrıca, (3) nolu bileşikten (4) nolu bor içerikli bileşiğe geçişte B-O bağının oluşumunun sonucu  $1318 \text{ cm}^{-1}$  de B-O gerilim bandı ortaya çıkmaktadır. Bu frekans değeri bor içerikli bileşikler için spesifik olan B-O bağ gerilim frekansı için oldukça örtüşen bir frekans değeri olarak değerlendirilmektedir. Diğer yandan, bileşikte yer alan triazol halkasındaki NH, C=O gibi gruplara ilişkin gerilim bantları beklendiği şekilde, sırasıyla  $3250\text{-}3300 \text{ cm}^{-1}$  aralığında ve  $1650\text{-}1700 \text{ cm}^{-1}$  aralığında ortaya çıkmaktadır.



Şekil 59. (3) nolu bileşiğin  $^1\text{H-NMR}$  spektrumu



Şekil 60. (4) nolu bileşiğin  $^1\text{H-NMR}$  spektrumu

Tablo 24. (3) ve (4) nolu bileşiklerin  $^1\text{H-NMR}$  spektrum verileri (ppm)

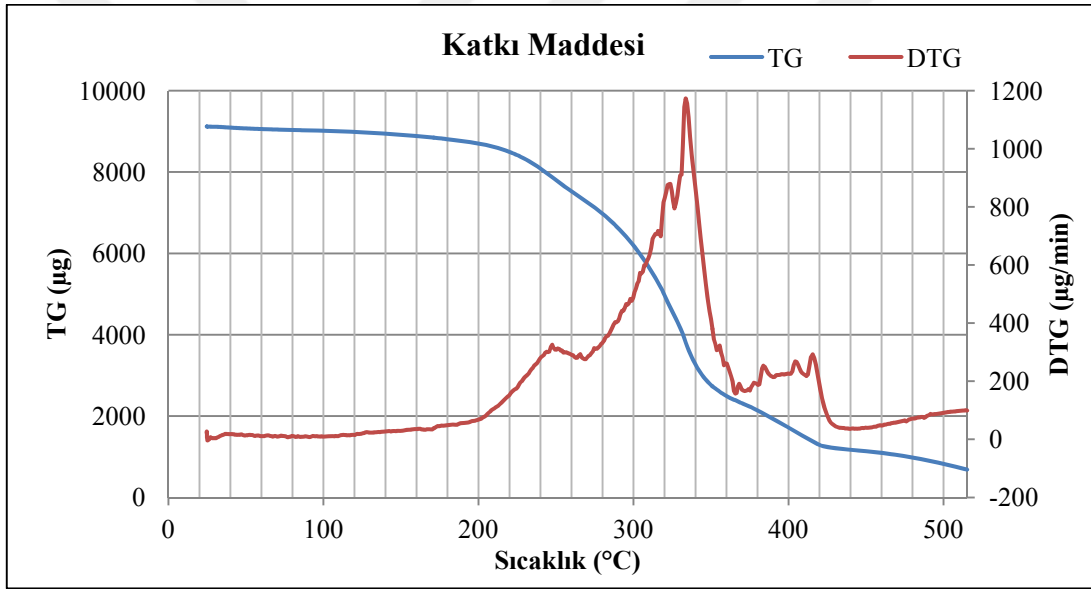
Bileşik No	CH <sub>3</sub>	CH	CH <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub>	OH	NH
3	1.60	-	2.80	*1.60-2.10	3.20	4.02	11.35
4	1.80	3.55	2.60-2.80	**1.80-2.10		-	11.30

\*CH<sub>2</sub> ve CH<sub>3</sub> protonları birlikte

\*\* CH<sub>2</sub> ve CH<sub>3</sub> protonları birlikte

(3) ve (4) nolu bileşiklere ilişkin  $^1\text{H-NMR}$  Şekil 59-60'da ve Tablo 24'deki spektrum verileri incelendiğinde bor ve 2-dihidroksi propanol ile hidroksi triazol bileşiğinin hedeflenen katkıyı oluşturduğuna ilişkin tatmin edici veriler içerdiği gözlenmektedir. Nitekim Şekil 59'da, gözlenen (3) nolu bileşikten ileri gelen OH- grubu protonuna ilişkin 3.80-4.10 aralığında yer alan triplet pikin Şekil 60'da (4) nolu bileşiğe ilişkin spektrumda ortadan kalkması gösterilebilir. İlave olarak Şekil 60'da 2-hidroksi propanole ilişkin  $\text{CH}_3$  ve  $\text{CH}_2$  grup protonlarına ilişkin piklerin gözlenmesi, hedeflenen bileşiğe ilişkin önerilen yapıyı destekler mahiyettedir.

➤ Katkı maddesine ait termal analiz (TG/DTG) eğrileri Şekil 61'de gösterilmiştir.



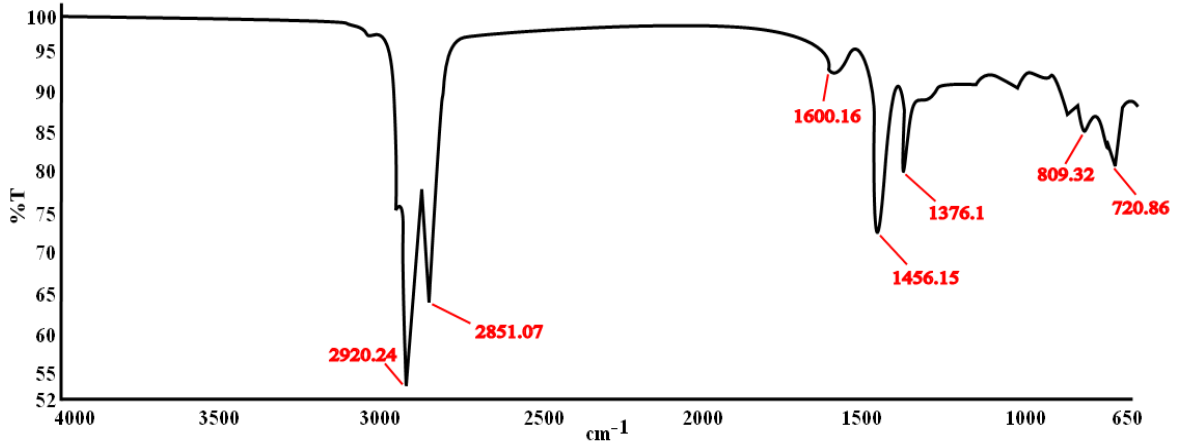
Şekil 61. Katkı maddesinin TG/DTG eğrisi

Katkı maddesinin yapısal bozunması 217°C sıcaklıkta başlamış olup etkin bir şekilde 345°C sıcaklığına kadar devam etmiştir. Belirtilen bu sıcaklık aralığında en fazla kütle kaybın 336°C sıcaklıkta gerçekleştiği grafikten görülmektedir.

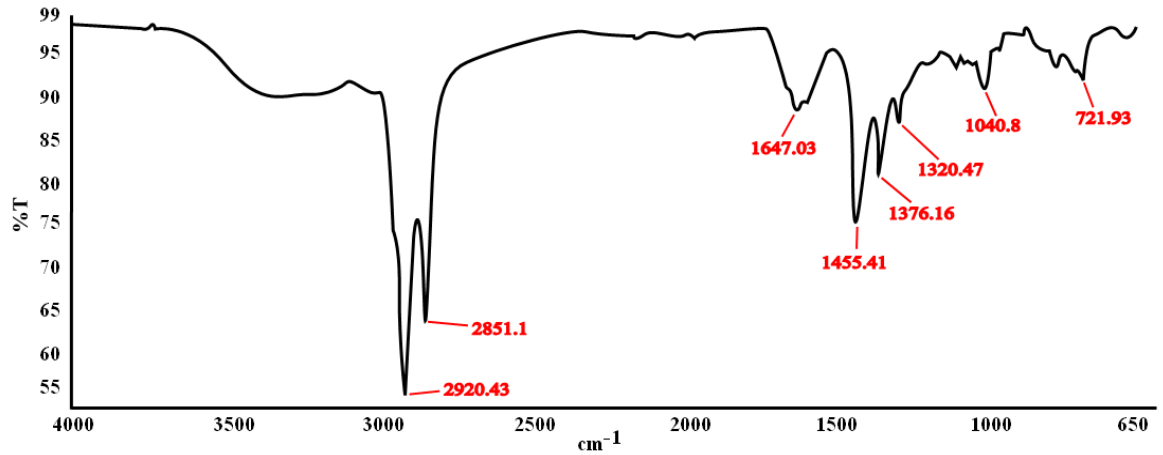


### 3.2. Orijinal ve Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Analiz Sonuçları

Çalışmada kullanılan orijinal ve %6 oranındaki katkı ile modifiye edilmiş asfalta ilişkin FT-IR spektrumları Şekil 62 ve 63’de verilmiştir.



Şekil 62. Orijinal asfalt numunesinin FT-IR spektrumu



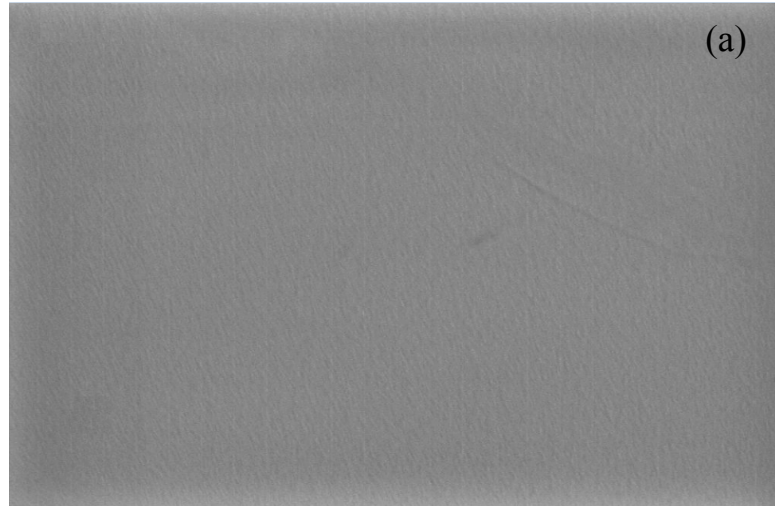
Şekil 63. %6 katkı içeren modifiye asfalt numunesinin FT-IR spektrumu

Tablo 25. Orijinal asfalt ve %6 katkı içeren modifiye asfalt numunelerinin FT-IR spektrum verileri (cm<sup>-1</sup>)

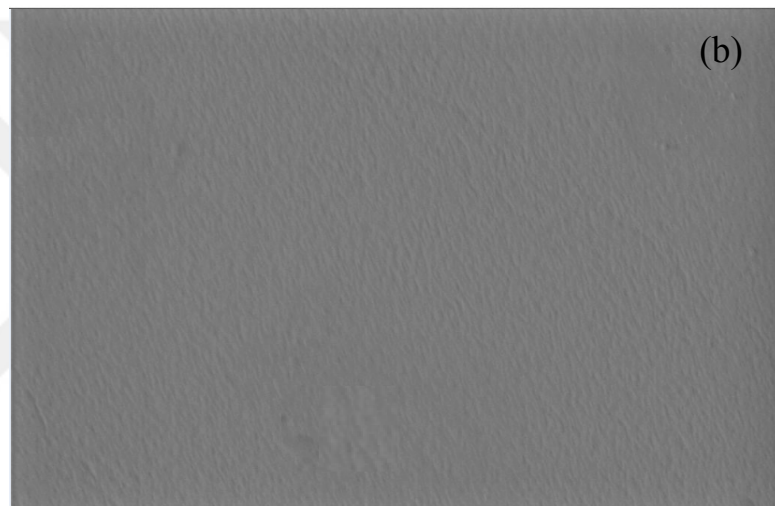
Bileşik No	NH	CH	C=O	CH <sub>3</sub> ,CH <sub>2</sub>	B-O
Orijinal asfalt	-	2920, 2851	-	1456, 1376	-
%6 katkı içerikli modifiye asfalt	3260	2920, 2851	1647	1455, 1376	1320

Tablo 25 incelendiğinde, asfalt malzemedeki alifatik hidrokarbon zincir içeriğinden ileri gelen CH gerilim bantları 2920 ve 2851  $\text{cm}^{-1}$  gözlenirken,  $\text{CH}_3$  ve  $\text{CH}_2$  gruplarına ilişkin deformasyon bantlarının ise 1455-1376  $\text{cm}^{-1}$  aralığında ortaya çıktığı gözlenmektedir. %6 katkı oranı ile modifiye edilen asfalt bağlayıcıdan alınan FT-IR spektrumunda asfalt- katkı ilişkisine ait çok belirleyici veriler gözlenmemesine karşın katkıya ilişkin belirgin C=O gerilim frekansı 1647  $\text{cm}^{-1}$ 'de görülmüştür. Ayrıca her iki spektrum karşılaştırıldığında, asfaltta ortaya çıkan hidrokarbon gerilim frekanslarının pik yüksekliklerinin orantısız olarak modifiye asfaltta azaldığı gözlenmektedir. Bu sonuç, asfalttaki hidrokarbon zinciri ile katkı arasında belli oranda elektrostatik bir etkileşimin varlığı ile açıklanabilir.

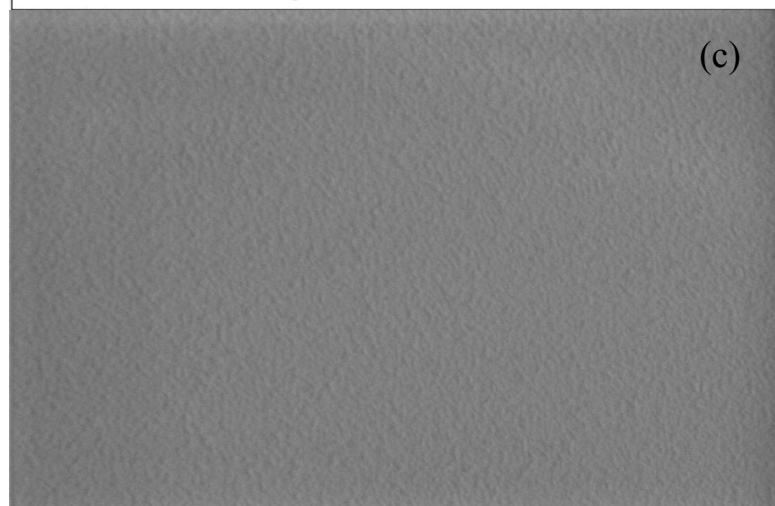
- Şekil 64'de orijinal ve modifiye asfalt numunelerinin SEM fotoğrafları verilmiştir.



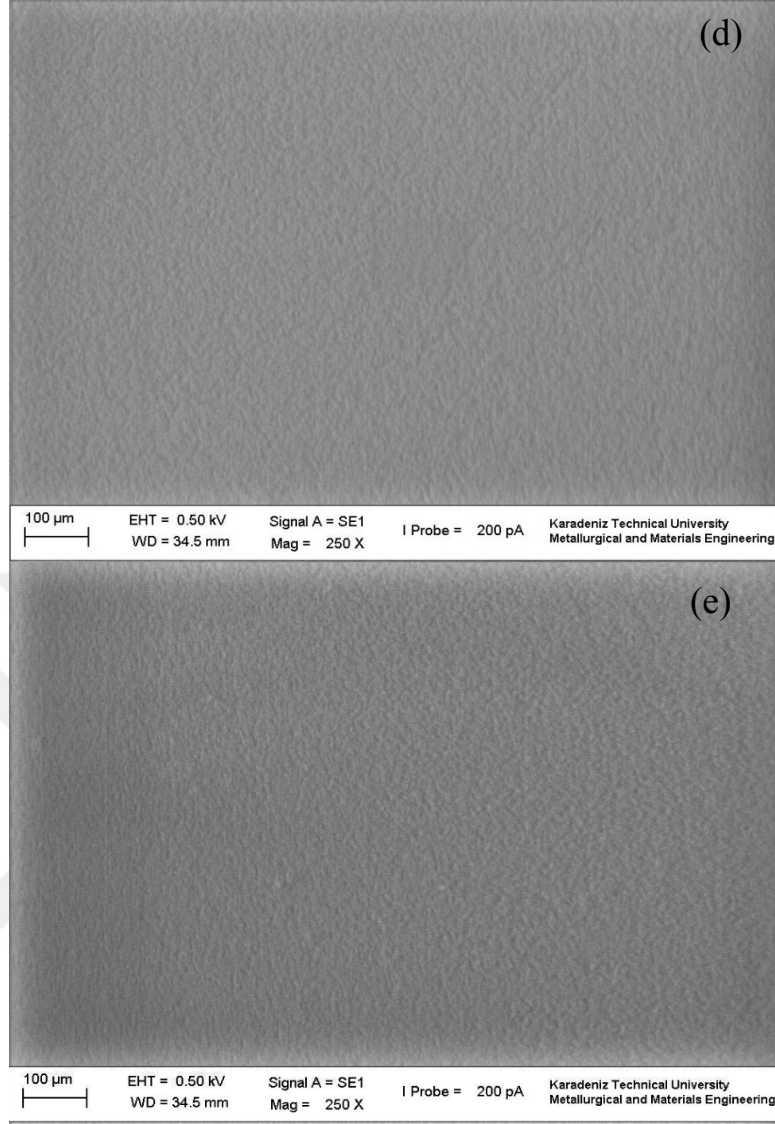
100  $\mu\text{m}$  EHT = 0.50 kV Signal A = SE1 I Probe = 300 pA Karadeniz Technical University  
WD = 34.5 mm Mag = 250 X Metallurgical and Materials Engineering



100  $\mu\text{m}$  EHT = 0.50 kV Signal A = SE1 I Probe = 200 pA Karadeniz Technical University  
WD = 35.0 mm Mag = 250 X Metallurgical and Materials Engineering



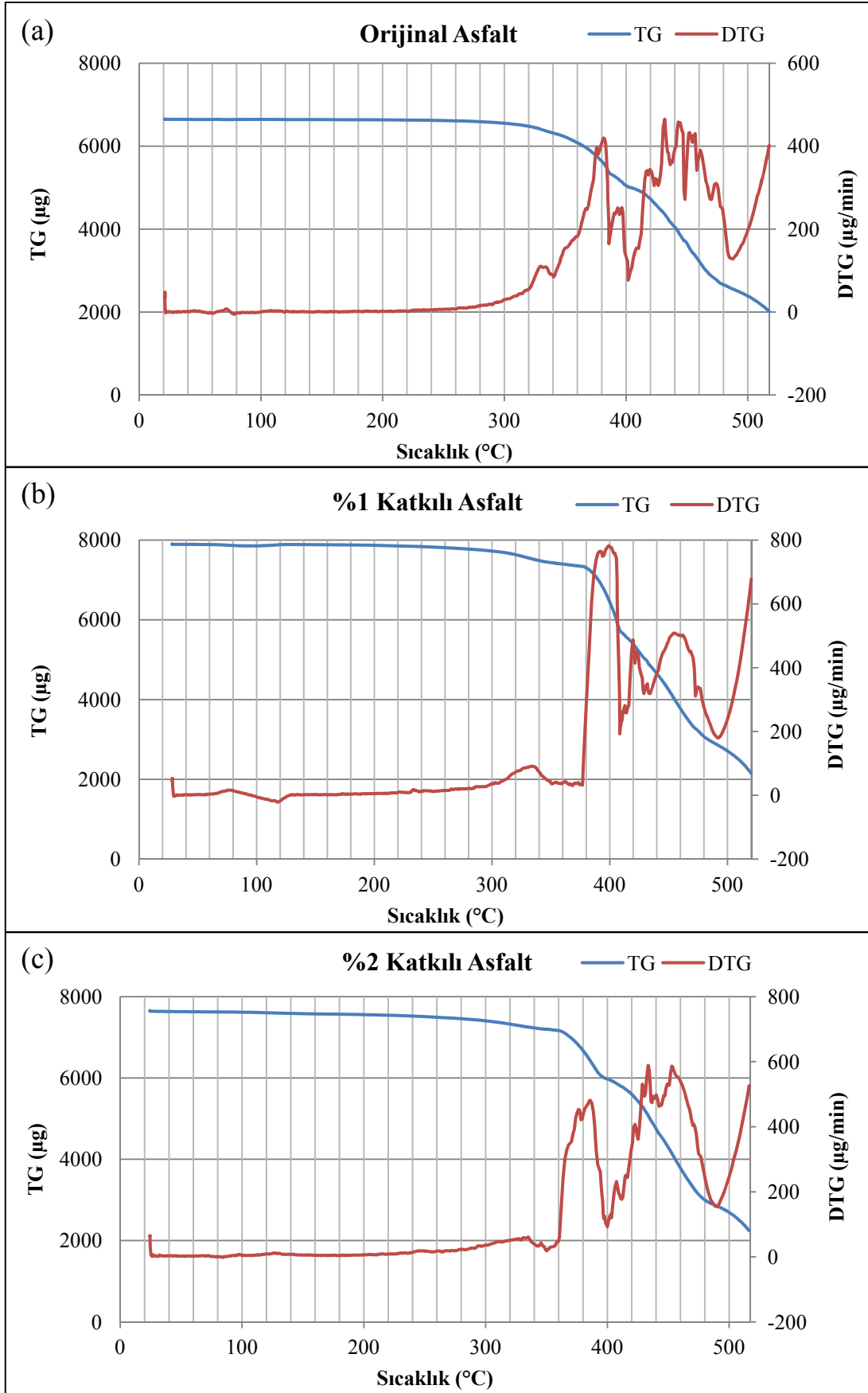
100  $\mu\text{m}$  EHT = 0.50 kV Signal A = SE1 I Probe = 200 pA Karadeniz Technical University  
WD = 35.5 mm Mag = 250 X Metallurgical and Materials Engineering

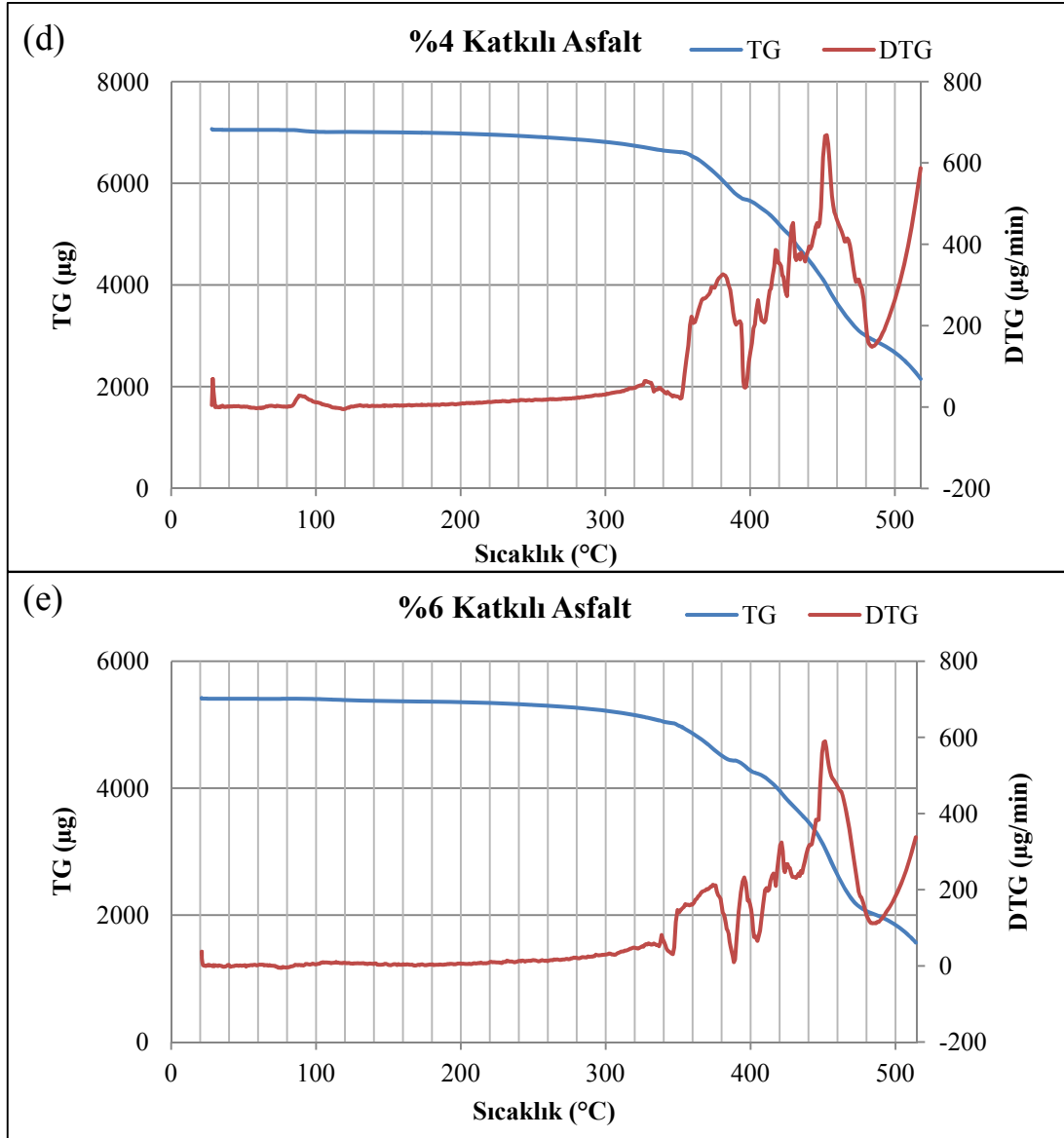


Şekil 64. SEM görüntüleri; (a) Orijinal asfalt, (b) %1 katkılı , (c) %2 katkılı, (d) %4 katkılı ve (e) %6 katkılı asfalt bağlayıcılar

Şekil 64'deki SEM görüntüleri incelendiğinde, her bir katkı oranında, katkının asfaltla uyum sağladığı yani katkı/asfalt matrisi arasında herhangi bir faz ayrımı olmadığı, katkının asfalta net bir şekilde tutunduğu buna bağlı olarak modifiye asfalt üretimi için belirlenen karıştırma şartlarının (1000 rpm, 150°C ve 15 dk) uygun olduğu ve katkının asfalt içerisinde homojen dağıldığı görülmektedir.

- Orijinal ve modifiye asfalt numunelerinin termal analiz (TG/DTG) sonuçları Şekil 65'de verilmiştir.

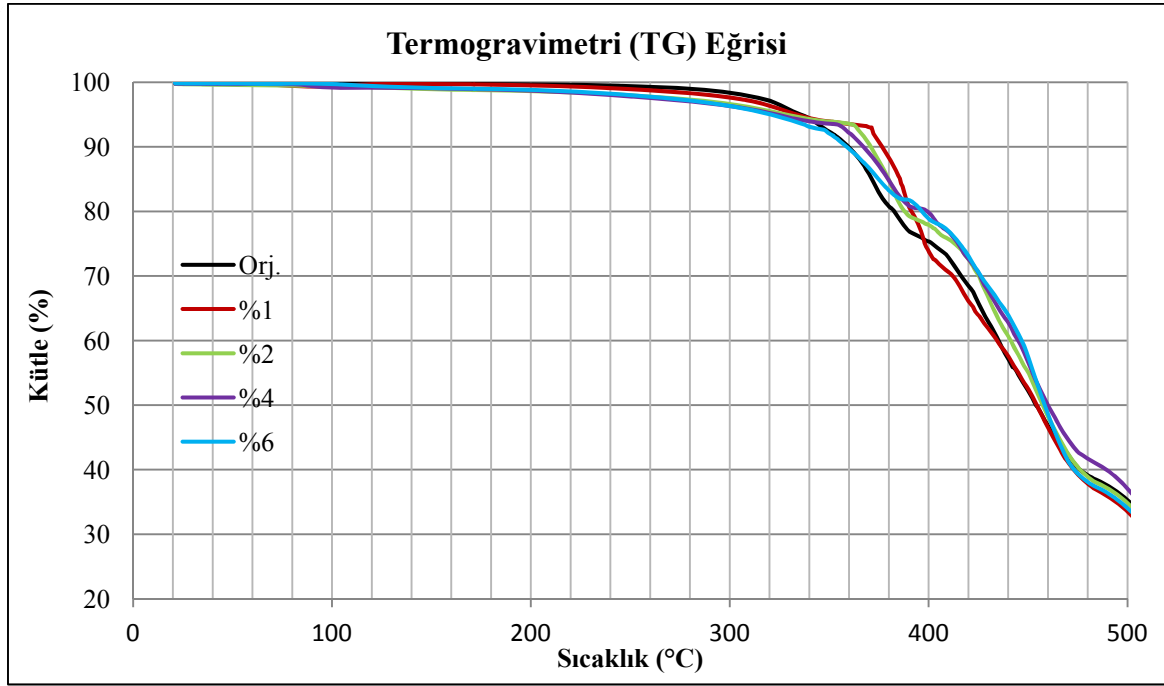




Şekil 65. Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılara ait TG/DTG eğrileri

Şekil 65’de orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların termal davranışları verilmiştir. Orijinal asfaltın TG eğrisi incelendiğinde 325°C sıcaklıkta yapısal bozunmanın başladığı ve 475°C sıcaklığa kadar etkin bir şekilde devam ettiği ayrıca DTG eğrisine göre 381°C, 433°C ve 442°C sıcaklıklarda en fazla kütle kayıplarının gerçekleştiği görülmektedir. Diğer yandan %1 katkı içeriğinde, TG eğrisine göre 341°C sıcaklıktan itibaren yapısal bozunmanın başladığı ve 482°C sıcaklığa kadar devam ettiği, söz konusu sıcaklık aralığında DTG eğrisine göre maksimum kütle kaybının 400°C sıcaklıkta gerçekleştiği belirlenmiştir. %2 katkı içeriğinde, ilk yapısal bozunmanın başladığı ve bittiği sıcaklıklar sırasıyla 348°C ve 478°C’dir. Buna bağlı olarak en fazla kütle kayıpları 386°C, 432°C ve

453°C sıcaklıklarda gerçekleşmiştir. %4 katkı içeriğinde, ilk olarak yapısal bozunma 350°C sıcaklıkta başlamış ve 480°C'ye kadar etkin bir şekilde devam etmiştir. DTG eğrisine göre maksimum kütle kaybı 453°C sıcaklıkta gerçekleşmiştir. Son olarak, %6 katkı içeriğinde, yapısal bozunmanın başladığı sıcaklığın 352°C olduğu ve etkin bir şekilde 472°C sıcaklığa kadar devam ettiği ayrıca en fazla kütle kaybının 452°C sıcaklıkta olduğu Şekil 65'den görülmektedir.



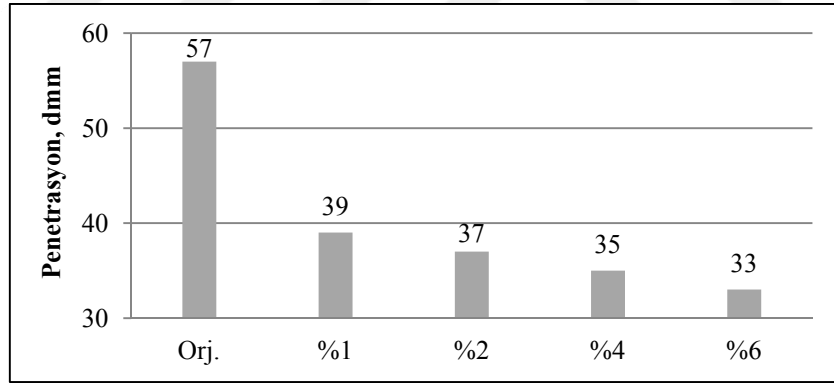
Şekil 66. Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılara ait termogram

Şekil 66'da orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların, sıcaklığın artışına bağlı olarak yüzde cinsinden kütlelerindeki değişimler verilmiştir. Ortam sıcaklığından 300°C sıcaklığa kadar bağlayıcılarda önemli bir kütle kaybı olmamıştır. En fazla fiziksel ve kimyasal bozunmalar 300°C ile 480°C sıcaklıkları arasında gerçekleşmiştir. Orijinal ve %1, %2, %4, %6 katkı içerikli asfalt bağlayıcıların kütlelerinde 380°C sıcaklıkta sırasıyla %19, %12, %15, %15, %16 oranlarında bir kütle kaybı olmuş ve bu kütle kaybı en az %1 katkı içeriğinde gerçekleşmiştir. 380°C sıcaklıktan 450°C sıcaklığa kadar kütle kaybı katkı içeriği arttıkça azalmış ve sırasıyla 450°C sıcaklıkta %48, %48, %45, %43 ve %42 oranlarında gerçekleşmiştir.

Şekil 61'deki katkı maddesinin ve Şekil 66'daki asfalt bağlayıcıların TG/DTG eğrileri bir bütün olarak değerlendirildiğinde, katkı maddesinin 217°C sıcaklıkta, orijinal asfaltın ise 325°C sıcaklıkta yapısal bozunmaya başladığı görülmüştür. Katkının asfalta ilave edilmesiyle yapısal bozunma sıcaklıkları %1, %2, %4 ve %6 katkı içeriğinde sırasıyla 341°C, 348°C, 350°C ve 352°C sıcaklığa ötelenmiştir. Buradan katkı maddesinin, orijinal asfaltın karbon zinciri yapısını uzattığı, katkı ve asfaltın birbirleriyle koordine olarak asfalt bağlayıcının kararlılığını artırdığı ve buna bağlı olarak ilk yapısal bozunma sıcaklığını yükselttiği söylenebilir.

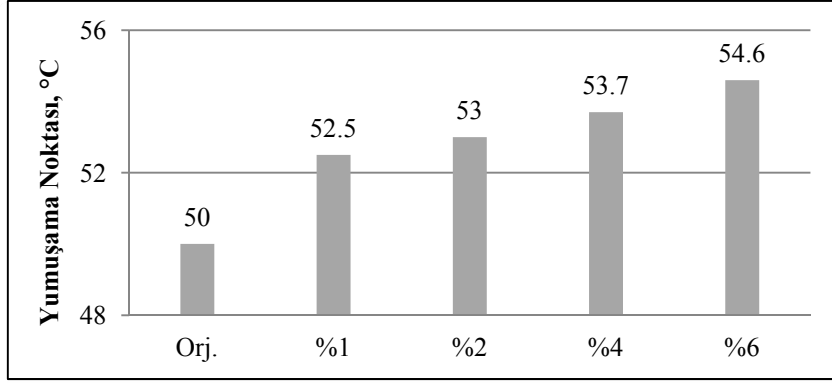
### 3.3. Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Bor içerikli organik katkı maddesinin asfalta katılmasıyla elde edilen modifiye asfalt bağlayıcıların penetrasyon değerinin azaldığı, yumuşama noktası değerinin ise arttığı Şekil 67 ve 68'de görülmektedir.



Şekil 67. Penetrasyon deney sonuçları



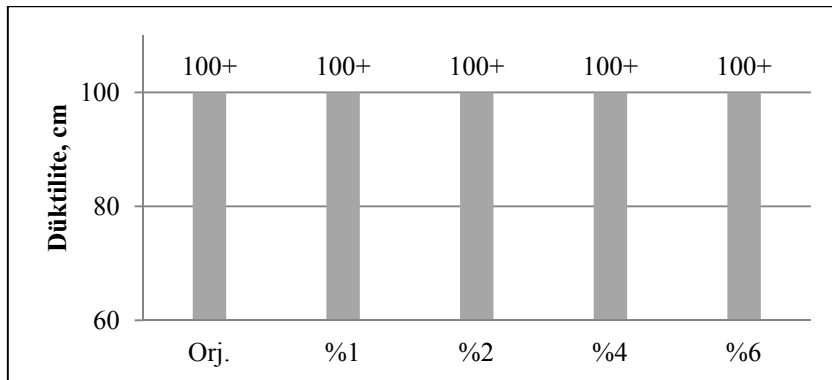


Şekil 68. Yumuşama noktası deney sonuçları

Orijinal asfaltın penetrasyon değeri %1, %2, %4 ve %6 katkı içeriğinde sırasıyla %31.6, %35.1, %38.6 ve %42.1 oranlarında azalırken, yumuşama noktası değeri ise sırasıyla %5, %6, %7.4 ve %9.2 oranlarında artmıştır. Buradan, katkı maddesinin orijinal asfaltın kıvamını artırdığı, sıcaklık hassasiyetini ise düşürdüğü anlaşılmaktadır.

### 3.4. Düktilite Deney Sonuçları

25°C sıcaklıkta düktilite deneyine tabi tutulan orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların deney sonuçları Şekil 69'da gösterilmiştir.

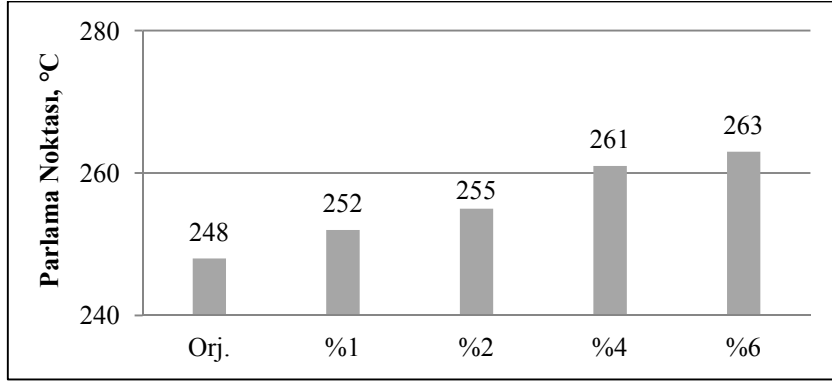


Şekil 69. Düktilite deney sonuçları

Şekil 69'dan görüleceği üzere, katkı miktarı arttıkça orijinal asfaltın düktilite değerinin aynı kaldığı başka bir deyişle katkı maddesinin asfalt bağlayıcının kohezyon özelliğini değiştirmedeği görülmektedir.

### 3.5. Parlama Noktası Deney Sonuçları

Cleveland açık kap yöntemi kullanılarak, asfalt numunelere uygulanan parlama noktası deney sonuçları Şekil 70’de gösterilmiştir.

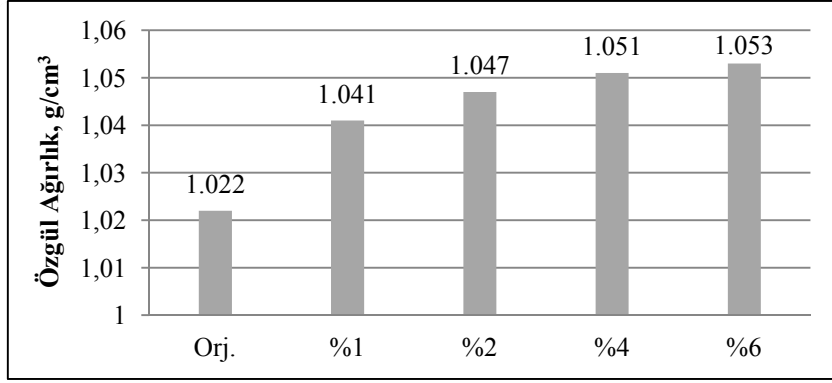


Şekil 70. Parlama noktası deney sonuçları

Parlama noktası değerleri incelendiğinde, katkı miktarının artışıyla birlikte parlama noktası sıcaklığının orijinal asfalta kıyasla yükseldiği gözlenmiştir. Orijinal asfaltın parlama noktası değeri %1 ve %6 katkı içeriğinde sırasıyla %1.61 ve %6.05 oranlarında artmıştır. Bu durum özellikle çalışma koşulları için önemli bir yer teşkil etmektedir.

### 3.6. Özgül Ağırlık ve Trikloretilende Çözünürlük Deney Sonuçları

Orijinal asfalta katılan katkı miktarı oranı arttıkça bağlayıcının özgül ağırlık değeri artmış ve Şekil 71’de gösterilmiştir.



Şekil 71. Asfalt bağlayıcıların özgül ağırlık değerleri

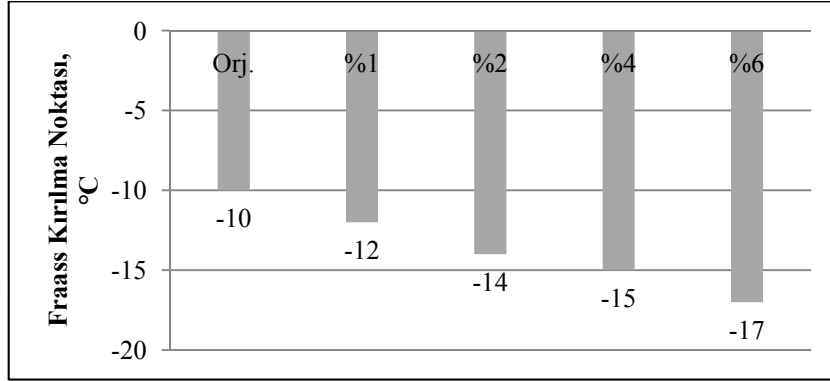
Asfalt bağlayıcıların trikloretilende en az %99 oranında çözünmesi gerekir. Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılar trikloretilende %99.9 oranında çözülmüştür. Şekil 72’de %6 katkı içerikli asfalt bağlayıcının trikloretilende %99.9 oranında çözüldüğü ve filtre kağıdında herhangi bir kalıntının kalmadığı görülmektedir. Bu durum, katkının asfaltla koordine olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 72. %6 katkı içerikli asfalt bağlayıcının trikloretilende çözünmesi

### 3.7. Fraass Kırılma Noktası Deney Sonuçları

Yaşlanmamış orijinal ve modifiye asfalt numunelerine yapılan Fraass kırılma noktası deneyine ilişkin sonuçlar Şekil 73’de verilmiştir.



Şekil 73. Fraass kırılma noktası deney sonuçları

Deney sonuçlarına göre, katkı maddesinin artışıyla beraber orijinal asfaltın düşük sıcaklıklardaki çatlama özelliğinin iyileştiği ve kırılma sıcaklığının %6 katkı içeriğinde %70 oranında düştüğü görülmektedir.

### 3.8. Nicholson Soyulma Deney Sonuçları

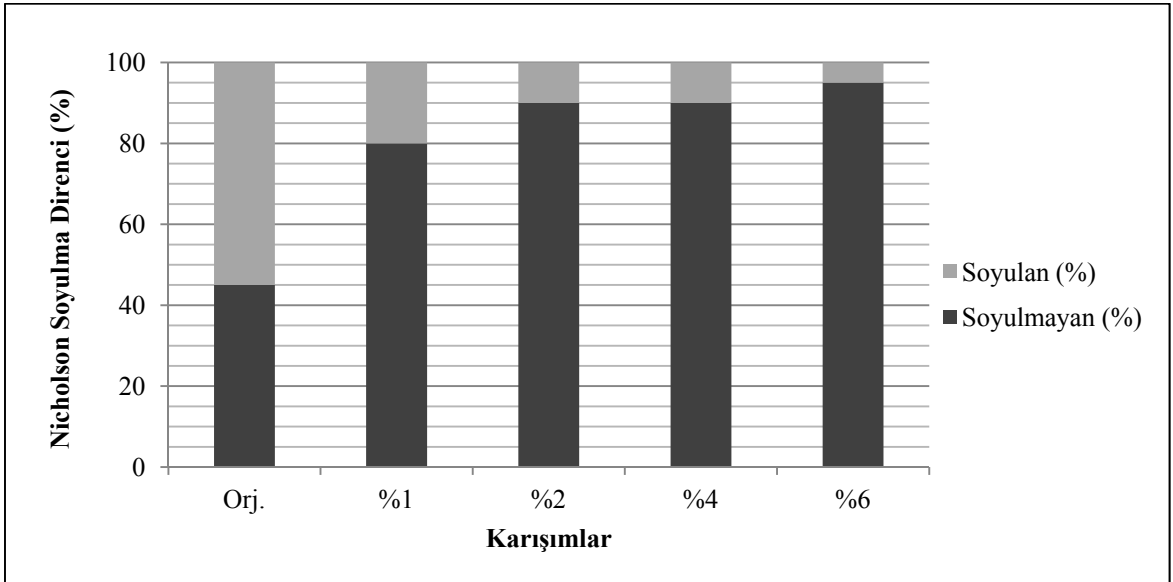
Karışımlarda kullanılan bağlayıcı ile agrega arasındaki adezyonun su etkisindeki değişimini incelemek amacıyla Nicholson soyulma deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları görsel olarak Şekil 74’de verilirken, soyulma direnci değerleri sayısal biçimde Tablo 26’da ve grafik olarak Şekil 75’de sunulmuştur.



Şekil 74. Nicholson soyulma deneyi sonrası sıkıştırılmamış karışımların görüntüsü

Tablo 26. Karışımların soyulma direnci değerleri

Karışım Adı	Nicholson Soyulma Direnci (%)
Orjinal asfalt bağlayıcılı karışım	45
%1 katkılı asfalt bağlayıcılı karışım	80
%2 katkılı asfalt bağlayıcılı karışım	90
%4 katkılı asfalt bağlayıcılı karışım	90
%6 katkılı asfalt bağlayıcılı karışım	95



Şekil 75. Karışımların soyulma direnci değerleri

Şekil 75'deki sonuçlar incelendiğinde, katkıli asfalt bağlayıcılarla yapılan karışımların soyulma dirençleri, orijinal asfalt bağlayıcı ile yapılan karışıma göre %1, %2, %4 ve %6 katkı içeriklerinde sırasıyla %77.8, %100, %100 ve %111.1 oranlarında artış göstermiştir. Bu verilerden katkının, orijinal asfaltın agregaya ile arasındaki adeziv bağı çok önemli ölçüde güçlendirerek soyulmaya karşı direncini artırdığı açıkça görülmektedir.

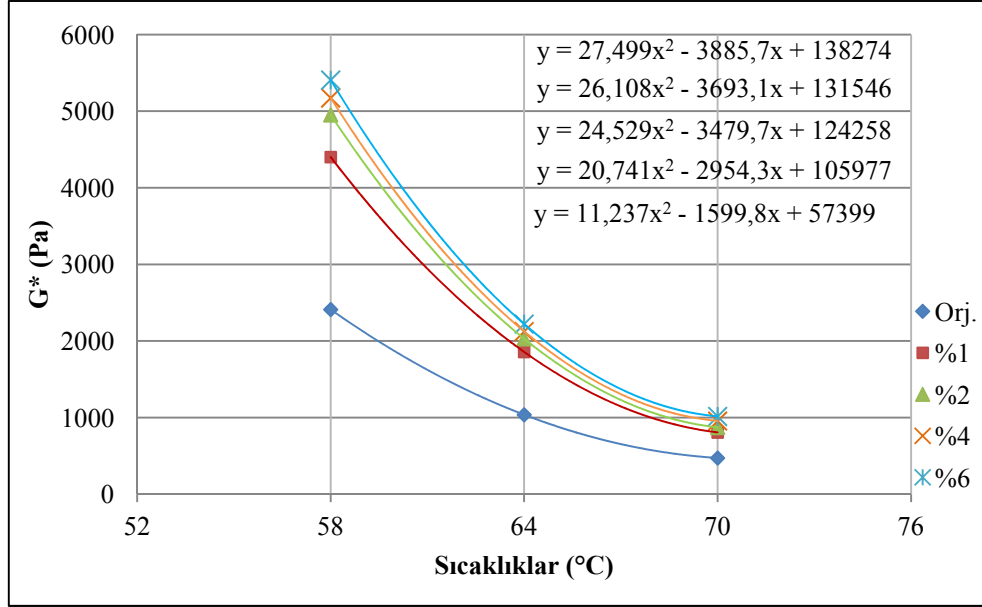
### 3.9. Dinamik Kesme Reometrisi Deney Sonuçları

DSR deneyi 58°C, 64°C ve 70°C'de kontrollü gerilme (120 Pa) altında, 1.59 Hz (10 rad/s) frekans, 25 mm paralel plaklar ve plakalar arası boşluk 1 mm ayarlanarak yapılmıştır. Deney sonucunda  $G'$ ,  $G''$ ,  $G^*$ ,  $\delta$  ve  $G^*/\sin\delta$  parametre değerleri bulunmuş ve ilgili veriler Tablo 27'da verilmiştir.

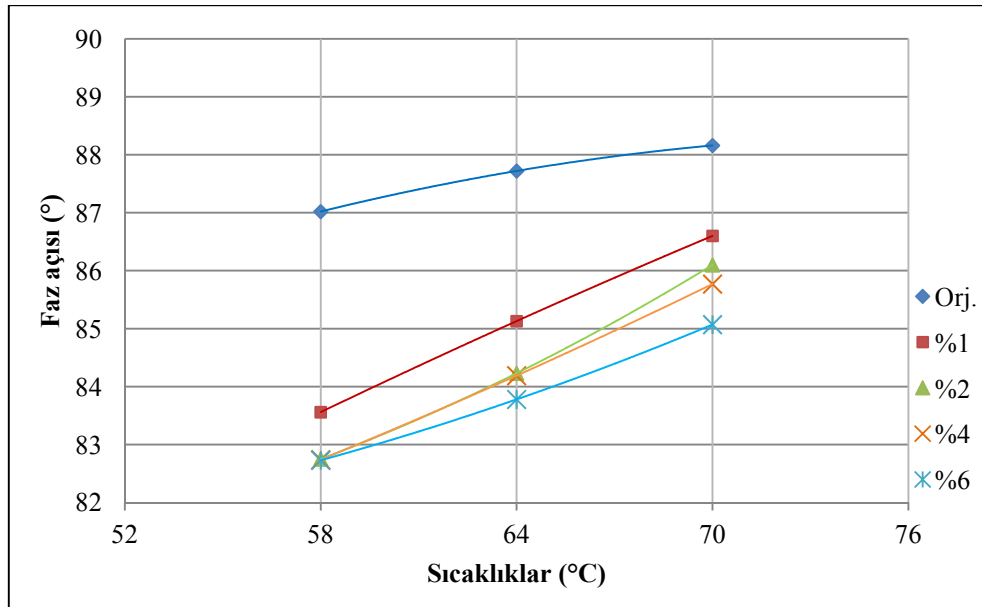
Tablo 27. DSR deney sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	$G'$ (Pa)	$G''$ (Pa)	$G^*$ (Pa)	$\delta$ (°)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (AASHTO T5)
Orijinal asfalt	58	125.37	2408.07	2411.33	87.02	2414.60	1000 min.
	64	41.22	1037.08	1037.9	87.72	1038.72	
	70	15.22	473.27	473.52	88.16	473.76	
%1	58	493.49	4373.39	4401.15	83.56	4429.08	
	64	157.76	1850.96	1857.68	85.13	1864.41	
	70	47.89	806.11	807.53	86.60	808.95	
%2	58	625.20	4912.97	4952.59	82.75	4992.53	
	64	208.21	2029.29	2029.61	84.23	2039.94	
	70	68.52	872.03	872.69	86.01	874.71	
%4	58	653.32	5131.54	5172.96	82.74	5214.72	
	64	215.29	2114.29	2125.23	84.19	2136.22	
	70	70.39	951.65	957.25	85.77	959.86	
%6	58	683.99	5364.49	5407.92	82.73	5451.70	
	64	240.68	2209.53	2222.60	83.78	2235.75	
	70	87.41	1013.41	1017.17	85.07	1020.95	

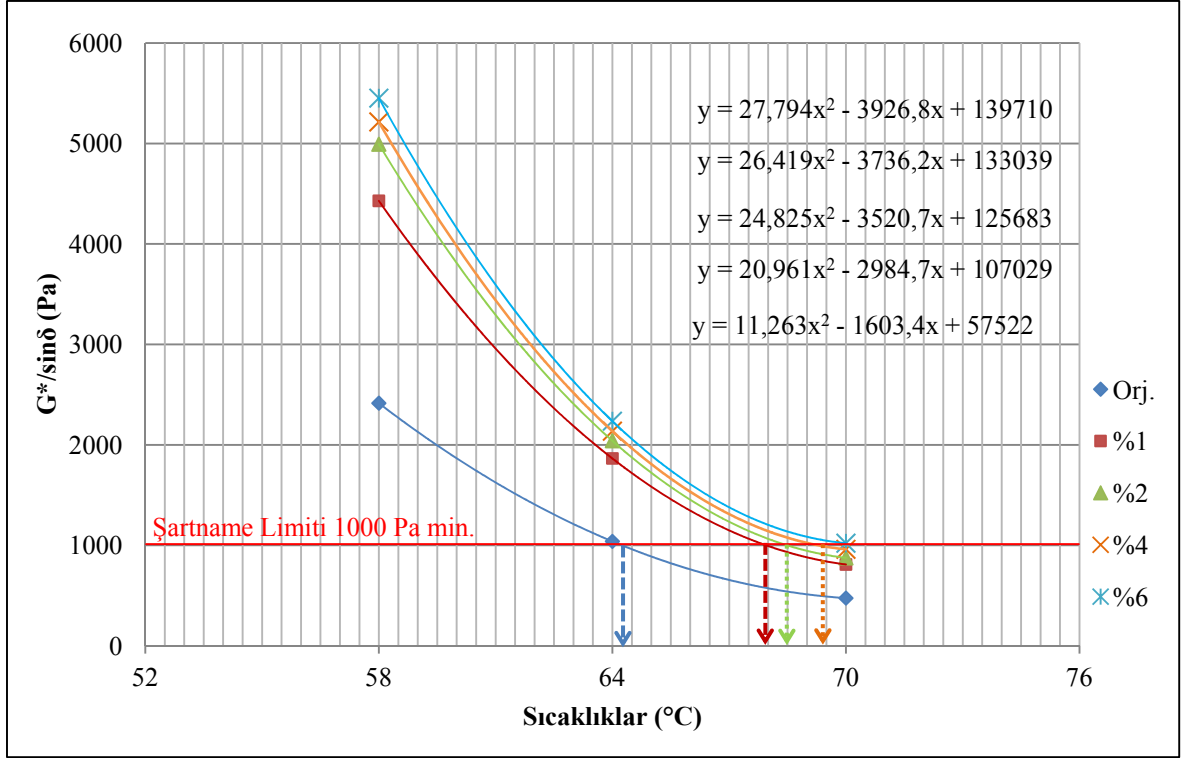
DSR deneyinden elde edilen  $G^*$ ,  $\delta$  ve  $G^*/\sin\delta$  değerlerine ilişkin bulgular sırasıyla Şekil 76-78'de grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 76.  $G^*$  değerleri



Şekil 77.  $\delta$  değerleri



Şekil 78.  $G^*/\sin\delta$  değerleri

Şekil 76 ve 77’de verilen deney sonuçları incelendiğinde sıcaklık artışıyla birlikte asfalt bağlayıcıların kompleks kayma modülü değerlerinde bir azalma görüldüğü, ancak bu azalma sonunda elde edilen değerlerin deneyin yapıldığı her sıcaklıkta orijinal asfalta kıyasla daha yüksek seviyede olduğu, faz açısı değerlerinin ise kompleks kayma modülü değerlerinin aksine arttığı tespit edilmiştir. Başka bir ifadeyle katkı maddesinin, orijinal asfaltın elastik özelliğini iyileştirerek tekerlek izi dayanımını önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Şekil 76 ve 77’de verilen sonuçlardan, 64°C sıcaklıkta %1 katkı içeriğinde, orijinal asfaltın kompleks kayma modülü değerinin %79.49 oranında arttığı, faz açısı değerinin ise %2.95 oranında azaldığı görülmektedir. Buradan katkı maddesinin %1 gibi çok düşük bir oranda bile orijinal asfaltın elastik özelliğine fayda sağladığı ve tekerlek izi dayanımını önemli ölçüde artırdığı çok net olarak anlaşılmaktadır. Şekil 78’deki  $G^*/\sin\delta$  değerleri incelendiğinde ise %4 katkı oranında minimum 1000 Pa şartname limitinin 69.4°C sıcaklıkta sağlandığı ancak bir üst performans seviyesi olan 70°C’de sağlanamadığı görülmektedir. Böylece %4 katkılı asfaltın performans seviyesi PG 64-Y şeklinde belirlenmiştir. Benzer şekilde katkısız, %1 ve %2 katkılı asfaltların performans seviyeleri de PG 64-Y şeklinde bulunmuştur. Ancak %6 katkı oranında ise 1000 Pa şartname limiti



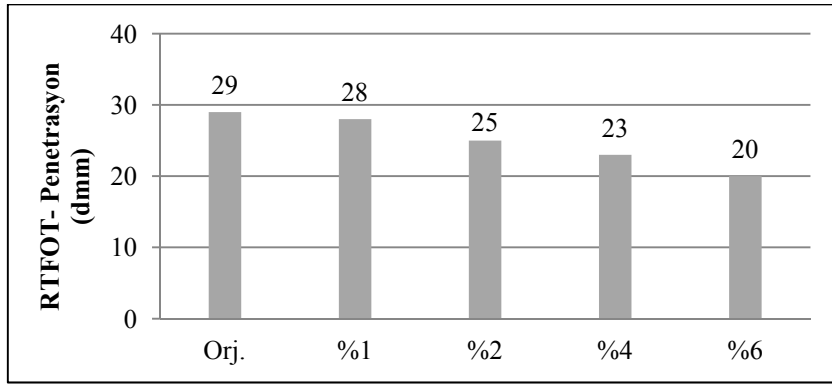
70°C’de sağlanmıştır. Orijinal asfaltın performans seviyesini 64°C’den 70°C’ye çıkararak PG seviyesini bir üst dereceye taşımış ve performans seviyesini PG 70-Y şeklinde değiştirmiştir. Bu da özellikle bu katkı oranında, orijinal asfaltın elastik özelliğinin ve buna bağlı olarak tekerlek izi dayanımının arttığı bir göstergesidir.

### 3.10. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deney Sonuçları

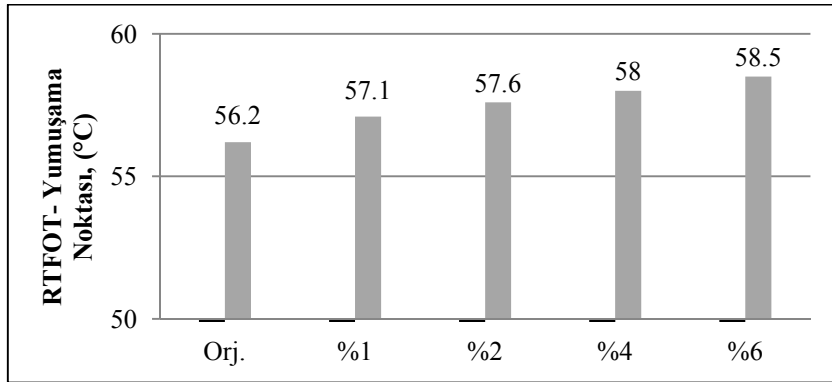
RTFOT sonrası asfalt numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite ve DSR deneyleri yapılmıştır. Deneylere ilişkin veriler Tablo 28’de verilmektedir. RTFOT deneyi sonrasında yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinde artan katkı oranına bağlı olarak penetrasyon değerlerinin düştüğü, yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı tespit edilmiştir (Şekil 79 ve 80). Orijinal asfaltın kalıcı penetrasyon değeri %50.88 iken bu oran %1 katkı oranında %71.79 değerine ulaşmış ve bu orandan sonraki katkı oranlarında azalarak %6 katkı içeriğinde %60.61 değerine düşmüştür. Şekil 81’deki  $\Delta S$  değerleri incelendiğinde artan katkı miktarına bağlı olarak yumuşama noktası sıcaklık farklarının, orijinal asfalta göre azaldığı ve bu azalmanın %6 katkı içeriğine %37.1 oranında yansıdığı görülmektedir. Bu durum, yaşlandırma sırasında asfaltın fonksiyonel gruplarındaki moleküllerin, yapısal değişime uğradığının bir göstergesidir. Kütle kayıplarında ise artış olmuştur. Bunun nedeni şu şekilde açıklanabilir: Katkı sentezlenirken ve destile edilirken, 300°C sıcaklığa maruz kaldığı halde stabilitesini korumaktadır. Katkı, oda sıcaklığında soğumaya bırakılırken viskozitesi artmaktadır. Belli bir süre geçtikten sonra (sıcaklığı değişmediği halde) akışkanlığı hızla artmaktadır. Bu bulgu, katkının yüksek nem çekici (yüksek hidrat suyu bağlama) yeteneği gösterdiğini ortaya koymaktadır. Nitekim kütle kaybı denemelerinde katkının çekmiş olduğu hidrat suyu artan katkı oranıyla birlikte sırasıyla artış göstermiştir. Dolayısıyla modifiye asfalt bağlayıcılarda oluşan kayıpların katkıdan kaynaklı kayıplar olmadığı, katkının içerdiği hidrat suyundan kaynaklandığı söylenebilir. İlave, katkı maddesi asfaltla etkileşime girdikten sonra nem çekici özelliğini kaybetmektedir. Bu bulgular bir bütün olarak değerlendirildiğinde katkı maddesinin asfalt bağlayıcının yaşlanmaya karşı direncini artırdığı görülmektedir.

Tablo 28. RTFOT deneyi sonrası asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri

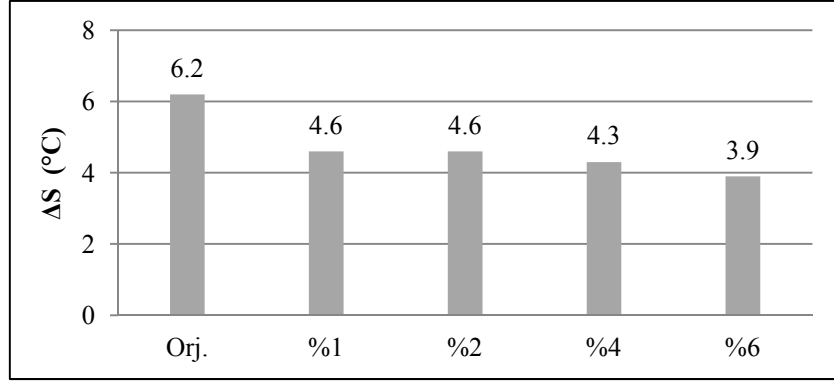
Deneyleer	Orj.	%1	%2	%4	%6
Yumuşama Nok. (°C)	56.2	57.1	57.6	58	58.5
$\Delta S$ (°C)	6.2	4.6	4.6	4.3	3.9
Penetrasyon (dmm)	29	28	25	23	20
Kalıcı Penetrasyon (%)	50.88	71.79	67.57	65.71	60.61
Düktilite (cm)	100+	100+	100+	100+	100+
Kütle Kaybı (%)	0.06	0.20	0.31	0.46	0.575



Şekil 79. RTFOT deneyi sonrası penetrasyon değerleri



Şekil 80. RTFOT deneyi sonrası yumuşama noktası değerleri

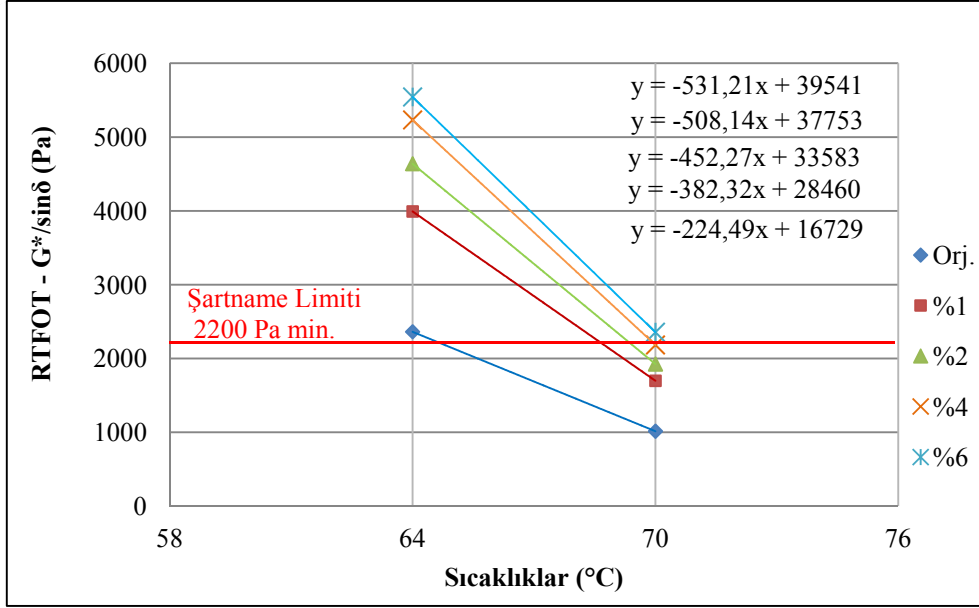


Şekil 81. RTFOT deneyi öncesi ve sonrası yumuşama noktası sıcaklık farkları

RTFOT deneyi sonrası orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılara DSR deneyi yapılmıştır. DSR deneyi 64°C ve 70°C’de kontrollü gerilme (120 Pa) altında, 1.59 Hz (10 rad/s) frekans, 25 mm paralel plaklar ve plakalar arası boşluk 1mm ayarlanarak yapılmıştır. Deney sonucunda  $G'$ ,  $G''$ ,  $G^*$ ,  $\delta$  ve  $G^*/\sin\delta$  parametre değerleri bulunmuştur. Bu parametrelere ilişkin veriler Tablo 29’da,  $G^*/\sin\delta$  değeri ise grafik olarak Şekil 82’de verilmiştir.

Tablo 29. RTFOT deneyi sonrası DSR test sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	$G'$ (Pa)	$G''$ (Pa)	$G^*$ (Pa)	$\delta$ (°)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (AASHTO T5)
Orijinal asfalt	64	204.75	2343.41	2352.33	85.01	2361.30	2200 min.
	70	71.00	1009.36	1011.85	85.98	1014.35	
%1	64	592.97	3947.52	3952.86	81.99	3991.80	
	70	178.418	1688.5	1688.63	84.01	1697.90	
%2	64	698.11	4530.44	4583.91	81.24	4638.01	
	70	215.79	1899.89	1912.11	83.52	1924.40	
%4	64	835.00	5095.25	5163.22	80.69	5232.09	
	70	279.39	2146.87	2164.97	82.59	2183.23	
%6	64	928.84	5383.00	5462.55	80.21	5543.27	
	70	323.52	2310.73	2333.27	82.03	2356.03	



Şekil 82. RTFOT sonrası  $G^*/\sin\delta$  değerleri

Tablo 29'dan görüleceği üzere modifiye asfalt bağlayıcıların  $G'$ ,  $G''$ ,  $G^*$  ve  $G^*/\sin\delta$  değerleri, deneyin yapıldığı sıcaklıklarda orijinal asfalt bağlayıcıya göre artış göstermiş, faz açısı değerleri ise azalmıştır. Orijinal asfalt bağlayıcıya göre %1, %2, %4 ve %6 katkı içeriklerinde  $G^*/\sin\delta$  değerlerinde sırasıyla 64°C'de; %69.05, %96.42, %121.58, %134.76 ve 70°C'de; %67.39, %89.72, %115.23, %132.27 oranlarında artış olmuştur. Şekil 82'de görüldüğü üzere, şartname limiti olan minimum 2200 Pa değerini, bütün bağlayıcılar 64°C sıcaklıkta sağlarken, 70°C sıcaklıkta yalnızca %6 katkı içeriği sağlamıştır. %6 katkı içeriğinde bir üst performans seviyesine (PG 64'den PG 70'e seviyesine) çıkan modifiye bağlayıcı RTFOT sonrasında da bu performans seviyesini korumuştur. Bununla birlikte diğer katkı içeriklerinde de modifiye bağlayıcılar, yaşlandırmadan önce DSR deneyinde şartname limitine göre sağladıkları sıcaklık değerlerini, yaşlandırmadan sonra da aynı sıcaklıklarda sağlayarak performans seviyelerini korumuştur.

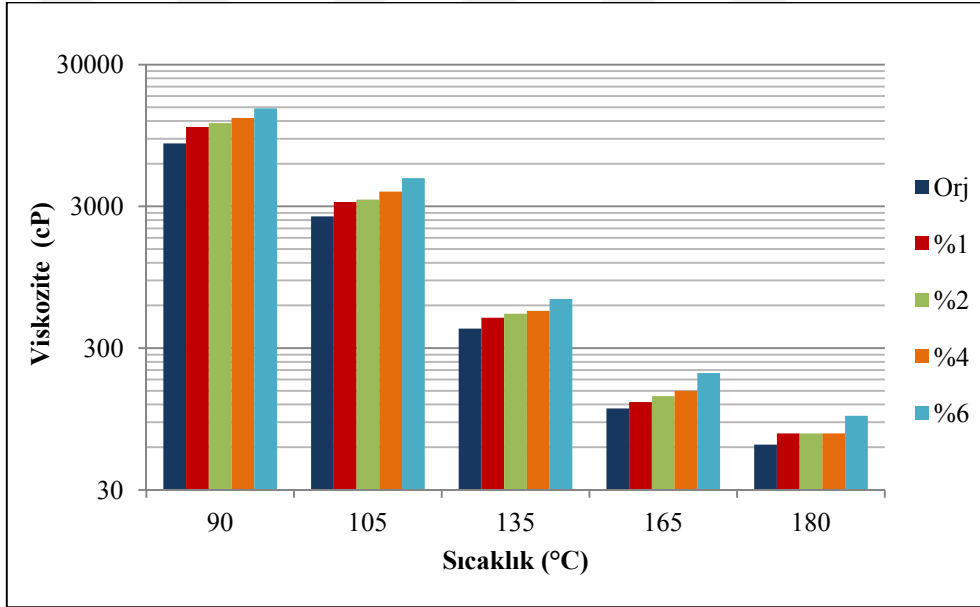
### 3.11. Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları

Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların 90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri bulunmuştur (Tablo 30 ve Şekil 83). Daha sonra, 135°C ve 165°C'deki viskozite değerlerinden yararlanılarak logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği çizilmiştir (Şekil 84) ve bu grafik üzerinden sırasıyla  $170\pm 20$  cP ve  $280\pm 30$  cP değerlerine

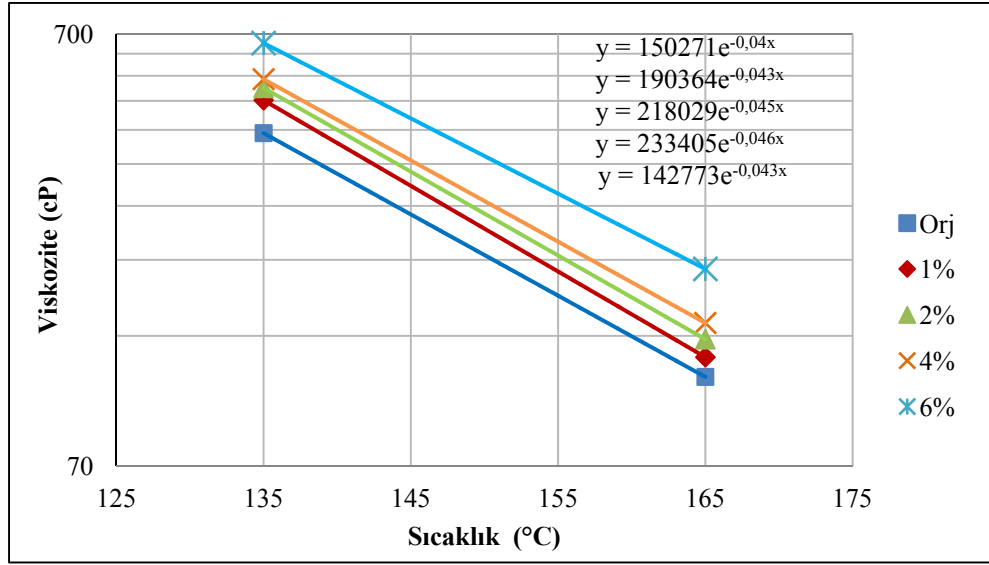
karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları hesaplanmış ve Tablo 31'de verilmiştir.

Tablo 30. RV deney sonuçları, cP

Numune Adı	90°C	105°C	135°C	165°C	180°C
Orijinal asfalt	8346	2550	412.5	112.5	62.5
%1	10896	3217	491.67	125	75
%2	11610	3350	525	137.5	75
%4	12625	3812.67	550	150	75
%6	14750	4750	666.67	200	100



Şekil 83. Asfalt bağlayıcıların 90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri



Şekil 84. Logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği

Tablo 31. Asfalt bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Numune Adı	Karıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)		Sıkıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)	
	135°C	165°C	135°C	165°C
Orijinal asfalt	160	154	148	143
%1	159	154	148	143
%2	159	154	148	143
%4	159	154	148	143
%6	162	157	150	145

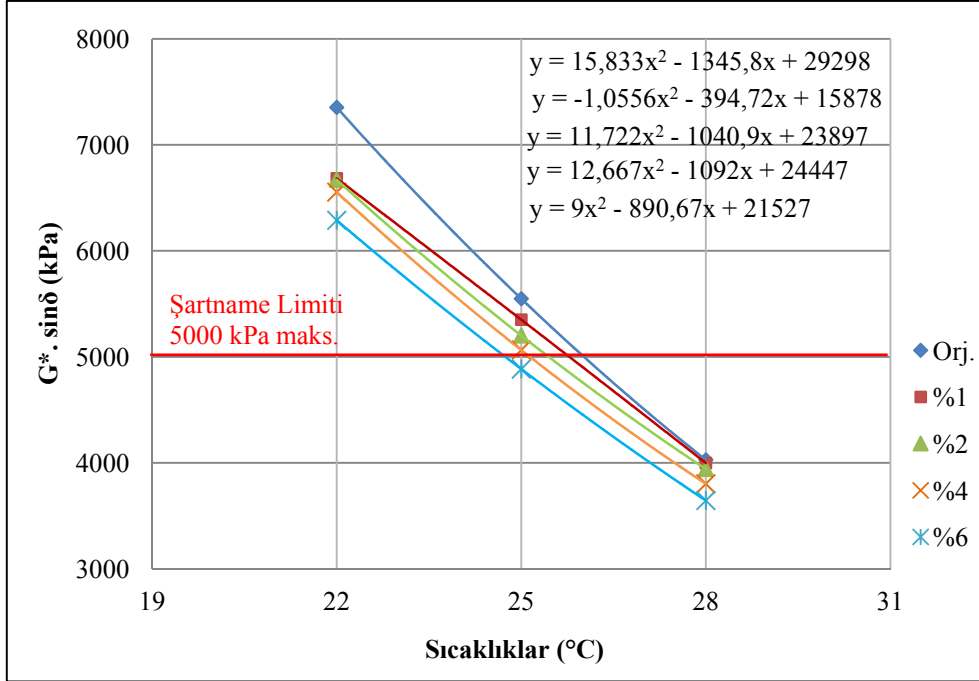
Katkı maddesi, deneyin yapıldığı her sıcaklıkta orijinal asfaltın viskozite değerini artırmıştır. Bu artış, katkı oranının artışıyla paralel olarak gerçekleşmiştir. Orijinal asfaltın 135°C'deki viskozite değerleri %1, %2, %4, %6 katkı içeriğinde sırasıyla %19.19, %27.27, %33.33, %61.62 ve 165°C'de ise %11.11, %22.22, %33.33, %77.78 oranlarında artmıştır. Bütün katkı içeriklerinde, 135°C'deki viskozite değerleri 3000 cP şartname limitini geçmemiştir. %1, %2 ve %4 katkı içerikli modifiye asfalt numunelerinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları orijinal asfaltın değerleriyle aynı çıkmıştır. Yalnızca %6 katkı içeriğinde söz konusu sıcaklık aralıklarında bir miktar artış olmuştur. Bu bulgulardan, katkı maddesinin orijinal asfaltın kıvamını artırarak, tekerlek izi direncini yükselttiği ve asfaltın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemediği açıktır.

### 3.12. Basınçlı Yaşlandırma Kabini Deneysel Sonuçları

RTFOT ile yaşlandırılmış orijinal ve modifiye asfalt numunelerinin uzun süreli yaşlanmaları basınçlı yaşlandırma kabini deneyine tabi tutularak simüle edilmiştir. PAV deneyi sonrasında orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılara DSR deneyi uygulanmıştır. Deneysel verileri Tablo 32’de verilmiş olup, yorulma direnci parametresinin ( $G^* \cdot \sin \delta$ ), sıcaklıkla değişimi Şekil 85’de gösterilmiştir.

Tablo 32. PAV deneyi sonrası DSR test sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G' (kPa)	G'' (kPa)	G* (kPa)	$\delta$ (°)	G* . sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa) (AASHTO T5)
Orijinal asfalt	22	10300	7353	12650	35.53	7353	5000 maks.
	25	7080	5548	8995	38.09	5548	
	28	4650	4028	6151	40.90	4028	
%1	22	10657	6683	12580	32.09	6683	
	25	8182	5350	9777	33.18	5350	
	28	5734	3998	6991	34.89	3998	
%2	22	10590	6670	12520	32.20	6670	
	25	7749.8	5200	9332	33.86	5200	
	28	5477	3941	6747	35.74	3941	
%4	22	10320	6554	12230	32.41	6554	
	25	7457	5064	9014	34.18	5064	
	28	5204	3802	6445	36.15	3802	
%6	22	9411	6288	11320	33.75	6288	
	25	6853	4885	8416	35.48	4885	
	28	4771	3644	6003	37.38	3644	



Şekil 85. PAV sonrası G\*. sinδ değerleri

DSR deneyinde önemli olan, deneyin yapıldığı sıcaklıklarda yorulma direnci parametresini belirten G\*.sinδ değerinin düşük olması ve 5000 kPa Superpave şartname limitini aşmamasıdır. G\*.sinδ değerinin düşük olması, bağlayıcının uzun süreli yaşlanma sonrası yorulmalara karşı daha dirençli olduğu anlamına gelir. Bu manada, Şekil 85'den görüleceği gibi, deney öncelikle 22°C sıcaklıkta başlatılmış ve 28°C sıcaklığa kadar devam ettirilmiştir. Çünkü 22°C sıcaklıkta bütün bağlayıcıların yorulma direnci parametresi değerleri, 5000 kPa şartname sınır değerini aşmıştır. Bu sıcaklığı takip eden 25°C'de yalnızca %6 katkı içeriği şartname sınırını aşmamıştır. Bir sonraki sıcaklıkta ise bütün bağlayıcılar gerekli sınır şartını sağlamıştır. Şekil 85'de görüldüğü gibi deneyin yapıldığı bu üç sıcaklıkta katkı maddesinin artışına bağlı olarak G\*.sinδ değerlerinde bir azalma görülmektedir. Bu azalmalar, orijinal asfalta göre %1, %2, %4 ve %6 katkı içeriklerinde 22°C sıcaklık için sırasıyla %9.1, %9.3, %10.9 ve %14.5; 25°C sıcaklık için %3.6, %6.3, %8.7, %12.0 ve 28°C sıcaklık için %0.7, %2.2, %5.6 ve %9.5 oranlarında olmuştur. Elde edilen veriler bir bütün olarak değerlendirildiğinde, katkı maddesi orijinal asfaltın yorulma direncini artırmıştır. %1 katkı içeriği bile özellikle 22°C sıcaklıkta önemli bir etki sağlarken, en fazla etki bütün sıcaklıklarda %6 katkı içeriğinde olmuştur.

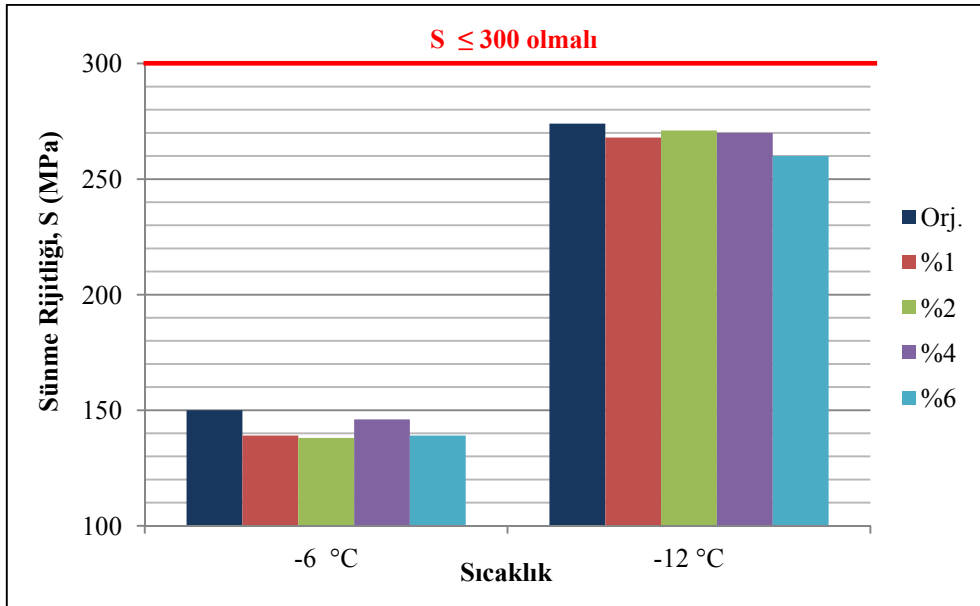


### 3.13. Eğilme Kirişi Reometrisi Deney Sonuçları

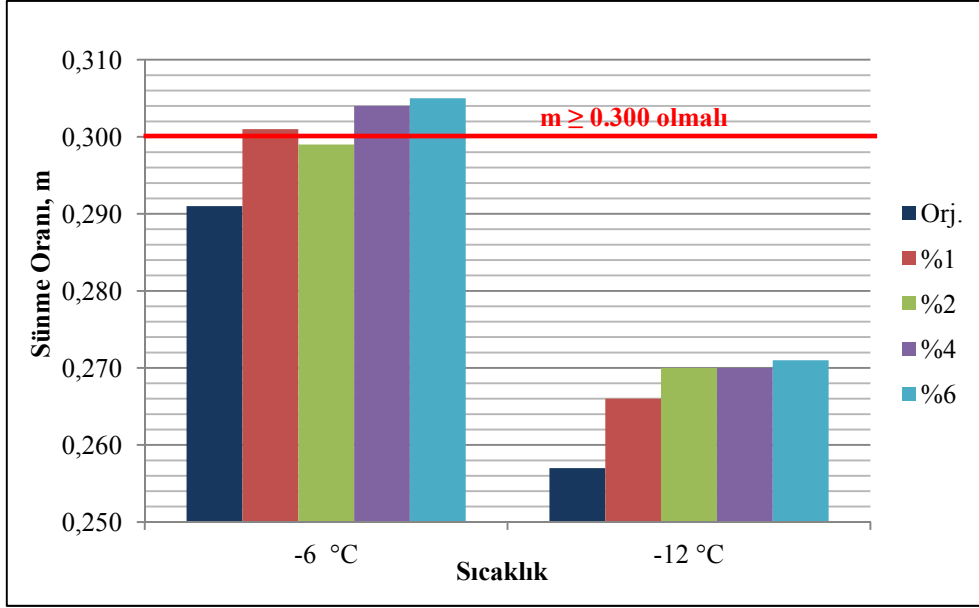
PAV deneyinden sonra elde edilen numunelere BBR (AASHTO TP1) deneyi uygulanmıştır. Deneye ait sünme rijitliği (S) ve sünme oranı (m) değerleri Tablo 33'de verilmiş olup, grafiksel biçimde Şekil 86 ve 87'de gösterilmiştir.

Tablo 33. BBR deney sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	Sünme Rijitliği, S (MPa) ≤ 300 olmalı	Sünme Oranı, m ≥ 0.300 olmalı
Orijinal asfalt	-6	150	0.291
	-12	274	0.257
%1	-6	139	0.301
	-12	268	0.266
%2	-6	138	0.299
	-12	271	0.270
%4	-6	146	0.304
	-12	270	0.270
%6	-6	139	0.305
	-12	260	0.271



Şekil 86. Sünme rijitliği (S) değerlerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 87. Sünme oranı (m) değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Superpave şartnamesinde sünme rijitliği (S) değerinin 300 MPa değerinden fazla olması istenmemektedir. Bu değer yüksek olduğunda, bağlayıcı gevrek davranış göstereceğinden düşük sıcaklıklarda kaplamalarda daha çok çatlama oluşacaktır. Aynı şekilde sünme oranı (m) değerinin de en az 0.300 olması gerekmektedir. Çünkü yüksek m değeri, asfalt sertliğinin azaldığı anlamına gelmektedir. Sünme rijitliği değerlerinin, grafik olarak sunulduğu Şekil 86 incelendiğinde, -6 °C ve -12°C sıcaklıklarda, katkılı asfalt bağlayıcıların değerlerinde orijinal asfalt bağlayıcıya göre bir azalma olduğu görülmektedir. Katkı maddesi, orijinal asfaltın çatlama özelliğini deneyin yapıldığı sıcaklıklarda iyileştirmiştir. Orijinal asfalt bağlayıcıya göre -6°C sıcaklıkta %1, %2, %4 ve %6 katkı içeriklerinde sünme rijitliği değerlerinde sırasıyla %7.3, %8, %2.7 ve %7.3 oranlarında, -12°C sıcaklıkta ise %2.2, %1.1, %1.5 ve %5.1 oranlarında azalma olmuş ve maksimum 300 MPa değerinin altında kalarak şartı sağlamıştır. Şekil 87'deki sünme oranı değerleri incelendiğinde, -6°C sıcaklıkta minimum 0.300 değerini %1, %4 ve %6 katkı içeriğine sahip asfalt bağlayıcıların sağladığı görülürken, -12°C sıcaklıkta bağlayıcıların sünme oranları bu değerinin altında kalmıştır. Ancak, bütün katkılı asfalt bağlayıcıların sünme oranı değerleri her iki sıcaklıkta da orijinal asfalt bağlayıcının sünme oranı değerinden fazladır. Bütün bu veriler topluca değerlendirildiğinde, katkı maddesinin orijinal asfaltın düşük sıcaklıklardaki çatlama eğilimini azaltarak direnç kazandırdığı ve en

fazla etkinin %6 katkı içeriğinde sağlandığı buna rağmen %1 katkı içeriğinin bile bağlayıcının çatlama direncini artırdığı deney sonuçlarından görülmektedir.

### 3.14. Marshall Tasarımına Göre Optimum Asfalt İçeriğinin Belirlenmesi

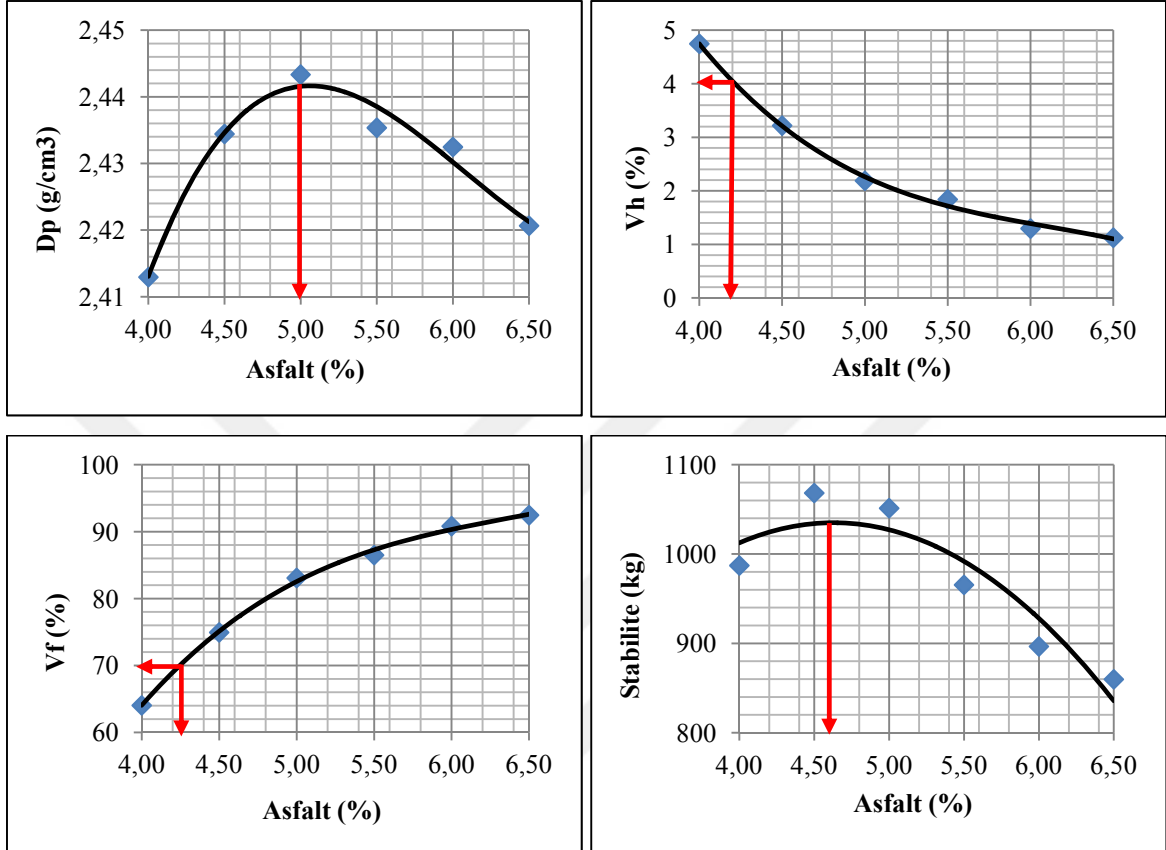
Agreganın en uygun asfalt içeriğiyle karıştırılarak, Marshall briketlerinin oluşturulabilmesi amacıyla Marshall tasarımı yapılmıştır. Buna göre toplam agrega ağırlığının %4-%6.5 oranları arasında orijinal asfalt bağlayıcı %0.5'lik artışlarla kullanılmış ve her asfalt içeriğinde üçer adet Marshall briketi hazırlanmıştır. Hazırlanan briketlerin yoğunluk-boşluk analizleri yapılarak stabilite ve akma değerleri elde edilmiştir. Stabilite ve akma değerlerine bağlı olarak Marshall oranları hesaplanmıştır. Optimum asfalt içeriğinin belirlenmesi için elde edilen bu veriler Tablo 34'de topluca verilmiştir.

Tablo 34. Orijinal asfalt bağlayıcıyla yapılan karışımların tasarım sonuçları ve şartname limitleri

Karışım Özelliği	Şartname Kriteri		Asfalt İçeriği (%)					
	Min.	Maks.	4	4.5	5	5.5	6	6.5
Hacim Özgül Ağırlık (Dp-g/cm <sup>3</sup> )	-	-	2.413	2.434	2.443	2.435	2.432	2.421
Hava Boşluğu (Vh-%)	3	5	4.75	3.22	2.19	1.84	1.30	1.13
Asfaltla Dolu Boşluk (Vf-%)	65	75	64.06	74.96	83.10	86.51	90.83	92.48
Agregalar Arası Boşluk (VMA-%)	14	16	13.21	12.86	12.95	13.65	14.16	14.98
Stabilite (kg)	900	-	987	1068	1051	966	897	860
Akma (mm)	2	4	3.57	3.49	4.17	4.07	4.27	4.43
Marshall Oranı (kg/mm)	-	-	276.47	306.02	252.04	237.35	202.48	194.13

Tablo 34'deki verilerden yararlanılarak hacim özgül ağırlık, hava boşluğu, asfaltla dolu boşluk ve stabilite değerlerine ait grafikler çizilmiş ve Şekil 88'de gösterilmiştir. Bu dört grafikte Karayolları Teknik Şartnamesi [132] aşınma tabakası tasarım kriterlerini

sağlayan değerlere karşılık gelen asfalt içerikleri işaretlenmiştir. İşaretlenen bu asfalt içeriklerinin ortalamaları alınarak optimum asfalt içeriği hesaplanmıştır.



Şekil 88. Dp, Vh, Vf ve stabilite değerlerini gösteren grafik eğrileri

Şekil 88'deki grafiğe göre belirlenen asfalt içerikleri; hacim özgül ağırlığa göre %5, hava boşluğuna göre %4.2, asfaltla dolu boşluğa göre % 4.25 ve stabiliteye göre %4.6'dır. Bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak optimum asfalt içeriği %4.5 olarak hesaplanmıştır. Orijinal ve katkılı asfalt bağlayıcılarla oluşturulan karışımlarda bu oran dikkate alınmıştır.

Marshall tasarımı kapsamında orijinal asfalt ile üretilen briketlere ait özellikler ve optimum asfalt içeriklerinin bulunması amacıyla çizilen grafikler geniş ölçekli olarak Ek Tablo 1 ve Ek Şekil 1'de verilmiştir.

### 3.15. Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

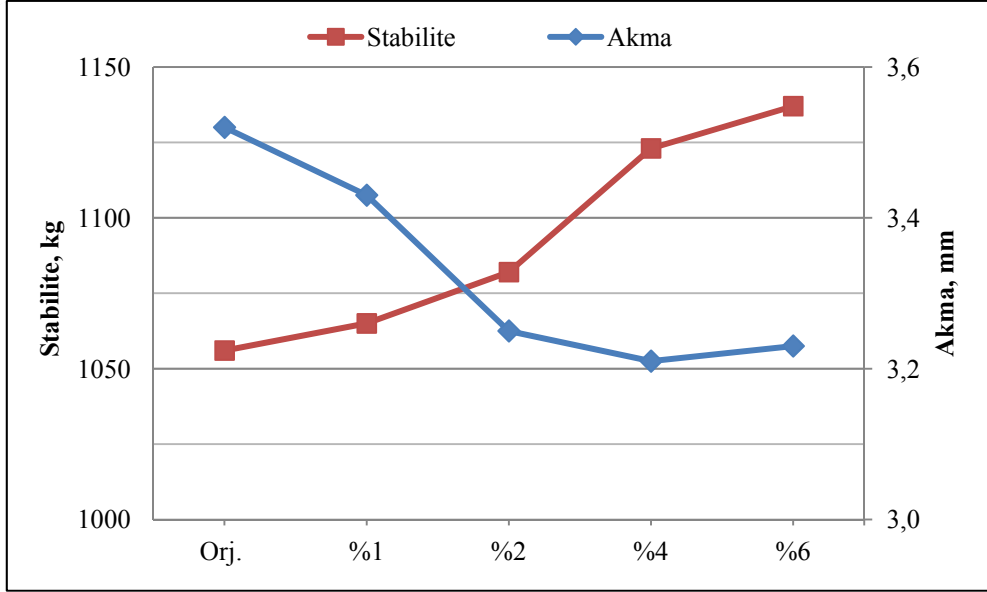
Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılar %4.5 optimum asfalt içeriğinde agrega ile karıştırılarak Marshall biriketleri üretilmiştir. Briketlere ilişkin yoğunluk-boşluk analizleri, stabilite, akma ve Marshall oranı değerleri Tablo 35’de gösterilmiştir.

Tablo 35. Marshall stabilite deney sonuçları

Karışım Özellikleri	Numune Adı				
	Orj. Asfalt	%1	%2	%4	%6
Bağlayıcı Özgül Ağırlığı (Gb-g/cm <sup>3</sup> )	1.022	1.041	1.047	1.051	1.053
Optimum Asfalt İçeriği (%)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Hacim Özgül Ağırlık (Dp-g/cm <sup>3</sup> )	2.434	2.436	2.434	2.434	2.433
Hava Boşluğu (Vh-%)	3.25	3.34	3.47	3.53	3.59
Asfaltla Dolu Boşluk (Vf-%)	74.80	73.89	73.00	72.62	72.23
Agregalar Arası Boşluk (VMA-%)	12.88	12.80	12.86	12.88	12.92
Stabilite (kg)	1056	1065	1082	1123	1137
Akma (mm)	3.52	3.43	3.25	3.21	3.23
Marshall Oranı (kg/mm)	300.00	310.50	332.92	349.84	352.01

Tablo 35 incelendiğinde, sıkıştırılmış briketlere ait özgül ağırlıklar orijinal ve modifiyeli asfalt bağlayıcılar için önemli bir değişme göstermemiştir. Briketlere ait hava boşluğu oranları incelendiğinde katkı oranının artışına paralel olarak hava boşluğu içeriğinin arttığı görülmektedir. Şartname limitleri içerisinde kalan bu boşluk oranı artışının yüksek sıcaklıklarda önemli bir etken olacağı, ağır taşıtlar ve yüksek sıcaklık nedeniyle kaplamada meydana gelebilecek terleme ve kuma olayları sonucunda yüzeye çıkacak bağlayıcının, oluşan bu boşluklara dolarak, tekerlek izinde oturma direncine katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

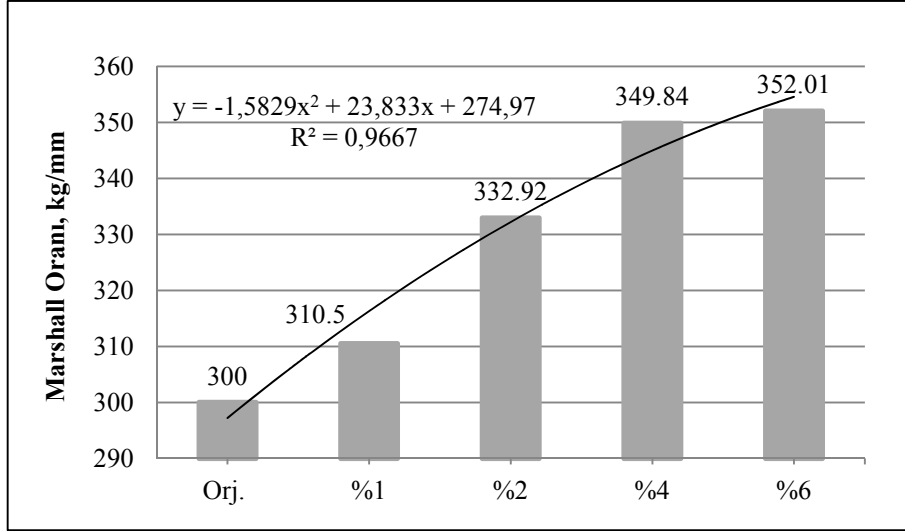
Tablo 35’de verilen stabilite-akma ve Marshall oranı değerleri grafik olarak Şekil 89 ve 90’da gösterilmiştir.



Şekil 89. Marshall stabilite-akma grafiği

Şekil 89'daki briketlere ait stabilite-akma grafiği incelendiğinde katkı oranı arttıkça stabilite değerlerinin arttığı, akma değerlerinin ise azaldığı açıkça görülmektedir. Orijinal asfaltla yapılan karışıma göre %1, %2, %4 ve %6 oranlarında katkı içeren modifiyeli asfalt bağlayıcılarla yapılan karışımların stabilite değerleri sırasıyla %0.85, %2.46, %6.34 ve %7.67 oranlarında artarken, akma değerleri ise sırasıyla %2.56, %7.67, %8.81 ve 8.24 oranlarında azalmıştır. Bu durum katkının, asfaltın adezyon kuvvetini arttırarak, agregayı sarma eğilimini güçlendirdiği şeklinde açıklanabilir.

Marshall oranı (Marshall Stabilite/Akma kg/mm) malzemenin servis süresi boyunca kalıcı deformasyonlara karşı direncini gösteren bir parametredir. Asfalt bağlayıcıdaki katkı içeriğinin artmasıyla, briketlerin stabilite değerleri artmış ve akma değerleri düşmüştür. Bu iki durumun yansması olarak Marshall oranı değerleri artmış ve Şekil 90'da grafik olarak gösterilmiştir.



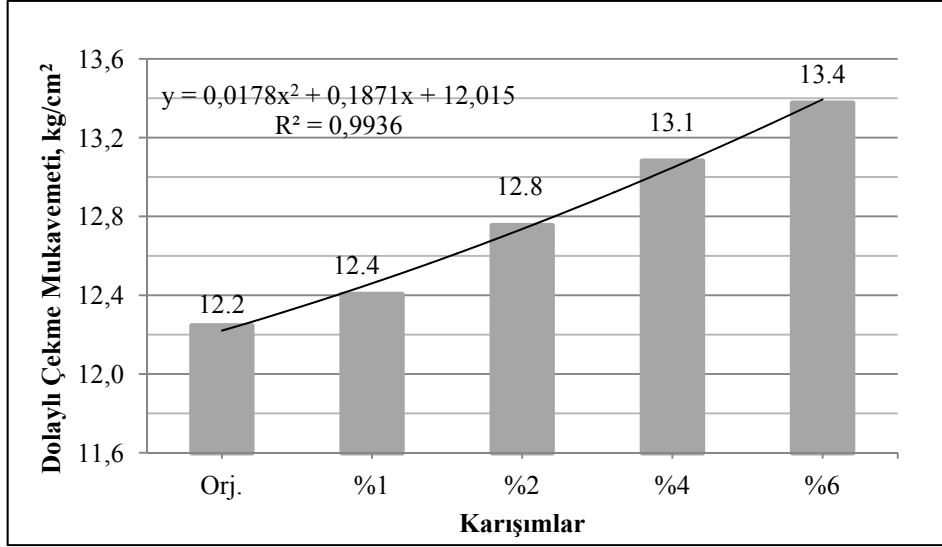
Şekil 90. Marshall oranı değerleri

Şekil 90'da görüleceği üzere en yüksek Marshall oranı değerine %6 katkı içeriğiyle modifiye edilen asfalt bağlayıcılı karışımda ulaşılmış ve bu karışım için tekerlek izi direnci, orijinal karışıma oranla %17.34 oranında artış göstermiştir.

Optimum asfalt içeriğine göre üretilen orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılı karışımların Marshall tasarım özellikleri Ek Tablo 2-6'da verilmiştir.

### 3.16. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları

Marshall stabilize deneyinden elde edilen optimum asfalt içeriğinde her bir karışım için üçer adet Marshall briketi üretilmiş olup, 25°C sıcaklıkta deneye tabi tutulmuştur. Her bir karışımdaki üç briketin deney sonucu ortalamaları alınarak deney sonuçları Şekil 91'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 91. Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları

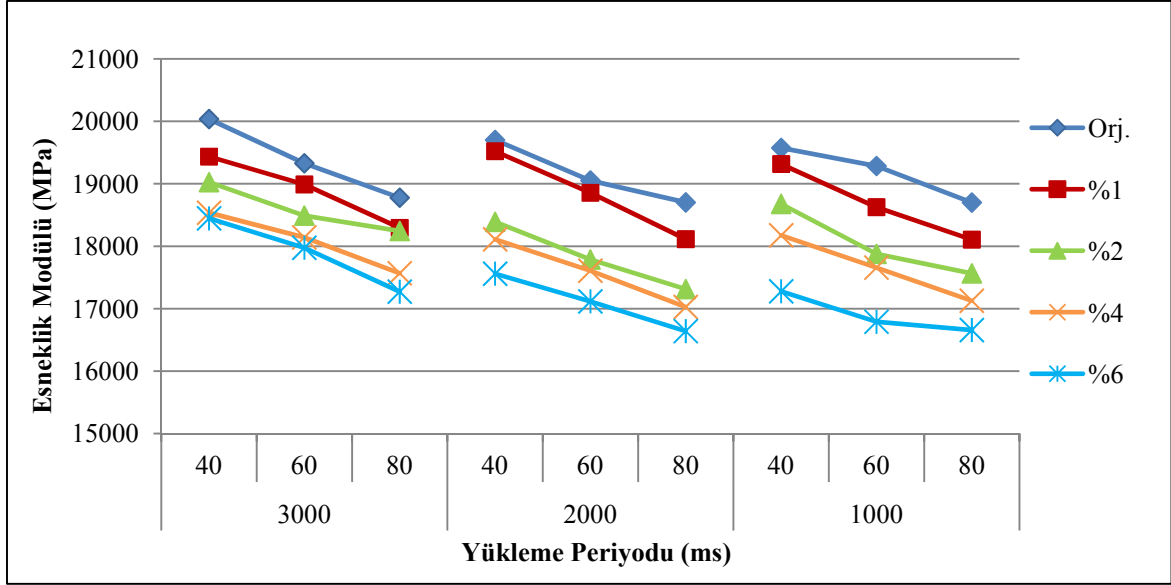
Şekil 91’de verilen dolaylı çekme mukavemeti sonuçlarından katkı miktarının artışıyla birlikte, dolaylı çekme mukavemeti değerleri de artış göstermiştir. Bu artış, orijinal asfalta göre %1, %2, %4 ve %6 oranında katkı içeren karışımlar için sırasıyla %1.30, %4.15, %6.83 ve %9.23 oranlarında olmuştur. Asfalt kaplamaların düşük sıcaklıklarda ve trafik yükleri altında oluşan çekme gerilmelerine karşı direncinin bir göstergesi olan bu deneyde, katkı maddesi modifikasyonu söz konusu direncin arttığı net bir şekilde görülmektedir.

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi için hazırlanan her bir brikete ait deney sonucu Ek Tablo 7’de verilmiştir.

### 3.17. Dolaylı Çekme Deney Sonuçları

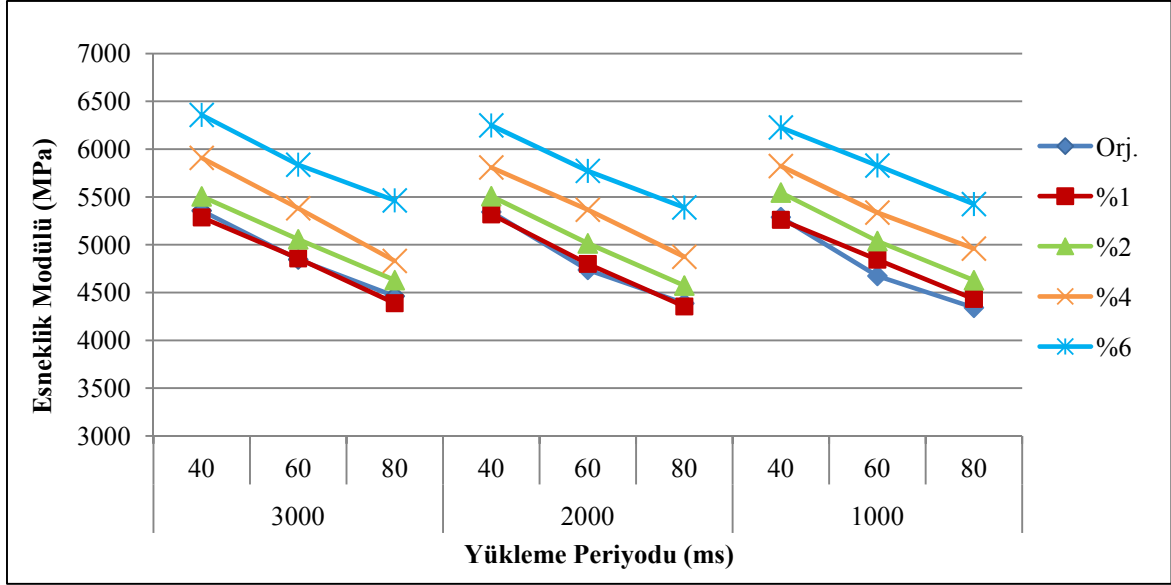
Orijinal ve modifiyeli asfalt bağlayıcılarla hazırlanan briketler; 5°C, 25°C ve 40°C sıcaklığında, 1000 ms (1.00 Hz), 2000 ms (0.50 Hz) ve 3000 ms (0.33 Hz) yükleme periyodunda ve 40 ms, 60 ms ve 80 ms yük artış süresinde dolaylı çekme deneyine tabi tutulmuştur. Karışımların esneklik modülü değerleri üzerine; sıcaklık, yükleme periyodu ve yükleme hızı değişimlerinin etkisi Şekil 92-94’de gösterilmiştir.



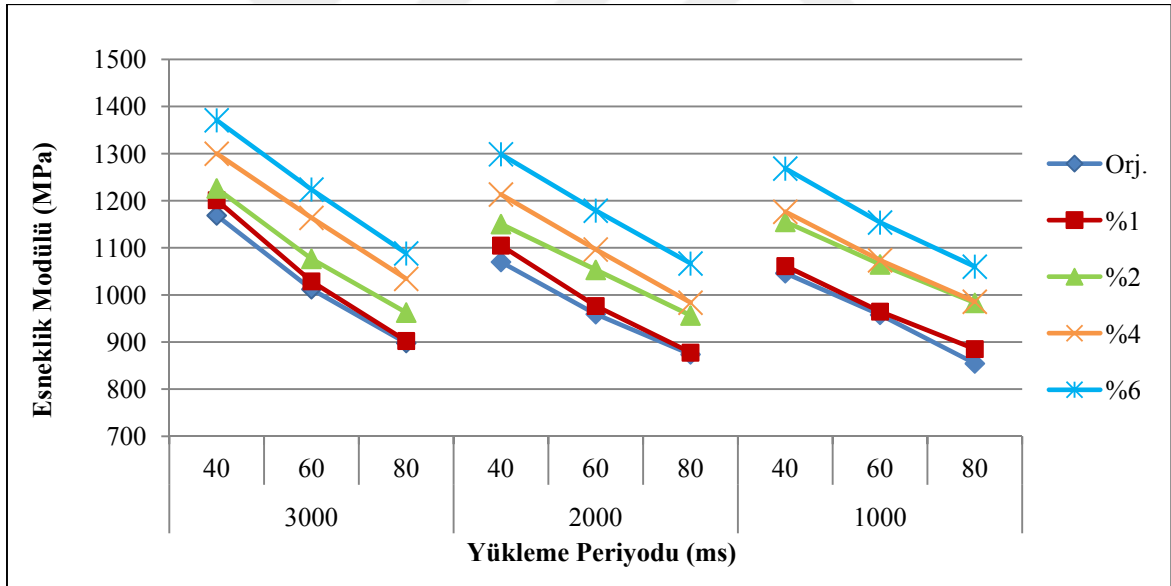


Şekil 92. Karışımların esneklik modülü değerleri, 5°C

Karışımların 5°C sıcaklıktaki esneklik modülü değerleri Şekil 92'deki grafik üzerinden incelendiğinde, orijinal asfalt bağlayıcı ile yapılan karışımların esneklik modülü değerleri, deneyin yapıldığı bütün yükleme periyot ve hızlarında, dört farklı oranda modifiye edilen asfalt bağlayıcı ile yapılan karışımlardan daha yüksek çıkmıştır. Karışımlardaki katkı içeriği arttıkça esneklik modülü değerleri azalmıştır. Buradan orijinal asfalt ile yapılan karışımların, düşük sıcaklıklarda çatlak oluşmasına karşı nispeten daha az dirençli oldukları söylenebilir. Böylece katkının bu düşük sıcaklıkta, orijinal asfalt bağlayıcının çatlak oluşumuna karşı direncini artırdığı sonucu çıkmaktadır.



Şekil 93. Karışımların esneklik modülü değerleri, 25°C

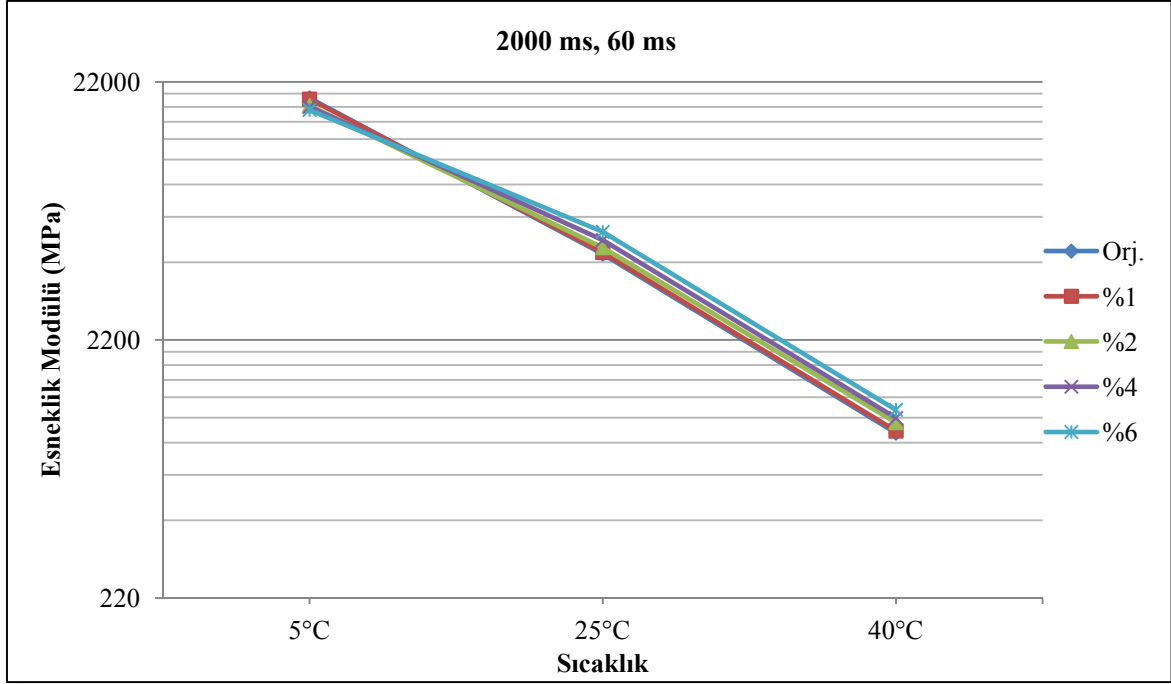


Şekil 94. Karışımların esneklik modülü değerleri, 40°C

Karışımların, 25°C ve 40°C sıcaklıkta bulunan esneklik modülü değerleri Şekil 93 ve 94'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi orijinal asfaltla yapılan karışımın 5°C sıcaklıktaki esneklik modülü değerleri, katkıli karışımlardan yüksek olmasına rağmen 25°C ve 40°C sıcaklıklarda bu değerler azalmıştır. Daha açık bir ifadeyle belirtmek gerekirse orta ve yüksek sıcaklıklarda katkıli karışımların esneklik modülü değerleri,

katkısız karışıma göre katkı içeriğindeki artışa paralel olarak sürekli bir artış göstermiş ve bu sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı direnci artırmıştır. Böylece, katkı maddesi ilave edilmiş orijinal asfaltın, trafik etkisiyle kaplamanın altında meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme ve basınç gerilmelerinin sebep olduğu kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığı, esneklik modülünün artmasıyla asfalt kaplamalarda kaplamanın yük dağıtma kabiliyetinin iyileştiği söylenebilir. Bununla birlikte her bir yükleme periyodu için, kısa yükleme süresinde beklenildiği gibi daha yüksek esneklik modülü değeri elde edilmiştir. Bu sonuç, yükleme süresi kısaldıkça, malzemenin daha elastik davrandığının bir göstergesidir.

Deneyin yapıldığı her sıcaklık, her yükleme periyodu ve farklı hızlarda bütün karışımlardan elde edilen esneklik modülü değerleri, Asphalt Aggregate Mixture Analyzing System (AAMAS) tarafından hazırlanan ve karışımların esneklik modüllerinin değerlendirildiği nomografa göre incelenmiştir. Nomografa göre, 5°C sıcaklık için uygun esneklik modülü aralığı yaklaşık 8411 MPa ile 23212 MPa arasında kalırken, bu aralığın üzerindeki değerler yüksek esneklik modülüne, altındaki değerler ise düşük esneklik modülüne sahiptir. Benzer şekilde 25°C ve 40°C sıcaklıklar için sırasıyla uygun esneklik modülü değerlerinin yaklaşık 1946 MPa-6205 MPa ve 781MPa-2355 MPa arasında olduğu belirtilmiştir [229]. Karışımların esneklik modülü değerleri bütün sıcaklıklarda belirtilen bu sınır değerleri içerisinde kalmıştır.



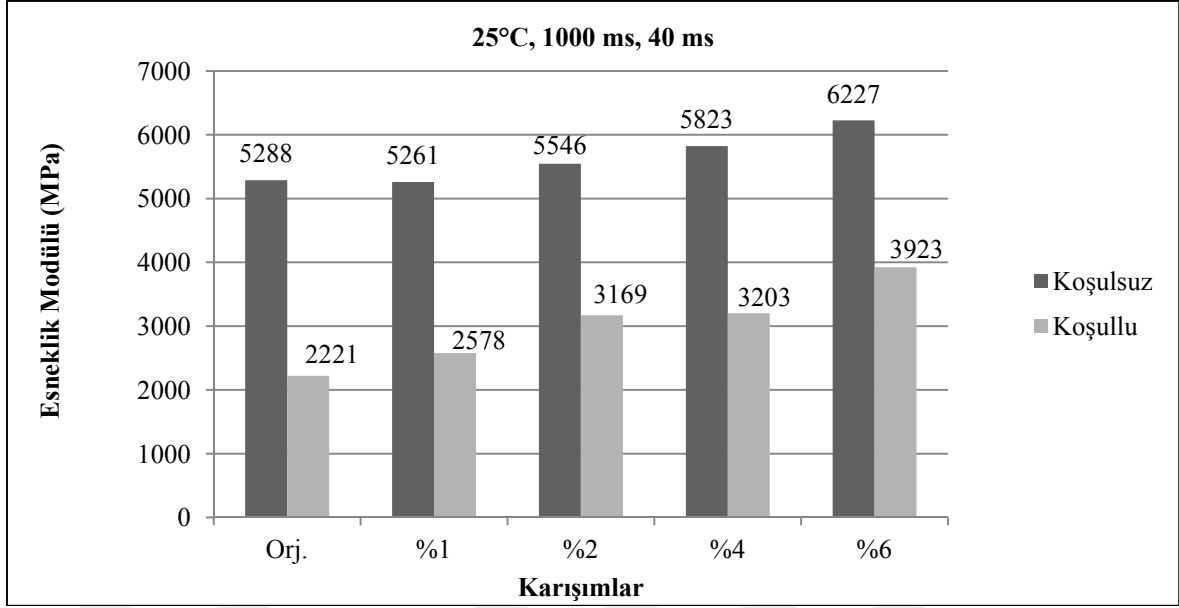
Şekil 95. Karışımların esneklik modülü değerlerinin sıcaklığa göre değişimi

Şekil 95’de karışımların esneklik modülü değerlerinin sıcaklıkla değişimi grafik olarak verilmiştir. Esneklik modülü değerleri tüm karışımlarda en yüksek 5°C’de, en düşük 40°C’de bulunmuştur. Bulunan bu değerler, viskoelastik olarak davranan malzemelerin davranışı ile uyumludur.

Dolaylı çekme deneyi için hazırlanan her bir brikete ait detaylı deney sonucu Ek Tablo 8-12’de verilmiştir.

### 3.18. Su Hasarı Deney Sonuçları

Dolaylı Çekme deneyinde kullanılan numuneler, Bölüm 2.7.3’de anlatıldığı şekilde koşullandırılarak dolaylı çekme deneyine tekrar tabi tutulmuştur. Daha sonra koşullu ve koşulsuz esneklik modül değerleri (koşullu/koşulsuz) birbirlerine oranlanarak, numunelerdeki esneklik modülü kayıpları bulunmuştur. Deneye ait sonuçlar Şekil 96’da gösterilmiştir.

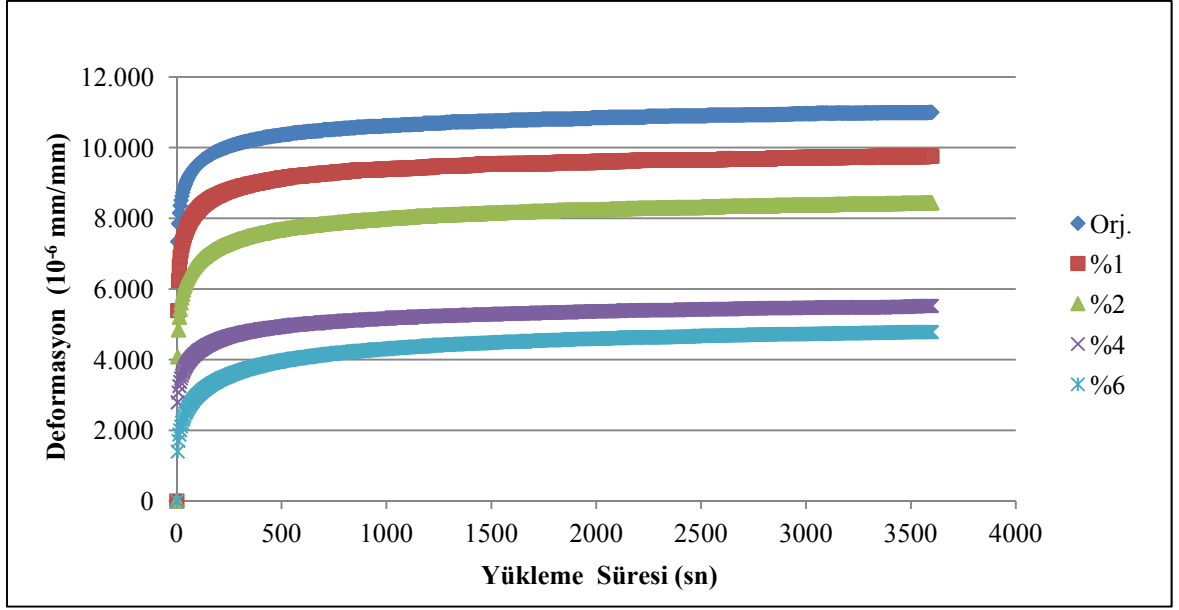


Şekil 96. Karışımların koşullu/koşulsuz esneklik modülü değerleri değişimi

Şekil 96'dan görüleceği gibi, koşullandırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri, koşullandırılmamış numunelere göre düşüş göstermiştir. Koşullandırmadan sonra, orijinal asfalt bağlayıcı ile yapılan karışımın esneklik modülü değerinde %58 oranında bir kayıp gerçekleşirken; %1, %2, %4 ve %6 oranlarında katkı içeren karışımlarda bu kayıp sırasıyla %51, %43, %45 ve %37 oranlarında gerçekleşmiştir. Katkı miktarındaki artışa bağlı olarak, karışımların esneklik modülü değerlerindeki kayıplar azalmıştır. En az kayıp %6 katkı oranında gerçekleşmiştir. Katkı maddesi, asfaltın agregaya yapışma (adezyon) özelliğini iyileştirerek su hasarına karşı direncini artırmıştır.

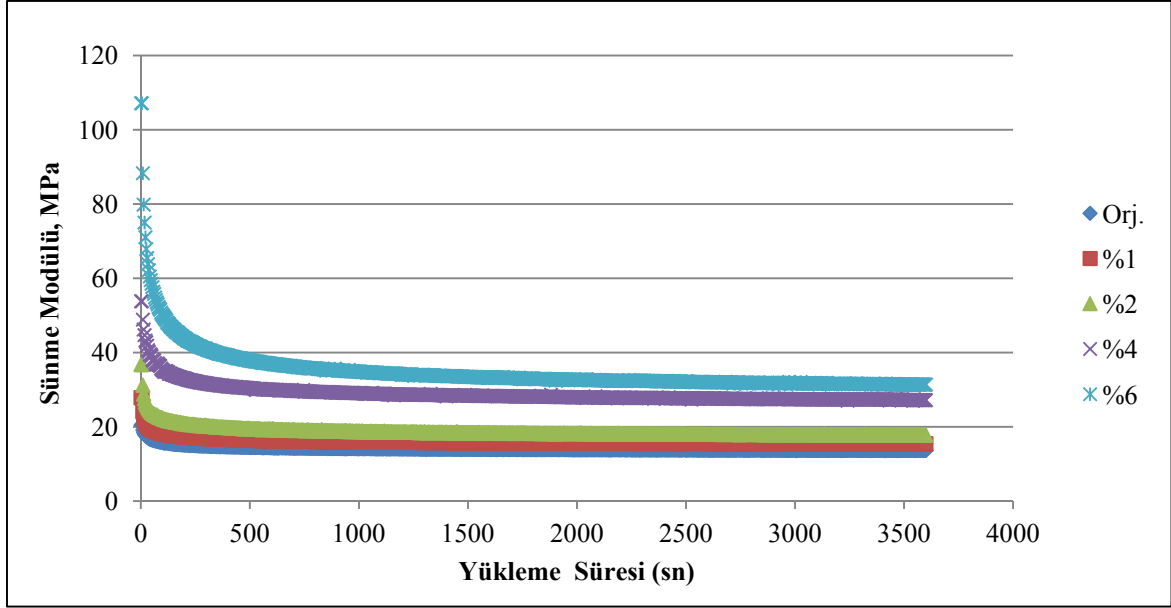
### 3.19. Statik Sünme Deney Sonuçları

Orijinal ve modifiyeli asfalt bağlayıcılarla hazırlanan karışımlar, 25°C sıcaklıkta tek eksenli statik sünme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyden elde edilen sünme deformasyonunun (kalıcı deformasyonun) zamana göre değişimi Şekil 97'de, deformasyon değerlerine göre hesaplanan sünme modülü değerlerine ilişkin grafik ise Şekil 98'de verilmiştir.



Şekil 97. Karışımların 25°C sıcaklıktaki deformasyon-zaman ilişkisi

Şekil 97'den görüleceği gibi, numunelere yük uygulandıktan sonra ani bir deformasyon artışı oluşmakta ve belirli bir süre sonra bu artış yavaşlamaktadır. Bu ani deformasyon artışları, karışımdaki katkı miktarı arttıkça azalmaktadır. Dolayısıyla katkı miktarındaki artış ile tekerlek izi oluşma riski arasında ters bir orantı olduğu ve katkı miktarı artışıyla oluşan kalıcı deformasyon miktarının azaldığı söylenebilir. Ayrıca orijinal asfaltla yapılan karışıma göre %1, %2, %4 ve %6 katkı içerikli karışımların 3600 sn sonunda deformasyon miktarı sırasıyla %11.27, %23.27, %49.82 ve %56.55 oranlarında azalmıştır.

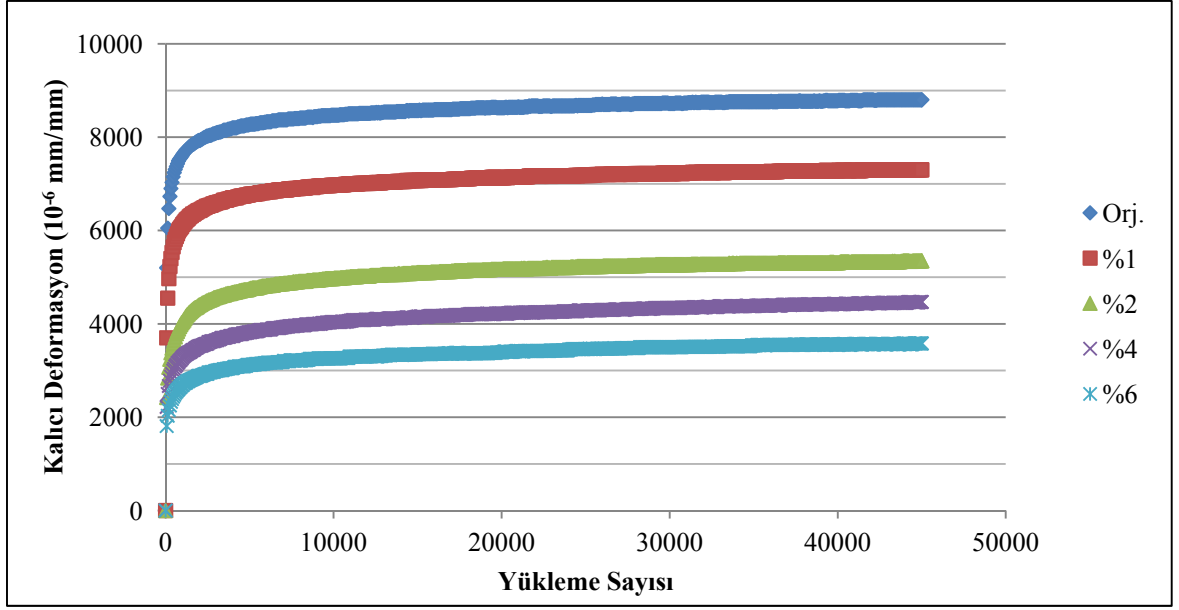


Şekil 98. Karışımların 25°C sıcaklıktaki sünme modülü-zaman ilişkisi

Deformasyon değerlerine göre hesaplanan sünme modülü değerleri Şekil 98'deki grafik üzerinde incelendiğinde, 200 saniyeye kadar sünme modülü değerlerinde ani bir azalmanın olduğu ve bu süreden itibaren deneyin bittiği ana kadar sünme modülü değerlerinde daha az bir azalmanın olduğu görülmektedir. Yine şekilden görüleceği gibi katkı miktarındaki artışa bağlı olarak sünme modülü değerlerinde artış gözlenmiştir. Orijinal asfalt, %1 ve %2 katkı içerikli modifiye asfalt bağlayıcılarla yapılan karışımların sünme modülü değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Sünme modülü değerindeki artış, %2 katkı içeriğinden sonraki karışımlarda yani %4 ve %6 katkı içeriklerinde daha belirgin bir şekilde kendini göstermiş olmakla birlikte katkının, sıcak asfalt karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımını artırdığını açıkça ortaya koymaktadır.

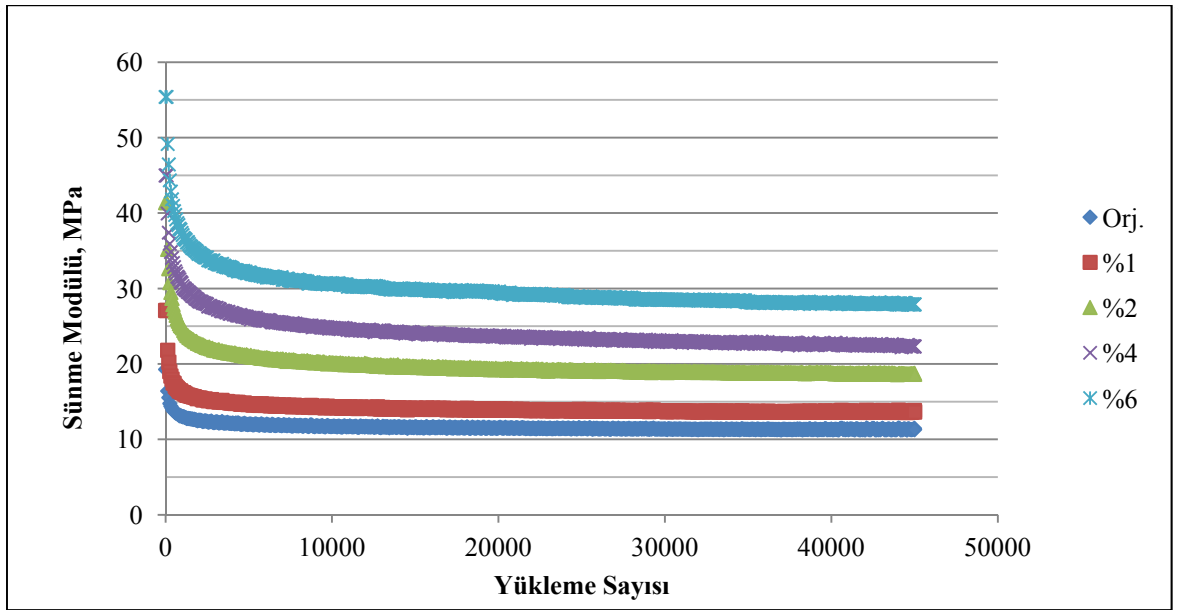
### 3.20. Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deney Sonuçları

Orijinal ve modifiyeli asfalt bağlayıcılarla hazırlanan karışımlar, 25°C sıcaklıkta tek eksenli dinamik sünme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyden elde edilen kalıcı deformasyonun yükleme sayısına göre değişimi Şekil 99'da, deformasyon değerlerine göre hesaplanan sünme modülü değerlerine ilişkin grafik ise Şekil 100'de verilmiştir.



Şekil 99. Karışımların 25°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 99'dan görüleceği üzere, katkı miktarının artışıyla karışımlarda oluşan kalıcı deformasyonlar azalmış ve en çok %6 katkı içeriğinde azalma göstermiştir. Katkı maddesinin, orijinal asfaltın yorulma direncini artırdığı ve buna bağlı olarak karışımlardaki kalıcı deformasyonların azaldığı, şekildeki verilerden net bir biçimde anlaşılmaktadır.



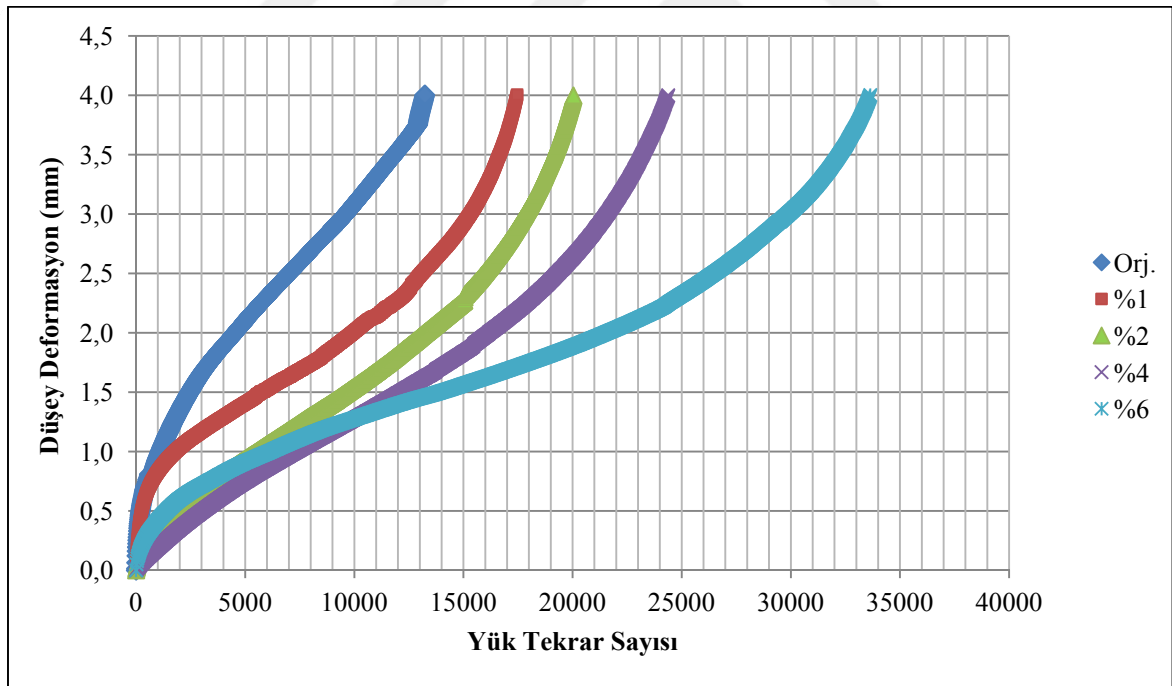
Şekil 100. Karışımların 25°C sıcaklıktaki sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi



Karışımların sünme modülü değerlerinin 2000 yük tekrar sayısına kadar hızlı bir biçimde azaldığı ve bu yük tekrar sayısından sonra deneyin sona erdiği ana kadar daha az bir azalmanın gerçekleştiği Şekil 100'de görülmektedir. Karışımlarda oluşan bu ani sünme modülü değerlerindeki azalma, konsolidasyondan kaynaklanan sıkışmadan meydana gelmiştir. Yine şekilden görüleceği üzere en düşük sünme modülü değeri, orijinal asfalt ile yapılan karışımda en yüksek sünme modülü değeri ise %6 katkı içeren karışımda gerçekleşmiştir. Bütün bu sonuçlar DSR deneyinden elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir.

### 3.21. Dolaylı (İndirekt) Çekme Yorulma Deney Sonuçları

Çalışmada her bir katkı oranı için hazırlanan üçer adet Marshall numunesi indirekt çekme yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Üçer numuneden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak Şekil 101'deki deformasyon-yük tekrar sayısı grafiği çizilmiştir.



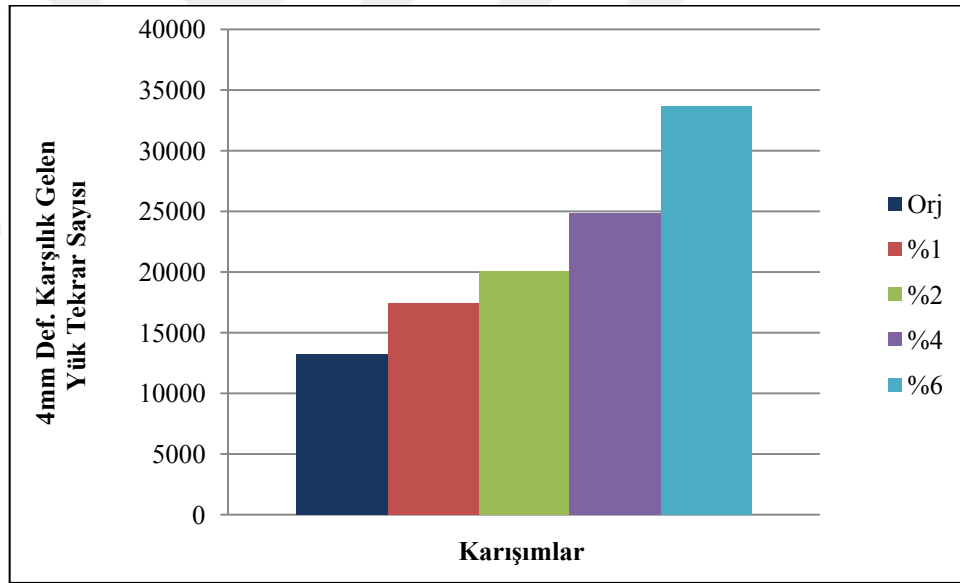
Şekil 101. Karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi, 25°C ve 300 kPa

Şekil 101 incelendiğinde, katkı kullanımıyla orijinal asfalt karışımların kırılması için gerekli olan yük tekrar sayısı artışına bağlı olarak, yorulma ömürlerinin önemli derecede arttığı ve oluşan ani deformasyon artışlarının azaldığı görülmektedir. Detaylı bir

karşılaştırma yapılması amacıyla karışımların 4 mm deformasyona karşılık gelen yük tekrar sayıları Tablo 36’da ve grafiksel gösterimi Şekil 102’de verilmiştir.

Tablo 36. Karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Karışım Adı	4 mm Deformasyondaki Yük Tekrar Sayısı
Orijinal Asfalt	13231
%1 Katkılı	17461
%2 Katkılı	20041
%4 Katkılı	24831
%6 Katkılı	33641



Şekil 102. Karışımların 4 mm deformasyona karşılık gelen yük tekrar sayıları

Şekil 102 incelendiğinde, karışımların yük tekrar sayılarının %1, %2, %4 ve %6 katkı içeriğinde, orijinal karışıma göre sırasıyla %31.97, %51.47, %87.67 ve %154.26 oranında arttığı tespit edilmiştir. Buradan %1 katkı içeriğine sahip karışımın bile etkili olduğu görülmektedir. Özellikle %6 katkı içeriğinde hazırlanan karışımın yorulma dayanımının %154.26 gibi çok yüksek düzeyde arttığı gözlenmiştir.

Yorulma problemi asfalt kaplamalarda karşılaşılan en önemli sorunlardan biri olmakla birlikte araştırmacılar tarafından tüm dünyada sorunun çözümüne yönelik halen araştırma ve çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü'ne göre yorulma çatlakları görülen bir yolda çatlak oluşumu iyice belirginleştğinde ve çatlakların genişliği arttığında ya da çatlak alanı toplam alanın %30'undan az olduğunda, çatlak olan alanın kesilip atılması ve boşalan yerin yamanması tavsiye edilmektedir. Çatlak alanının %30'dan fazla olması durumunda ise geçici çözüm olarak kaplama tabakasının harç tipi örtü tabakası veya sathi kaplama ile kaplanması önerilmektedir. Kalıcı çözüm olarak ise asfalt kaplamaların yeniden kullanım metodu ile iyileştirilmesi ya da ilave tabaka yapılması yoluna gidilmektedir. Bu bilgilerden hareketle katkı içeriği artışıyla karışımların yorulma dayanımlarının arttığı dolayısıyla sıcak asfalt karışımların yeniden yapım veya rehabilitasyon ihtiyaçlarının önemli düzeyde azalacağı açıkça söylenebilir.

### **3. 22. Sentezlenen Katkı Maddesi ile SBS Katkısının Kıyaslanması**

Bu bölümde, sentezlenen bor içerikli katkı maddesi ile yaygın olarak kullanılan SBS katkısının asfalt üzerindeki etkileri birbirleriyle kıyaslanmıştır. SBS modifikasyonunda kullanılan orijinal asfalt bağlayıcının bu çalışmada kullanılan orijinal asfalt bağlayıcı ile aynı penetrasyon sınıfında olmasına dikkat edilmiştir. Çalışma kapsamında en iyi performans özellikleri gösteren %6 katkı içerikli modifiye asfalt bağlayıcı ile %4 SBS katkı içerikli (asfalt ağırlığının) modifiye asfalt bağlayıcı fiziksel, reolojik ve mekanik özellikler açısından birbirleriyle karşılaştırılmış olup, deney sonuçları Tablo 37'de verilmiştir.

Tablo 37. Sentezlenen katkı maddesi ile SBS katkısının asfalt üzerindeki etkilerinin kıyaslanması

DENEY		%6 Bor Katkısı İçerikli Modifiye Asfalt Bağlayıcı	%4 SBS Katkı İçerikli Modifiye Asfalt Bağlayıcı [230]*
Penetrasyon (dmm)		33	41
Yumuşama Noktası (°C)		54.6	57.8
Parlama Noktası (°C)		263	260+
Dönel Viskozimetre (135 °C, cP)		666.67	597.5
DSR	Yenilme Sıcaklığı (°C)	70	75.3
	PG sınıfı	70	70
BBR	-6 °C	S	139
		m	0.305
	-12 °C	S	260
		m	0.271
Marshall Stabilite	Stabilite (kg)	1137	1329
	Akma (mm)	3.23	3.8

\*Mevlüt Kaya, Doktora Tezi.

Tablo 37 incelendiğinde, %6 bor katkısı içerikli modifiye asfalt bağlayıcının penetrasyon, yumuşama noktası, yenilme sıcaklığı, 6 °C sıcaklıktaki sünme oranı (m), Marshall stabilite ve akma değerlerinin, %4 SBS katkı içerikli modifiye asfalt bağlayıcıya göre biraz düşük bulunduğu, viskozite ve sünme rijitliği (S) değerlerinin ise yüksek bulunduğu görülmektedir. Deney sonuçlarından %6 bor katkılı modifiye asfalt bağlayıcının hemen hemen %4 SBS katkılı modifiye asfalt bağlayıcının göstermiş olduğu performans özelliklerine yakın sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak karıştırma koşullarının farklı olduğu unutulmamalıdır.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bor içerikli katkı maddesinin asfalt kaplamalarda kullanımının araştırıldığı bu çalışmada, laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenen orijinal nitelikteki bor içerikli katkı maddesiyle modifiye edilmiş asfalt bağlayıcılar ile sıcak asfalt karışımların performansları, esas asfalt bağlayıcıya göre kıyaslanmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Katkı maddesinin yapısal analizi; FT-IR, <sup>1</sup>H-NMR ve TG analiz yöntemleri kullanılarak tamamıyla ortaya konmuştur. Elde edilen spektral veriler, bor içerikli katkının başarıyla sentezlendiğini göstermiştir.
- FT-IR sonuçlarından, orijinal asfaltın C-H gerilme bantları 2920 cm<sup>-1</sup> ve 2851 cm<sup>-1</sup> gözlenirken, hidrokarbon yapısına ait CH<sub>3</sub> ve CH<sub>2</sub> deformasyon piklerinin ise ~1455–1376 cm<sup>-1</sup> aralığında ortaya çıktığı gözlenmektedir. Katkının asfalta ilavesiyle bahsedilen bu bantlarda çok belirleyici veriler gözlenmemesine karşın orijinal asfaltta ortaya çıkan hidrokarbon gerilim frekanslarının pik yüksekliklerinin, orantısız olarak modifiye asfaltta azaldığı gözlenmektedir. Bu değerlendirmelerden, asfaltın hidrokarbon zinciri ile katkının yapısında bulunan karbon zincirleri arasında elektrostatik bir etkileşim olduğu söylenebilir.
- SEM sonuçlarından, %1, %2, %4 ve %6 oranlarında orijinal asfalta ilave edilen bor içerikli katkının, her bir oran dâhilinde asfalta net bir şekilde tutunduğu, katkı/asfalt matrisi arasında her hangi bir faz ayrımı olmadığı ve katkının asfalt içerisinde homojen dağıldığı, buna bağlı olarak asfalt modifikasyonu için belirlenen karıştırma şartlarının (150°C, 1000 rpm ve 15 dk) uygun olduğu tespit edilmiştir.
- TG/DTG sonuçlarından, katkının asfalt bağlayıcıya ilavesi ile hem katkının hem de asfaltın bozunma eğrilerinde daha yüksek sıcaklıklara kayan bir eğrinin gözlenmesi, katkı ile asfalt arasındaki elektrostatik çekimlerin etkisi ile tam bir uyum gösterdiği ve buna bağlı olarak katkı artışıyla paralel biçimde %1 katkı içeriğinden %6 içeriğine kadar asfaltın stabilitesinin arttığı gözlenmektedir.
- FT-IR, SEM ve TG/DTG sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, katkı ile asfalt arasında kimyasal bağdan ziyade asfaltın hidrokarbon zinciri ile katkının karbon zinciri arasında kuvvetli bir elektrostatik çekimin olduğu ve söz konusu deney

sonuçlarının da birbirlerini bu manada destekledikleri elde edilen verilerden net bir biçimde anlaşılmaktadır.

- Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri dikkate alındığında katkı oranının artışına bağlı olarak penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı belirlenmiştir. Böylece katkı maddesi orijinal asfalt bağlayıcının sertliğini ve kıvamlılığını artırarak, sıcaklık hassasiyetini azaltmıştır. Bu azalış %6 katkı içeriğinde %9.2 oranında olmuştur.
- Düktilite deney sonuçlarına göre modifiye asfalt bağlayıcıların düktilite değerleri, orijinal asfalt bağlayıcıya göre herhangi bir değişiklik göstermeyerek, esas bağlayıcının kohezyon özelliğini olumsuz yönde etkilememiştir.
- Parlama noktası deney sonuçlarına göre katkı içeriğinin artışına bağlı olarak, orijinal asfaltın parlama noktası değerinin arttığı ve bu artışın %6 katkı içeriğinde %6.05 oranında olduğu tespit edilmiştir. Bu durum özellikle iş güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir.
- Orijinal asfalt bağlayıcı içerisindeki katkı oranı artışıyla özgül ağırlık değeri artış göstermiştir. Özgül ağırlık değerindeki bu artış, orijinal asfaltın içerdiği katkı oranına bağlı olarak kıvamının yani yoğunluğunun arttığını göstermekte ve elde edilen sonuçlar ile penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerindeki değişimler bağdaşmaktadır.
- Modifiye asfalt bağlayıcılar trikloretilende çözüldüklerinde, filtre kâğıdının üzerinde herhangi bir kalıntıya rastlanmamıştır. Katkı ile asfaltın birbirleriyle koordine olduğu ve bu sonuçların FT-IR, SEM ve TG/DTG deney sonuçlarıyla da paralellik gösterdiği tespit edilmiştir.
- Fraass kırılma noktası deney sonuçlarından, katkı maddesinin orijinal asfaltın düşük sıcaklıklardaki çatlama özelliğini iyileştirdiği ve kırılma sıcaklığının %6 katkı içeriğinde %70 oranında düştüğü belirlenmiştir.
- Nicholson soyulma deneyi sonuçlarından, katkı maddesinin soyulmayı önleyen önemli bir etki sağladığı ve esas bağlayıcının agrega ile arasındaki adeziv bağı güçlendirdiği ve %6 katkı içeriğinde soyulma direncinin %111.1 oranında arttığı belirlenmiştir.
- DSR deney sonuçlarından, katkı maddesinin asfaltın elastik özelliğini iyileştirerek yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi dayanımını önemli düzeyde arttırdığı, özellikle %6 katkı içeriğinde orijinal asfaltın performans seviyesini

PG 64-Y mertebesinden bir üst merteye olan PG 70-Y seviyesine taşıdığı ve RTFOT sonrası yapılan DSR deneyi sonucunda da istenilen şartname limit değerini (minimum 2200 Pa) 70°C’de sağlayarak PG 70-Y performans seviyesini her iki durumda da (yaşlanmadan önce ve sonra) sağlamış olduğu tespit edilmiştir.

- RTFOT deney sonuçlarından, orijinal asfalt bağlayıcı içerisindeki katkı oranı artışıyla kütle kayıplarında artış olduğu görülmüştür. Aslında kütle kayıplarındaki bu artışlar katkı oranına bağlı olarak yaşlanmanın hızlanmasından kaynaklanmamaktadır. Kütle kayıplarındaki artış nedeni, katkının asfalta katılmadan önce ortam sıcaklığında yüksek nem çekici (yüksek hidrat suyu bağlama) özelliğe sahip olmasından ileri gelmektedir. Katkı asfalta katıldıktan sonra havadan nem çekme özelliğini yitirmekte ve kütle kayıplarındaki bu artışlara, aslında katkının içerisinde bulunan hidrat suyunun kaybı neden olmaktadır. Oysaki yumuşama noktası sıcaklık farkları (yaşlandırma öncesi ve sonrası) artan katkı oranıyla azalmış ve düktilite değerleri de yaşlandırmadan önceki duruma göre herhangi bir değişiklik göstermemiştir. Bütün bu sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde katkı maddesinin orijinal asfaltın yaşlanma özelliğini iyileştirdiği sonucunu ortaya koymaktadır.
- RV deney sonuçlarından, katkı maddesinin orijinal asfaltın viskozite değerini artırdığı, katkı oranı arttıkça viskozite değerinin de arttığı, bu artışın viskozite deneyinin yapıldığı bütün deney sıcaklıklarında ortaya çıktığı, viskozitedeki bu artışa rağmen katkı miktarının asfaltın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemediği görülmüştür.
- PAV deneyi sonrası elde edilen bağlayıcılara 22°C, 25°C ve 28°C sıcaklıklarda yapılan DSR deney sonuçlarından, şartname sınır şartı %6 katkı içeriğinde 25°C sıcaklıkta sağlanırken diğer bağlayıcılarda ise 28°C sıcaklıkta sağlanmıştır. Katkı oranı artışıyla  $G^* \cdot \sin \delta$  parametre değerlerinde deneyin yapıldığı bu üç sıcaklıkta orijinal asfalt bağlayıcıya göre azalmalar olmuştur. Bu bağlamda, katkı maddesi orijinal asfaltın yorulma direncine katkı sağlamış ve yaşlanma ömrünü uzatmıştır.
- Hem RTFOT hem de PAV deney sonuçları birbirleriyle örtüşerek katkı maddesinin, asfaltın yaşlanmaya karşı direncini artırdığı sonucunu doğrulamıştır.
- BBR deney sonuçlarına göre katkı maddesi, orijinal asfaltın düşük sıcaklıklardaki çatlama eğilimini azaltarak direnç kazandırmıştır. En fazla etkinin %6 katkı

içeriğinde görülmesine karşın %1 gibi düşük katkı içeriğinde bile orijinal bağlayıcının bu özelliği iyileşmiştir. Ayrıca, yaşlanmamış bağlayıcılara uygulanan Fraass kırılma noktası deneyi ile BBR deney sonuçları birbiriyle kıyaslandığında sonuçların birbirini destekler nitelikte olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü katkının, orijinal asfalt bağlayıcının düşük sıcaklıklarda kırılma özelliğini iyileştirdiği, söz konusu iyileşmenin katkı oranına bağlı olarak arttığı ve %6 katkı içeriği ile modifiye edilen asfalt bağlayıcının diğer oranlara göre daha etkili olduğu deney sonuçlarından elde edilmiştir.

- Marshall stabilite deney sonuçlarına göre, sıcak asfalt karışımların stabilite değeri katkı oranına bağlı olarak artarken, akma değeri ise azalmıştır. Tekerlek izi dayanımını karakterize eden Marshall oranı değerlerinde ise %6 katkı içeriğinin, karışımın tekerlek izi dayanımını %17.34 artırdığı belirlenmiştir. Katkı maddesinin orijinal asfaltın tekerlek izi dayanımını artırıcı özelliği hem Marshall stabilite hem de DSR deney sonuçları ile bağdaşmaktadır.
- Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları incelendiğinde katkı miktarının artışıyla karışımların mukavemet değerlerinde artışlar görülmüştür. Bu artışlar, %1 katkı içeriğinde %1.30 oranında olurken, %6 katkı içeriğinde %9.23 oranında olmuştur. Katkı maddesi, asfaltın düşük sıcaklıklarda ve trafik yükleri altında oluşan çekme gerilmelerine karşı direncini artırmıştır.
- Dolaylı çekme deney sonuçlarından, 5°C sıcaklıktaki orijinal asfalt ile yapılan karışımların esneklik modülü değerleri, diğer modifiye asfalt karışımlara nazaran yüksek çıkmış ve en düşük değerler %6 katkı içeriğiyle yapılan karışımlarda görülmüştür. Düşük sıcaklıkta, orijinal asfalt ile yapılan karışımlarda görülen bu yüksek esneklik modülü değerleri dikkate alındığında oluşması muhtemel çatlaklara karşı nispeten daha az dirençli oldukları söylenebilir. 25°C ve 40°C sıcaklıklarda ise katkı oranı artışına bağlı olarak karışımların esneklik modülü değerleri yüksek çıkmıştır. Esneklik modülü değerlerinin orta ve yüksek sıcaklıklardaki bu artışı orijinal asfalt bağlayıcının katkı ile birlikte kalıcı deformasyonlara karşı direncinin ve yük dağıtma kabiliyetinin artmasından ileri gelmiştir. Ayrıca, AAMAS tarafından hazırlanan nomografa göre bütün karışımların esneklik modülü değerleri, deneyin yapıldığı sıcaklıklarda sınır şartları içerisinde kalmıştır.



- Koşullandırıldıktan sonra tekrar 25°C sıcaklıkta, dolaylı çekme deneyine tabi tutulan karışımların, su hasarından kaynaklı esneklik modülü kayıplarının katkı içeriğiyle orantılı olarak azaldığı tespit edilmiştir. Katkı maddesinin, asfaltın agregaya yapışma (adezyon) özelliğini ve su hasarına karşı direncini çok önemli düzeyde artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen bu sonuçların Nicholson soyulma deneyinden elde edilen sonuçlarla bağdaştığı tespit edilmiştir.
- Statik sünme deneyinde, yük uygulamasının ardından karışımlarda ani bir deformasyon artışı meydana gelmekte ve belirli bir süre sonra bu artış yavaşlamaktadır. Bu ani deformasyon artışları karışımlardaki katkı içeriği artıkça azalmıştır. Dolayısıyla katkı ile karışımlarda oluşması muhtemel tekerlek izi riski azalmış ve en iyi etki %6 katkı içeriğine sahip karışımda %56.55 oranında gözlenmiştir.
- Dinamik sünme deneyinden, karışımlarda görülen deformasyonların 2000 yük tekrarına kadar hızlı bir biçimde arttığı ve bu yük tekrarından sonra ise azaldığı belirlenmiştir. Karışımlarda oluşan bu ani deformasyon artışlarının konsolidasyondan kaynaklı sıkışmadan dolayı olduğu ancak karışımlardaki katkı içeriği artıkça meydana gelen deformasyonların azaldığı ve katkının karışımların kalıcı deformasyonlara karşı direncini artırıcı özellik gösterdiği tespit edilmiştir.
- İndirekt çekme yorulma deney sonuçlarından, katkı kullanımı ile karışımların kırılması için gerekli yük tekrar sayısının arttığı ve yorulma ömürlerinin önemli düzeyde direnç kazandığı, bu direncin %6 katkı içeriğinde %154.26 gibi yüksek oranında iyileşme sağlandığı ayrıca tekrarlı yük uygulamasının hemen ardından oluşan ani deformasyon artışlarının ise önemli düzeyde azaldığı tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler bir bütün olarak değerlendirildiğinde elde edilen sonuçların birbirlerini destekler nitelikte olduğu, katkının orijinal asfaltın özetle; kıvamını, tekerlek izi ve yaşlanma direncini, esneklik ve adezyon özelliğini, yük yayma kabiliyetini ve yorulma ömrünü artırdığı, sıcaklık hassasiyetini ve düşük sıcaklıklardaki çatlama eğilimini azalttığı tespit edilmiştir. Bu etkilerin %6 katkı içeriğinde en fazla görülmesine karşın %1 gibi düşük katkı içeriğinde de azımsanmayacak iyileşmelerin görüldüğü net bir biçimde ifade edilebilir. Ayrıca deneylerden elde edilen veriler üzerinde yapılan istatistiksel analiz sonuçlarından, %6 katkı içeriğinin diğer katkı oranlarına göre daha anlamlı sonuçlar ortaya koyduğu anlaşılmıştır.

Bu tez çalışması esas alınarak, ileride yapılması düşünülen araştırmalarda aşağıda sıralanan öneriler dikkate alınabilir:

- Çalışmada kullanılan bor içerikli katkı maddesi farklı kimyasal yapı eklentileriyle güçlendirilebilir ve asfalt bağlayıcı üzerindeki etkileri yeniden araştırılabilir.
- Çalışmada tek bir agrega türü ve gradasyonu kullanılarak yapılan karışım deneyleri ve elde edilen performans sonuçları, farklı kökenli agregalar ve gradasyonlar kullanılarak tekrar araştırılabilir.
- Katkı maddesinin kullanılan bağlayıcının sertliğini artırması sebebiyle daha yumuşak bağlayıcılar üzerindeki etkisi araştırılabilir.



## 5. KAYNAKLAR

1. Ahmedzade, P., Alataş, T. ve Geçkil, T., Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı, İMO Teknik Dergi, 297 (2008) 4493-4507.
2. Ahmedzade, P., Alataş, T. ve Geçkil, T., The Effect of Carbon Black on the Mechanical Properties of Asphalt Mixtures, Sigma, 25, 2 (2007)179-189.
3. Brule, B., Brion., Y. ve Tanguy, A., Paving Asphalt Polymer Blends Relationship Between Composition, Structure and Properties, Association of Asphalt Paving Technologists 1988, 41-64.
4. Jain, P. K., Sangita, S. B. ve Arya, I. R., in Polymer Modified Asphalt Binders, ASTM STP 1 108, Wardlaw K. R. and s. Shuler, eds., American Society of Testing Materials, Philadelphia, 1992.
5. Tunç., A., Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2004.
6. Qunshan Y., Shaopeng, W. ve Ning, L., Investigation of the Dynamic and Fatigue Properties of Fiber-Modified Asphalt Mixtures, International Journal of Fatigue, 31 (2009) 1598–1602.
7. Ahmetzade, P., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M., Polyester Reçinenin Bitümlü Bağlayıcıların Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesi Üzerindeki Etkisi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24, 1-2 (2008) 227-240.
8. Airey, G. D., Rheological Evaluation of Ethylene Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens, Construction and Building Materials, 16 (2002) 473-487.
9. Ait-Kadi, A., Brahimi, B. ve Bousmina, B., Polymer Blends for Enhanced Asphalt Binders, Polymer Engineering and Science, 36, 12 (1996) 1724-1733.
10. Yildirim Y., Polymer Modified Asphalt Binders, Construction and Building Materials, 21 (2007) 66-72.
11. Zhang, J., Wang, J., Wu, Y., Wang, Y. ve Wang, Y., Evaluation of the Improved Properties of SBR/Weathered Coal Modified Bitumen Containing Carbon Black, Construction and Building Materials, 23 (2009) 2678-2687.
12. Chebil, S., Chaala, A. ve Roy, C., Use of Softwood Bark Charcoal as a Modifier for Road Bitumen, Fuel, 79 (2000) 671-683.
13. Ning, L., Shaopeng, W. ve Conghui, L., Investigation of Static and Dynamic Response of Graphite and Carbon Fiber Modified Conductive Asphalt-Based Composite, Advances in Fracture and Damage Mechanics VII, September 2008, Seoul-South Korea, 469-472.

14. Kim, H., Sokolov, K., Poulikakos, L. D. ve Partl, M. N., Fatigue Evaluation of Porous Asphalt Composites with Carbon Fiber Reinforcement Polymer Grids, Transportation Research Record, 2116 (2009) 108-117.
15. Çubuk, M., Gürü, M. ve Çubuk, M. K., Improvement of Bitumen Performance With Epoxy Resin, Fuel, 88 (2009) 1324-1328.
16. Huang, Y., Bird, R. N. ve Heidrich, O., A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements, Resources Conservation and Recycling, 52 (2007) 58-73.
17. Sengoz, B. ve Topal, A., Use of Asphalt Roofing Shingle Waste in HMA, Construction and Building Materials, 19 (2005) 337-346.
18. Bardesi A, et al., Use of Modified Bituminous Binders Special Bitumens and Bitumens with Additives in Pavement Applications, Technical Committee Flexible Roads (C8), World Road Association, 1999.
19. Diehl C.F., Ethylene–Styrene Interpolymers for Bitumen Modification, Second Eurasphalt Eurobitume Congress, 2000, Barcelona, 93–102.
20. Isacson U. ve Lu X., Characterization of Bitumens Modified with SEBS, EVA and EBA Polymers, Journal of Materials Science, 34 (1999) 3737 – 3745.
21. Panda, M. ve Mazumdar, M., Engineering Properties of Eva Modified Bitumen Binder for Paving Mixes, Journal of Materials in Civil Engineering, 11 (1999) 131-137.
22. Chen, J. S., Liao, M. C. ve Shiah, M. S., Asphalt Modified by Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model, Journal of Materials in Civil Engineering, 14 (2002) 224-229.
23. Airey, D. G., Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens, Fuel, 82 (2003) 1709-1719.
24. Garcia-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martinez-Boza, F. ve Gallegos, C., Linear Viscoelasticity of Recycled EVA-Modified Bitumens, Energy and Fuels, 18 (2004) 357-364.
25. Cortizo, S. M., Larsen, O. D., Bianchetto, H. ve Alessandrini, L. J., Effect of The Thermal Degradation of SBS Copolymers During The Ageing of Modified Asphalts, Polymer Degradation and Stability, 86 (2004) 275-282.
26. Pe´rez-Lepe, A., Marti´nez-Boza, F. J. ve Gallegos, C., Influence of Polymer Concentration on The Microstructure and Rheological Properties of High-Density Polyethylene (HDPE)-Modified Bitumen, Energy and Fuels, 19 (2005) 1148-1152.
27. Chen, J. S. ve Huang, C.C., Fundamental Characterization of SBS-Modified Asphalt Mixed with Sulfur, Journal of Applied Polymer Science, 103 (2007) 2817-2825.

28. Tayfur, S., Özen, H. ve Aksoy, A., Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer Modifiers, Construction and Building Materials, 21 (2007) 328–337.
29. Ahmedzade, P., Tigdemir, M. ve Kalyoncuoğlu, S. F., Laboratory Investigation of The Properties of Asphalt Concrete Mixtures Modified With TOP-SBS, Construction and Building Materials, 21 (2007) 626–633.
30. Ahmedzade, P. ve Yılmaz, M., Effect of Polyester Resin Additive on The Properties of Asphalt Binders and Mixtures, Construction and Building Materials, 22 (2008) 481-486.
31. Görkem, Ç. ve 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 (2009) 2227-2236.
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 (2009) 2701-2708.
33. Şengöz, B., Topal, A. ve Işıkyakar, G., Morphology and Image Analysis of Polymer Modified Bitumens, Construction and Building Materials, 23 (2009) 1986–1992.
34. Al-Hadidy, A. I. ve Yi-qiu, T., Mechanistic Approach for Polypropylene-Modified Flexible Pavements, Materials and Design, 30 (2009) 1133-1140.
35. Yeh, P., Nien, Y., Chen, W. ve Liu, W., Evaluation of Thermal and Viscoelastic Properties of Asphalt Binders by Compounding with Polymer Modifiers, Polymer Composites, 31, 10 (2010) 1738-1744.
36. Dessouky, S., Reyes, C., Ilias, M., Contreras, D. ve Papagiannakis, A. T., Effect of Pre-heating Duration and Temperature Conditioning on the Rheological Properties of Bitumen, Construction and Building Materials, 25 (2011) 2785–2792.
37. Al-Khateeb, G. G. ve Al-Akhras, N. M., Properties of Portland Cement-Modified Asphalt Binder Using Superpave Tests, Construction and Building Materials, 25 (2011) 926-932.
38. Luo, W. ve Chen, J., Preparation and Properties of Bitumen Modified by EVA Graft Copolymer, Construction and Building Materials, 25 (2011) 1830-1835.
39. Jamshidi, A., Hamzah, M. O. ve Aman, M. Y., Effect of Sasobit Content on the Rheological Characteristics of Unaged and Aged Asphalt Binders at High and Intermediate Temperatures, Materials Research, 15, 4 (2012) 628-638.
40. Das, K. P., Taşdemir, Y. ve Birgisson, B., Low Temperature Cracking Performance of WMA With The Use of The Superpave Indirect Tensile Test, Construction and Building Materials, 30 (2012) 643-649.

41. Şengül, E. C., Oruç, Ş., İskender, E. ve Aksoy, A., Evaluation of SBS Modified Stone Mastic Asphalt Pavement Performance, Construction and Building Materials, 41 (2013) 777–783.
42. Feng Z., Yu, J., Xue, L. ve Sun Y., Rheological and Aging Properties of Ultraviolet Absorber/Styrene–Butadiene–Styrene–Modified Bitumens, Journal of Applied Polymer Science, 128 (2013) 2571–2577.
43. Singh M., Kumar P. ve Maurya M.R., Strength Characteristics of Sbs Modified Asphalt Mixes With Various Aggregates, Construction and Building Materials, 41 (2013) 815–823.
44. Ameri, M., Mansourian, A. ve Sheikhmotevali, H. A., Laboratory Evaluation of Ethylene Vinyl Acetate Modified Bitumens and Mixtures Based upon Performance Related Parameters, Construction and Building Materials, 40 (2013) 438–447.
45. Ghuzlan, K., Al-Khateeb, G. ve Abu-Damrah, A., Using Oil Shale Ash Waste As A Modifier for Asphalt Binders, Journal of Material Cycles and Waste Management, 15 (2013) 522-529.
46. Puello, J., Afanasjeva, N. ve Alvarez, M., Thermal Properties and Chemical Composition of Bituminous Materials Exposed to Accelerated Aging, Road Materials and Pavement Design, 14, 2 (2013) 278-288.
47. Kök, B. V., Yılmaz, M. ve Kuloğlu, N., Asfaltitin Bitüm ve Bitümlü Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi, İMO Teknik Dergi, 371 (2012) 5831-5826.
48. Xiao, F., Amir Khanian, S., Wang, H. ve Hao, P., Rheological Property Investigations for Polymer and Polyphosphoric Acid Modified Asphalt Binders at High Temperatures, Construction and Building Materials, 64 (2014) 316-323.
49. Bostancıoğlu, M. ve Oruç, Ş., Effect of Furfural-Derived Thermoset Furan Resin on the High-Temperature Performance of Bitumen, Road Materials and Pavement Design, 16, 1 (2015) 227-237.
50. Miró, R., Martínez, A. H., Moreno-Navarro, F. ve Rubio-Gámez, M. del C., Effect of Ageing And Temperature on The Fatigue Behaviour of Bitumens, Materials and Design, 86 (2015) 129–137.
51. Liang, M., Liang, P., Fan W., Qian C., Xin X., Shi J. ve Nan, G., Thermo-Rheological Behavior And Compatibility of Modified Asphalt With Various Styrene–Butadiene Structures in SBS Copolymers, Materials and Design, 88 (2015) 177–185.
52. Li, R., Pei, J. ve Sun, C., Effect of Nano-ZnO With Modified Surface on Properties of Bitumen, Construction and Building Materials, 98 (2015) 656–661.

53. Karakas, A. S., Kuloğlu, N., Kök, B. V. ve Yılmaz, M., The Evaluation of The Field Performance of The Neat And SBS Modified Hot Mixture Asphalt, Construction and Building Materials, 98 (2015) 678–684.
54. Shafabakhsh, G.H. ve Jafari Ani, O., Experimental Investigation of Effect of Nano TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Modified Bitumen on The Rutting And Fatigue Performance of Asphalt Mixtures Containing Steel Slag Aggregates, Construction and Building Materials, 98 (2015) 692–702.
55. Lentz, Alfred P., Asphaltic Compound, United States Patent Office, Patent No: 2375117, 1945.
56. Doyle, P. C., River, R., Hook E. O., Falls, C. ve Hardman, H. F., Asphaltic Cement, United States Patent Office, Patent No: 3094427, 1963.
57. Boykin R. O., Glendale, S. ve Osborne, P. S., Neutron Absorbing Asphaltic Composition, United States Patent Office, Patent No: 3152093, 1964.
58. Marzocchi A., Roberts, G. M. ve Bolen, C. E., Boron Modified Asphalts, United States Patent Office, Patent No: 4360473, 1982.
59. Arslan, D., Gürü, M. ve Çubuk, M. K. Performance Assessment of Organic-Based Synthetic Calcium And Boric Acid Modified Bitumens, Fuel, 102 (2012) 766-772.
60. Oruç, Ş., Yılmaz, B. ve Sancak, K., Effect of Boron-Containing Additives on Rheological Properties of Asphalt Binder, Road Materials and Pavement Design, (2015), Doi: 0.1080/14680629.2015.1120228
61. Arslan, D., Gürü, M. ve Çubuk, M. K., Preventing of Rutting and Crakings in The Bituminous Mixtures by Monoethylene and Diethylene Glycol Based Synthetic Polyboron Compounds, Construction and Building Materials, 50 (2014) 102-107.
62. Oruç, Ş., Yılmaz, B. ve Bostancıoğlu, M., Borik Asitin Asfaltın Fiziksel Özelliklerine Etkisi, 6. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Kasım 2013, Ankara, 297-306.
63. Collins, J.H., Bouldin, M. G., Gelles, R. ve Berker, A., Improved Performance of Paving Asphalts by Polymer Modification, Association of Asphalt Paving Technologists, 60 (1991) 43-79.
64. Vonk, W. C. ve van Gooswilligen, G., Shell Laboratorium: Amsterdam, 8, 1, 1991.
65. Aglan, H., Polymeric Additives and Their Role in Asphaltic Pavements. Part1: Effect of Additive Type on The Fracture and Fatigue Behavior, Journal of Elastomers and Plastics, 25, 4 (1993) 307-321.
66. Branz, D., Lopes, T. R. ve da-Motta, M. G. L., Computed Tomography: An Evaluation of The Effect of Adding Polymer SBS to Asphaltic Mixtures Used in Paving, Applied Radiation and Isotopes, 53 (2000) 725-729.

67. Weizhen, S., Peng, Y., Kaifu, H., Kejian, L., Daosheng, L., Feng, Y. ve Yi, W., The Study of Producing SBS Modified Asphalt by Using Liaoshu High Viscous Crude Oil, Petroleum Science and Technology, 19, 9-10 (2001) 1187–1196.
68. Huseyin, A. I., Iqbal, H. M. ve Al-Abdul-Wahhab, I. H., Influence of Mw of LDPE and Vinyl Acetate Content of EVA on The Rheology of Polymer Modified Asphalt, Rheologica Acta, 45 (2005) 92–104.
69. Lu, X. ve Isacsson, U., Artificial Aging of Polymer Modified Bitumens, Journal of Applied Polymer Science, 76, 12 (2000) 1811-1824.
70. Lu, X. ve Isacsson, U., Laboratory Study on The Low Temperature Physical Hardening of Conventional and Polymer Modified Bitumens, Construction and Building Materials, 14 (2000) 79-88.
71. Garcia-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martinez-Boza, F., Gallegos, C., Gonzales, N., Gonzalez, O. ve Munoz, M. E., Viscous Properties and Microstructure of Recycled EVA Modified Bitumen, Fuel, 83 (2004) 31–38.
72. Zhang, F. ve Yu, J., The Research For High-Performance SBR Compound Modified Asphalt, Construction and Building Materials, 24, 3 (2010) 410-418.
73. Ho, S., Church, R., Klassen, K., Law, B., MacLeod, D. ve Zanzotto, L., Study of Recycled Polyethylene Materials as Asphalt Modifiers, Canadian Journal of Civil Engineering, 33, 8 (2006) 968-981.
74. Othman, A. M., Effect of Low-Density Polyethylene on Fracture Toughness of Asphalt Concrete Mixtures, Journal of Materials in Civil Engineering, 22, 10 (2010) 1019-1024.
75. Newman, J. K. J., Dynamic Shear Rheological Properties of Polymer-Modified Asphalt Binder, Journal of Elastomers and Plastics, 30 (1998) 245-263.
76. Fawcett, A. H., McNally, T., McNally, G. M., Andrews, F. ve Clarke, J., Blends of Bitumen with Polyethylenes, Polymer, 40, 23 (1999) 6337-6349.
77. Perez-Lepe, A., Martinez-Boza, F., Gallegos, C., Gonzalez, O., Pena, J. J., Munoz, M. E. ve Santamaria, A., Influence of the Processing Conditions on the Rheological Behaviour of Polymer-Modified Bitumen, Fuel, 82 (2003) 1339-1348.
78. Perez-Lepe, A., Martinez-Boza, F. J., Attane, P. ve Gallegos, C., Destabilization Mechanism of Polyethylene-Modified Bitumen, Journal of Applied Polymer Science, 100 (2006) 260–267.
79. Chen, H. ve Xu, Q., Experimental Study of Fibers in Stabilizing and Reinforcing Asphalt Binder, Fuel, 89, 7 (2010) 1616-1622.



80. Sustersic, E., Tusar, M. ve Zupancic Valant, A., Rheological and Mechanical Characterization of Waste Pmma/Ath Modified Bitumen, Construction and Building Materials, 38 (2013) 119–125.
81. Raad, L., Saboundjian, S., ve Minassian, G., Field Aging Effects on Fatigue of Asphalt Concrete and Asphalt-Rubber Concrete, Transportation Research Record, No. 1767, Transportation Research Board, 2001, Washington, 126-134.
82. Soon, J.L., Akisetty, C. ve Amir Khanian, S.N., The Effect of Crumb Rubber Modifier (CRM) on The Performance Properties of Rubberized Binders in HMA Pavements, Construction and Building Materials, 22 (2008) 1368–1376.
83. Daryl, M., Susanna, H., Ryan, W. ve Ludo, Z., Study of Crumb Rubber Materials as Paving Asphalt Modifiers, Canadian Journal of Civil Engineering, 34 (2007) 1276–1288.
84. Gonzalez, V., Martinez-Boza, F., Navarro, F., Gallegos, C., Perez-Lepe, A. ve Paez, A., Thermomechanical Properties of Bitumen Modified with Crumb Tire Rubber and Polymeric Additives, Fuel Processing Technology, 91(2010) 1033–1039.
85. Moreno, F., Sol, M., Martin, J., Perez, M. ve Rubio, M. C., The Effect of Crumb Rubber Modifier on The Resistance of Asphalt Mixes to Plastic Deformation, Materials and Design, 47 (2013) 274–280.
86. Rasoulzadeh, Y., Mortazavi, S., Yousefi, A. ve Khavanin, A., Decreasing Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emission from Bitumen Using Alternative Bitumen Production Process, Journal of Hazardous Materials, 185 (2011) 1156–1161.
87. Cong, P., Chen, S. ve Yu, J., Investigation of The Properties of Epoxy Resin Modified Asphalt Mixtures for Application to Orthotropic Bridge Decks, Journal of Applied Polymer Science, 121 (2011) 2310–2316.
88. Morrison, G. R. ve Hesp, S. A. M., A New Look at Rubber-Modified Asphalt, Journal of Materials Science, 30, 10 (1995) 2584-2590.
89. AASHTO, Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling And Testing, 30th ed., Washington, DC, 2010.
90. Braid, M., Borate Esters and Lubricant Composition Containing Such Esters, United States Patent Office, Patent No: 4547302, 1985.
91. Yao, J. B. ve Dong, J. X., The Hydrolytic Stability Borate Used as Oil Additives, Lubrication Science, 7 (1995) 379-385.
92. Yao, J. B., Wang, Q. L., Chen, S. Q., Sun, J. Z. ve Dong, J. X., Borate Esters Used as Lubricant Additives, Lubrication Science, 14 (2002) 415-423.

93. Li, W., Wu, Y., Wang, X. ve Liu, W., Tribological Study of Boron-Containing Soybean Lecithin as Environmentally Friendly Lubricant Additive in Synthetic Base Fluids, Tribology Letters, 47 (2012) 381-388.
94. Papay, G. ve O'Brien, P. J., Lubricating Oil Composition Containing Boronated N-hydroxymethyl Succinimide Friction Reducers, United States Patent Office, Patent No: 4295983, 1981.
95. Yao, J. B., Antiwear Function and Mechanism of Borate Containing Nitrogen, Tribology International, 30 (1997) 387-389.
96. He, Z., Rao, W., Ren, T., Liu, W. ve Xue, Q., The Tribochemical Study of Some N-Containing Heterocyclic Compounds as Lubricating Oil Additives, Tribology Letters, 13, 2 (2002) 87-93.
97. Fi, X., Chen, Y., Wang, X. ve Liu, W., Tribological Behaviors of Novel Tri(hydroxymethyl) Propone Esters Containing Boron and Nitrogen as Lubricant Additives in Rapeseed Oil, Industrial Lubrication and Tribology, 64, 6 (2012) 315-320.
98. Ren, T., Xue, Q. ve Wang, H., A Study of The Tribological Properties of S-(1H-benzotriazole-yl) methyl-O, O dialkyldithio-phosphates as Additives in Liquid Paraffin, Wear, 173 (1994) 167-170.
99. Ren, T., Xue, Q. ve Wang, H., The Tribological Properties of S-(1H-Benzotriazole-yl) methyl alkyl Xanthates as Additives in Synthetic Lubricants, Lubrication Engineering, 51 (1995) 847-850.
100. Li, J., Zhang, Y., Ren, T., Liu, W. ve Fu, X., Tribological Evaluation of S-(1H-benzotriazole-1-yl) methyl N, N-dialkyldithiocarbamates as Additives in Rapeseed Oil, Wear, 253 (2002) 720-724.
101. He, Z., Lu, J., Zeng, X., Shao, H., Ren, T. ve Liu, W., Study of The Tribological Behaviors of S, P Containing Triazine Derivatives as Additives in Rapeseed Oil, Wear, 257 (2004) 389-394.
102. Singh, T., Bhattacharya, A. ve Verma, V. K., Activity Assessment of Certain Nitrogen and Sulphur Heterocyclic Compounds as Potential Additives in Four Ball Test, Lubrication Engineering, 46 (1989) 681-685.
103. Singh, T., Singh, R., Verma, V. K. ve Nakayama, K., A Study of N, O and S Heterocyclic Compounds as Extreme Pressure Lubricant Additives, Tribology International, 23 (1990) 41-46.
104. Singh, T. ve Chandrasekharan, C. V., The Effect of Nitrogen and Sulphur Compounds as Extreme Pressure Lubrication, Tribology International, 26 (1993) 245-250.

105. Wan, Y., Pu, Q., Xue Q. ve Su, Z., Antiwear and Extreme Pressure Characteristics of 2-Mercaptobenzothiazole Derivatives as The Potential Lubricating Oil Additive, Wear, 192 (1996) 74-77.
106. Won, Y., Yao, W., Xe, X., Cao, L., Shen, G. ve Yue, Q., Tribological Performance and Action Mechanism of Certain S, N, Heterocyclic Compounds as Potential Lubricating Oil Additives, Wear, 210 (1997) 83-87.
107. Zheng, Z., Shen, G., Wan, Y., Cao, L., Xu, X., Yue, Q. ve Sun, T., Synthesis Hydrolytic Stability and Tribological Properties of Novel Borate Esters Containing Nitrogen as Lubricant Additives, Wear, 222 (1998) 135-144.
108. Zhang, J., Liu, W. ve Xue, Q., The Effect of Molecular Structure of Heterocyclic Compounds Containing N, O and S on Their Tribological Performance, Wear, 231 (1999) 87-93.
109. Zhu, F., Fon, W., Wang, A. ve Zhu, Y., Tribological Study of Novel S, N Style 1,3,4-thiodiazole-2-thione Derivatives in Rapeseed Oil, Wear, 266 (2009) 233-238.
110. Sun, B. Y., Hu, T. L. ve Xue, J. Q., Tribology Properties and Action Mechanism of N,N-dialkyl-dithio-carbamate Derived S-Hydroxyethyl Borate Esters as Additives in Rapeseed Oil, Wear, 266 (2009) 917-924.
111. Yang, G., Zhang, Z., Li, G., Zhang, J., Yu, L., Zhang, P., Synthesis and Tribological Properties of S- and P-Free Borate Esters with Different Chain Lengths, 133, 1-7, (2011).
112. Wang, D. C., Chang, G. W. ve Chen, Y., Preparation and Thermal Stability of Boron-Containing Phenolic Resin/Clay Nanocomposites, Polymer Degradation and Stability, 93, 1 (2008) 125-133.
113. Martin, C., Hunt, B. J., Ebdon, J. C., Ronda, J. C. ve Cadiz, V., Synthesis Crosslinking and Flame Retardance of Polymers of Boron-Containing Difunctional Styrenic Monomers, Reactive and Functional Polymers, 66, 10 (2006) 1047-1054.
114. Gao, J., Su, X. ve Xia, L., Synthesis and Structure Characterization of Boron-Nitrogen Containing Phenol Formaldehyde Resin, International Journal Polymer Materials, 54, 10 (2005) 949-961.
115. Gao, J., Liu, Y. ve Wang, F., Structure and Properties of Boron-Containing Bisphenol-A Formaldehyde Resin, European Polymer Journal, 37, 1 (2001) 207-210.
116. Martin, C., Ronda, J. C. ve Cadiz, V., Boron-Containing Novolac Resins as Flame Retardant Materials, Polymer Degradation and Stability, 91, 4 (2006) 747-754.
117. Uslu, I., Dastan, H., Altas, A., Yayli, A., Atakol, O. ve Aksu, M. L., Preparation and Characterization of PVA/Boron Polymer Produced by an Electrospinning Technique, e-polymers, 133, 1 (2007).

118. Geçkil, T., Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
119. Çubuk, M., Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
120. Doğan, M., Polimer Katkı Maddelerinin Bitüm Bazlı Kompozitlerin Fiziksel Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
121. Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K. ve Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, Asfalt ve Uygulamaları, İsfalt Bilimsel Yayın No:1, İstanbul, 2001.
122. Kett, I., Asphalt Materials and Mix Design Manual, Noyes Publications, New Jersey, USA, 1998.
123. Whiteoak, D., Shell Bitüm El Kitabı, Lav, A. H. ve Lav, A., İsfalt Bilimsel Yayın No:3, İstanbul, 2004.
124. Lavin, P. G., Asphalt Pavements, Spon Press, London and New York, 2003.
125. Umar, F. ve Ağar, E., Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 1991.
126. Balta, İ., Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2004.
127. Sybilski, D., Relationship Between Absolute Viscosity of Polymer Modified Bitumens And Rutting Resistance of Pavement, Material and Structures, 27 (1994) 110-120.
128. Bostancıoğlu, M., Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler İle Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2012.
129. Kizirgil, M. E., Stiren-Butadien-Stiren ve Uçucu Külün Birlikte Kullanılmasının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2013.
130. Arıkan Öztürk, E. ve Çubuk, M. K. Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19, 2 (2004) 175-184.
131. Avcı, E., Sıcak İklimli Bölgelerde Kullanılan Asfalt Betonu Karışım Değişkenlerinin Kaplama Tabakası Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2009.

132. Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013.
133. Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Geçkil, T., Superpave Sistemine Göre Uygulama Bölgesine Uygun Bağlayıcı Seçimi: Bingöl Örneği, Sigma, 25,4 (2008) 338-348.
134. Geçkil, T., Alataş, T. ve Ahmedzade, P., Superpave Sisteminde Bölge Meteorolojik Hava Verileri Kullanılarak Performans Dereceli (PG) Bağlayıcı Sınıfı Seçimi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 27, 1 (2011) 88-106.
135. TS 118, EN 1426, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
136. Oruç, Ş., Yoğun Granülometrili Emülsifiye Asfalt Betonunda Çimentonun Karışım Performansı Üzerindeki Etkisi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2002.
137. TS 120 EN 1427, Bitümler ve Bitümü Bağlayıcılar-Yumuşama Noktası Tayini-Halka ve Bilya Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
138. Sengoz, B. ve Isikyakar, G., Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen, Construction and Building Materials, 22 (2008) 1897-1905.
139. Hadavand, B.S., Bitumen Modification with Polysulphide Polymer Prepared from Heavy End Waste, Iranian Polymer Journal, 19, 5 (2010) 363-373.
140. TS EN 13398, Bitümlü Maddelerin Düktülite Deneyi İçin Metod, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2005.
141. Orhan, F., Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2005.
142. TS EN ISO 2592, Petrol Ürünleri-Parlama ve Yanma Noktası Tayini-Cleveland Açık Kap Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2006.
143. TS 1171, Parlama Noktası Tayini-Tag Kapalı Kap Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2006.
144. TS EN 12607–1, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini – Bölüm 1: RTFOT (Etüvde Hareket Halinde İnce Film Deneyi) Yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.
145. Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M., Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlandırılmasında Kullanılan Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23, 1-2 (2007) 112-126.
146. TS 1090 EN 12592, Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar-Çözünürlük Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

147. Orhan, F., Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 2012.
148. Türk Standardı TS EN 12593, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Fraass Kırılma Noktasının Tayini, Ankara, 2003.
149. Cominsky, R. J., Huber, G. A., Kennedy, T. W. ve Anderson, M., The Superpave Mix Design Manuel for New Construction and Overlays, SHRP-A-407, National Research Council, Washington, DC, 1994.
150. Zaniewski, J. P. ve Pumphrey, M. E., Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, West Virginia University, Morgantown, 2004.
151. Altaş, Ö.Y., Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
152. McGennis, R.B., Shuler, S. ve Bahia, H.U., Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington, KY, 1994.
153. Arslan, D., Esnek Üstyapıların Performans Özelliklerinin Sentetik Metal Ve Polibor Katkı Maddeleriyle Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
154. Yılmaz, M., Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2011.
155. Dinç, E., Performans Sınıfı Asfaltlar-Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyleri, Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü, Sivas, 1999.
156. Tunç, A., Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 2001.
157. Kennedy, T. W., Huber, G. A., Harrigan, E. T., Cominsky, R. J., Hughes, C. S., Quintus, H. V. ve Moulthrop, J. S., Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410, National Research, 1994.
158. Hattatoğlu, F., Bitümlü Sıcak Karışımlarda Farklı Sıkıştırma Karıştırma Ve Yaşlandırma Yöntemlerinin Karışımın Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2009.
159. Arıkan Öztürk, E. ve Çubuk, M. K., Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19, 2 (2004) 175-184.

160. Tunç, A., Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2007.
161. Oruç, Ş., Torul Kalker Taşocağı Agregalarının Asfalt Betonu İçerisindeki Performansının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1997.
162. Cüre, S., Otoyol Esnek Üstyapı İnşaatında Kalite Kontrolleri ve Kalite Yönetim Sisteminin Uygulanabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2005.
163. Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:2, İstanbul, 2002.
164. Önal, M. A., Kahramangil M., Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 1993.
165. Umar, F. ve Açar, E., Yol Üstyapısı, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1985.
166. Kandhal, P. S. ve Cooley, L. A., Evaluation of Permanent Deformation of Asphalt Mixtures Using Loaded Wheel Tester, NCAT Report 02-08, Auburn, USA, 2002.
167. Deniz, M. T., Esnek Üstyapı Kaplamalarında Bitümle Birlikte Bağlayıcı Olarak Granüler Sülfür Kullanımının Kalıcı Deformasyona Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
168. [www.pavemanpro.com/article/identifying\\_asphalt\\_pavement\\_defects/](http://www.pavemanpro.com/article/identifying_asphalt_pavement_defects/). 29 Ocak 2016.
169. Asfalt ve Uygulamaları, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:1, İstanbul, 2001.
170. Kuloğlu, N., Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler, Türkış Journal of Engineering and Environmental Sciences, 25 (2001) 61-67.
171. [www.roadscience.net/services/distress-guide](http://www.roadscience.net/services/distress-guide). 29 Ocak 2016.
172. [www.movea.com.tr/asfalt-bozulmalari-neden-olusur/](http://www.movea.com.tr/asfalt-bozulmalari-neden-olusur/). 30 Ocak 2016
173. Harvey, J., Lee, T., Sousa, J., Pak, J. ve Monismith C. L., Evaluation of Fatigue and Permanent Deformation Properties of Several Asphalt-Aggregate Field Mixes Using Strategic Highway Research Program A-003A Equipment, Transportation Research Record, 1994, Washington, 123-133.
174. Şengül, C. E., Sönmüş Kireç ile SBS ve Elyaf Türü Katkı Maddelerinin SMA Karışımların Performansı Üzerindeki Etkileri, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011.

175. [www.dot.ca.gov/hq/maint/MTAGCommonFlexiblePavementDistresses.pdf](http://www.dot.ca.gov/hq/maint/MTAGCommonFlexiblePavementDistresses.pdf). 30 Ocak 2016.
176. Versraeten, J., The Use of Bituminous Mixes In Road Constriction And Measures Against Rutting, Fatigue And Thermal Cracking, Contribution To The JH'S Program, December 1992, Tokyo.
177. [www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04122/03](http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04122/03). 30 Ocak 2016.
178. [www.roadsbridges.com/back-it](http://www.roadsbridges.com/back-it). 30 Ocak 2016.
179. Keçeciler, A. F., Gümrükçüoğlu, A., Akkol, G. ve Gökçe, A. F., Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1990.
180. Yağız, F., Keçeciler, A. F., Işıksalan, C. ve Akkol, G. Bitümlü Malzemeler, İş Matbaacılık ve Ticaret, Ankara, 1967.
181. Yoder, E. J. ve Witczak, M. W., Principles of Pavement Design, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sydney, Toronto, 1975.
182. Hotaman, F., Esnek Yol Üstyapısının Projelendirilmesi ve Karadeniz Sahil Yolunda Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1992.
183. Önal, M. A. ve Karaca, S., Asfalt Betonu ve Diğer Sıcak Karışım Tipleri İçin Karışım Dizayn Metotları, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1990.
184. Alshamsi, K. S., Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures, Doctor of Philosophy in The Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, United Kingdom, 2006.
185. Taute, A., Verhaeghe, BMJA. ve Visser, A. T., Interim Guidelines for The Design of Hot-Mix Asphalt in South Africa, 2001.
186. Flintsch, G. W., Al-Quadi, I. L., Loulizi, A. ve Mokarem, D., Laboratory Tests for Hot-Mix Asphalt Characterization in Virginia, Final Contract Report, Virginia Transportation Research Council, Virginia, 2005.
187. Kök, B.V., Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007.
188. Clyne, T. R., Hanson, M. P., Chadbourn, B., Drescher, A. ve Newcomb, D. E., Superpave Level One Mix Design at the Local Government Level, Final Report 2002-19, Minnesota Department of Transportation, Minnesota, 2001.

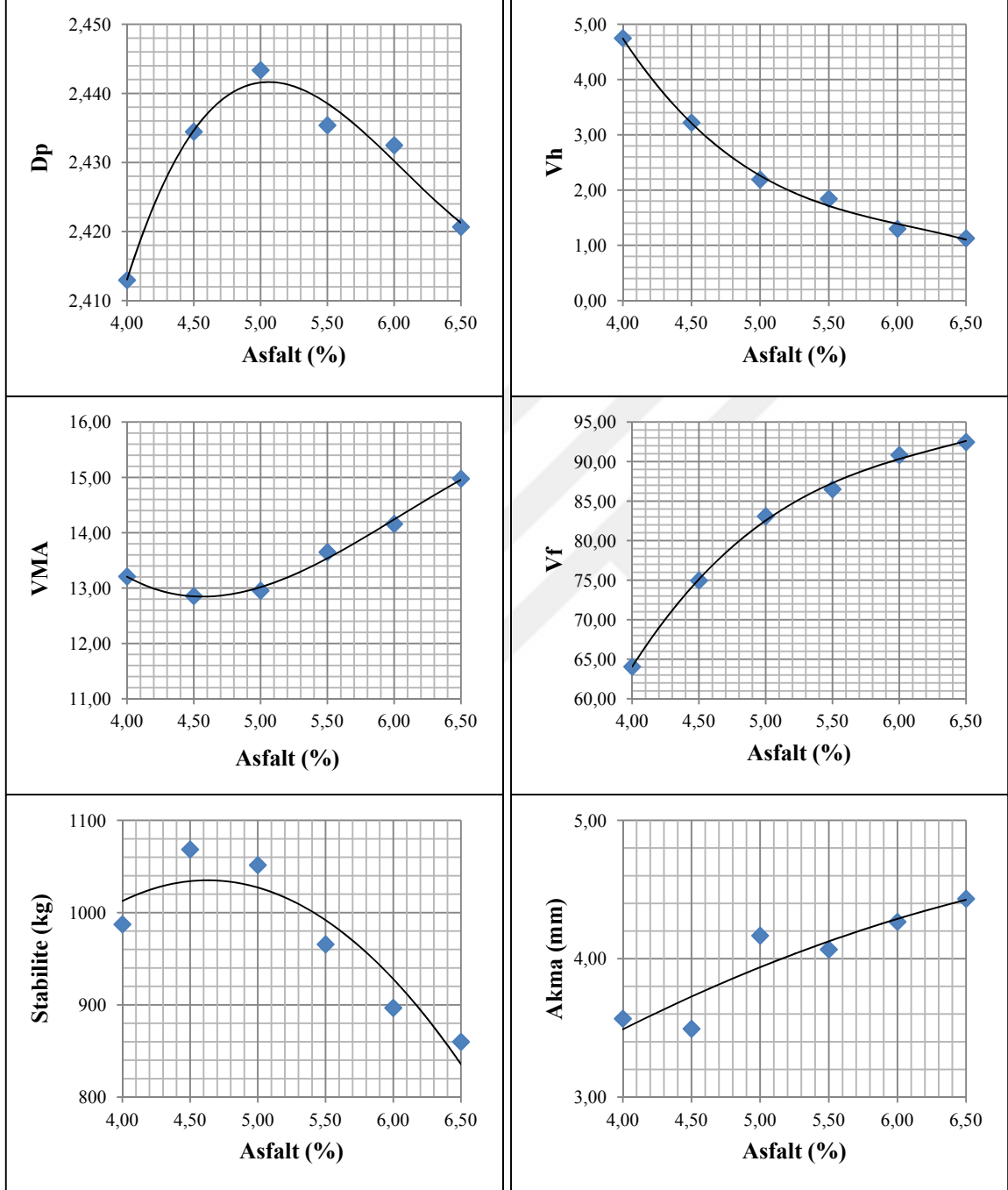


189. Ping, W. V. ve Xiao, Y., Evaluation of the Dynamic Complex Modulus Test and Indirect Diametral Test for Implementing the AASHTO 2002 Design Guide for Pavement Structures in Florida, Final Report for the Florida Department of Transportation, FSU Project No.: OMNI 008664, Tallahassee, 2007.
190. Anurag, K., Xiao, F. ve Amirhanian, S. N., Laboratory Investigation of Indirect Tensile Strength Using Roofing Polyester Waste Fibers in Hot Mix Asphalt, Construction and Building Materials, 23 (2009) 2035-2040.
191. Şengöz, B., Asfalt Film Kalınlığının Bitümlü Karışımların Yaşlanmasına ve Suya Duyarlılığına Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
192. Zoorob, S. E. ve Suparma, L. B., Laboratory Design And Investigation of The Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt), Cement and Concrete Composites, 22 (2000) 233-242.
193. Sargand, S. ve Kim, S. S., Pavement Performance Testing, Final Report, Report No.:FHWA/OH-2001/14, Ohio Department of Transportation, 2001.
194. ELE-UMATTA, Universal Materials Testing Apparatus for Asphalt and Unbound Specimens, Reference and Operating Manual, 1994.
195. AASHTO, Pavement Performance Trends, Guide for Design of Pavement Structure, Washington, USA, 1986.
196. Özen, H., Bitümlü Karışım Değişkenlerinin Performans Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Hizmet Ömrü Tahmini için Bir Model Kurulması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999.
197. Alavi, H. A., Ameri, M., Gandomi, A. H. ve Mirzahosseini, M. R., Formulation of Flow Number of Asphalt Mixes Using a Hybrid Computational Method, Construction and Building Materials, 25, 3 (2011) 1338-1355.
198. Alderson, A., UMATTA Testing Equipment Trial Course, England, 1995.
199. Francken, L., Bituminous Binders and Mixes, Rilem Reports, E and FN Spon, London and New York, 1998.
200. Molenaar, A. A. A. ve Medani, T. O., Rational Testing Methods for Performance Based Specifications, Proceedings of the 1st International Conference World of Asphalt Pavements, July 2000, Sydney, Australia, 484-500.
201. Ghile, D. B., Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures, MSc Thesis, Delfth University of Technology, Delfth, 2006.

202. Subagio, B. S., Siswosoebrotho, B. I. ve Karsaman, R. H., Development of Laboratory Performance of Indonesian Rock Asphalt (Asbuton) in Hot Rolled Asphalt Mix, Eastern Asia Society for Transportation Studies, 4 (2003) 436-449.
203. Sağlık, A. ve Güngör, A. G., Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Arastırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Subesi Müdürlüğü, Ankara, 2006.
204. Karayolu Teknik Sarnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2008.
205. Yağız, F., Işıksalan, C., Keçeciler, A. F. ve Akkol, G., Bitümlü Malzemeler, İş Matbaacılık ve Ticaret, Ankara, 1967.
206. Birliker, R. Y., Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu Tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.
207. [www.mmrc.caltech.edu/FTIR/FTIRintro.pdf](http://www.mmrc.caltech.edu/FTIR/FTIRintro.pdf). Thermo Nicolet Corporation, Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry. 01 Şubat 2016.
208. [www.mta.gov.tr/v2.0/birimler/laboratuvarlar](http://www.mta.gov.tr/v2.0/birimler/laboratuvarlar). Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri (SEM). 03 Şubat 2016.
209. <http://tr.m.wikipedia.org>. Nükleer Manyetik Rezonans. 04 Şubat 2016.
210. [www.web.hitit.edu.tr/dersnotlari](http://www.web.hitit.edu.tr/dersnotlari). Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi, Aletli Analiz Yöntemleri. 04 Şubat 2016.
211. [www.arge.erdogan.edu.tr](http://www.arge.erdogan.edu.tr). NMR (Nükleer Manyetik Rezonans). 04 Şubat 2016.
212. [www.selcuk.edu.tr/ileri\\_arge/birim/web/sayfa/ayrinti/5874/tr](http://www.selcuk.edu.tr/ileri_arge/birim/web/sayfa/ayrinti/5874/tr). SEM Taramalı Elektron Mikroskobu. 05 Şubat 2016.
213. [www.an-ka.com](http://www.an-ka.com). Termogravimetrik Analiz (TGA). 05 Şubat 2016.
214. Doonan, D.J. ve Lower, L.D., Boran Compounds (oxides acid, borates) In Knk Oihmer Encyclopedia of Chemical Technology John Wiley an Sons Vol 4.3 rd ed., 67-110, New York, 1978.
215. Garrett D. E., Borates, Academic Press, California, 1998.
216. <http://www.tubitak.gov.tr>. TÜBİTAK Bor Raporu. 11 Şubat 2016.
217. Bakkalçı, A. C. ve Öz, E., Borun Önemi ve Türkiye’de Bor, TİSK (Türkiye İşveren Sendikaları Konfederasyonu) Akademi, 2, 4 (2007) 248-268.
218. Ölçen, N., Bor Madeninin Enerji Alanındaki Önemi, Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Tez, 2001.

219. <http://www.ceterisparibus.net/turkiye/makaleler.htm>. ATO Bor Raporu. 28 Aralık 2015.
220. [www.bilgitoplumu.gov.tr](http://www.bilgitoplumu.gov.tr). Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı-Bilgi Toplumu Dairesi Başkanlığı. 11 Şubat 2016.
221. Anonim, 2010 Yılı Bor Sektör Raporu, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2011.
222. <http://www.etimaden.gov.tr/Yatirim/BorSektörRaporu2010.pdf>. 07 Mart 2012.
223. [http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/d34d468ac887633\\_ek.pdf](http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/d34d468ac887633_ek.pdf). 12 Ocak 2016.
224. Özpeker, I., Bor Yataklarının Değerlendirilmesi, Türkiye Borat Yatakları, [http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/27e838a450e2fe6\\_ek.pdf](http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/27e838a450e2fe6_ek.pdf) 12 Ocak 2016.
225. <http://www.boraxtr.com/boraxtr/Anadosya/bormadennedir.html>, 12 Mart 2015.
226. <http://tr.m.wikipedia.org>. Bor, Kullanım Yerleri. 12 Şubat 2016.
227. İkizler, A. A. ve Sancak, K., Synthesis of 4-hydroxy-4,5-dihydro-1,2,4-triazol-5-ones, Monatshefte fur Chemie, 123, 3 (1992) 257-263.
228. İkizler, A. A., ve Sancak, K., Reaction of Ester Ethoxycarbonylhydrazones with Aliphatic Diamines, Collection of Czechoslovak Chemical Communications, 60, 5 (1995) 903-909.
229. Von Quintus, H. Scherocman J., Hughes, C. ve Kennedy, T., NCHRP Report 338, Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System (AAMAS), TRB, National Research Council, Washington D.C., 1991.
230. Kaya, M., Türkiye Coğrafi Bölgeleri İçin Bitümlü Bağlayıcıların Performans Derecelerinin Belirlenmesi ve SBS Katkılı Gözlem Yolu Yapılması, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Konya, 2011.
231. Sprent, P. P. ve Smeeton, N. C., Applied Nonparametric Statistical Methods, 4th Ed., 2007.
232. Baykul, Y., İstatistik Yöntemler ve Uygulamalar, Meteksan A. Ş., Ankara, 1999.
233. Baştürk, R., Bütün Yönleriyle SPSS Örnekli Nonparametrik İstatistiksel Yöntemler, Anı Yayıncılık, Ankara, 2010.
234. Büyüköztürk, Ş., Veri Analizi El Kitabı, Pegem Akademi, Ankara, 2011.
235. Field, A., Discovering Statistics Using SPSS (3rd edition), Sage Publication, London, 2009.

## 6. EKLER



Ek Şekil 1. Karışım tasarımı için Marshall grafikleri

Ek Tablo 1. Karışım tasarımına ait Marshall föyü

Sıra No	Asfalt		Briket Yükseklikleri (mm)				Havadaki	Sudaki	Doygun Yüzey	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr. Arası	Asf. Dolu	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özgül Ağırlık	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	Faktörü	(kg)		
1	4,00	46	62,3	62,1	62,8	62,4	1193,1	702,2	1194,0	491,8	2,426				3,40	965	1,028	992	
2	4,00	46	61,9	62,0	62,6	62,2	1191,4	697,4	1192,9	495,5	2,404				3,70	973	1,033	1005	
3	4,00	46	63,3	63,1	63,2	63,2	1192,9	699,0	1194,3	495,3	2,408				3,60	957	1,008	965	
											<b>2,413</b>	<b>2,533</b>	<b>4,75</b>	<b>13,21</b>	<b>64,06</b>	<b>3,57</b>		<b>987</b>	
4	4,50	51,75	62,3	61,6	62,1	62,0	1197,3	706,5	1197,8	491,3	2,437				3,40	1081	1,038	1122	
5	4,50	51,75	63,4	63,6	63,2	63,4	1198,8	707,3	1199,6	492,3	2,435				3,40	1008	1,003	1011	
6	4,50	51,75	62,6	62,1	62,3	62,3	1194,7	703,8	1195,2	491,4	2,431				3,68	1041	1,030	1072	
											<b>2,434</b>	<b>2,515</b>	<b>3,22</b>	<b>12,86</b>	<b>74,96</b>	<b>3,49</b>		<b>1068</b>	
7	5,00	57,5	62,2	61,3	61,8	61,7	1196,6	709,8	1200,1	490,3	2,441				4,10	1009	1,046	1055	
8	5,00	57,5	61,4	61,0	61,1	61,2	1202,2	711,7	1202,6	490,9	2,449				4,30	957	1,062	1016	
9	5,00	57,5	62,0	62,0	62,0	62,0	1202,7	710,5	1203,3	492,8	2,441				4,10	1043	1,038	1083	
											<b>2,443</b>	<b>2,498</b>	<b>2,19</b>	<b>12,95</b>	<b>83,10</b>	<b>4,17</b>		<b>1051</b>	
10	5,50	63,25	61,3	61,3	61,5	61,3	1205,3	711,6	1205,7	494,1	2,439				4,20	890	1,059	943	
11	5,50	63,25	61,1	61,3	61,8	61,4	1201,0	707,7	1201,4	493,7	2,433				3,90	953	1,056	1006	
12	5,50	63,25	63,0	62,1	62,1	62,4	1203,9	709,9	1204,5	494,6	2,434				4,10	922	1,028	948	
											<b>2,435</b>	<b>2,481</b>	<b>1,84</b>	<b>13,65</b>	<b>86,51</b>	<b>4,07</b>		<b>966</b>	
13	6,00	69	61,5	61,5	61,7	61,6	1202,9	709,3	1203,1	493,8	2,436				4,40	849	1,049	891	
14	6,00	69	61,6	61,6	61,6	61,6	1206,9	710,5	1207,2	496,7	2,430				4,10	877	1,049	920	
15	6,00	69	62,8	62,6	62,3	62,5	1206,8	711,0	1207,3	496,3	2,432				4,30	858	1,025	879	
											<b>2,432</b>	<b>2,464</b>	<b>1,30</b>	<b>14,16</b>	<b>90,83</b>	<b>4,27</b>		<b>897</b>	
16	6,50	74,75	62,4	62,1	62,7	62,4	1198,7	702,2	1199,0	496,8	2,413				4,50	821	1,028	844	
17	6,50	74,75	61,9	62,3	61,6	61,9	1200,2	705,4	1200,5	495,1	2,424				4,40	837	1,040	870	
18	6,50	74,75	62,3	62,5	62,7	62,5	1201,1	706,1	1201,4	495,3	2,425				4,40	844	1,025	865	
											<b>2,421</b>	<b>2,448</b>	<b>1,13</b>	<b>14,98</b>	<b>92,48</b>	<b>4,43</b>		<b>860</b>	

Ek Tablo 2. Orijinal asfalt karışımına ait Marshall Föyü

Briket No	Bitüm			Briket Yükseklikleri (mm)				Havadaki	Sudaki	Doygun Yüzey	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş
								Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	Sıcaklık	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	(kg)	
1	4,50	51,8	140	61,7	61,5	61,3	61,5	1197,0	706,9	1197,8	490,9	2,438					3,38	1005	1,053	1058
2	4,50	51,8	140	61,8	61,5	61,8	61,7	1198,4	706,3	1199,0	492,7	2,432					3,55	1015	1,046	1062
3	4,50	51,8	140	61,3	61,7	61,4	61,5	1199,3	706,1	1199,5	493,4	2,431					3,62	995	1,053	1048
												<b>2,434</b>	<b>2,515</b>	<b>3,25</b>	<b>12,88</b>	<b>74,80</b>	<b>3,52</b>			<b>1056</b>
4	4,50	51,8	140	61,4	61,8	61,8	61,7	1197,8	704,0	1198,2	494,2	2,424					Dolaylı Çekme Deneyinde Kullanıldı.			
5	4,50	51,8	140	61,4	60,9	61,4	61,2	1198,4	707,0	1198,8	491,8	2,437								
6	4,50	51,8	140	61,6	61,7	61,9	61,7	1199,3	708,9	1199,6	490,7	2,444								
												<b>2,435</b>	<b>2,515</b>	<b>3,20</b>	<b>12,84</b>	<b>75,05</b>				
7	4,50	51,8	140	61,4	61,2	61,8	61,5	1197,7	706,7	1197,9	491,2	2,438					Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinde Kullanıldı.			
8	4,50	51,8	140	61,9	61,2	61,6	61,6	1198,6	706,9	1198,9	492,0	2,436								
9	4,50	51,8	140	62,2	62,0	62,2	62,1	1198,1	705,6	1198,8	493,2	2,429								
												<b>2,435</b>	<b>2,515</b>	<b>3,21</b>	<b>12,85</b>	<b>74,99</b>				
46	4,50	51,8	140	61,8	61,5	61,9	61,7	1197,2	706,3	1197,6	491,3	2,437					Statik Sünme Deneyinde Kullanıldı.			
47	4,50	51,8	140	61,3	61,6	60,9	61,3	1199,4	706,8	1199,8	493,0	2,433								
48	4,50	51,8	140	61,5	61,5	61,2	61,4	1199,3	705,9	1199,7	493,8	2,429								
												<b>2,433</b>	<b>2,515</b>	<b>3,29</b>	<b>12,92</b>	<b>74,56</b>				
49	4,50	51,8	140	61,6	62,0	62,0	61,9	1198,5	706,1	1198,9	492,8	2,432					Dinamik Sünme Deneyinde Kullanıldı.			
50	4,50	51,8	140	61,4	61,2	61,7	61,4	1198,5	706,2	1199,0	492,8	2,432								
51	4,50	51,8	140	61,0	61,5	61,5	61,3	1197,8	705,9	1197,3	491,4	2,438								
												<b>2,434</b>	<b>2,515</b>	<b>3,24</b>	<b>12,88</b>	<b>74,82</b>				
52	4,50	51,8	140	61,6	61,6	61,5	61,6	1199,2	708,4	1199,8	491,4	2,440					İndirekt Yorulma Deneyinde Kullanıldı.			
53	4,50	51,8	140	62,2	61,8	62,2	62,1	1197,6	706,8	1198,1	491,3	2,438								
54	4,50	51,8	140	62,0	61,3	61,8	61,7	1198,6	705,9	1199,0	493,1	2,431								
												<b>2,436</b>	<b>2,515</b>	<b>3,15</b>	<b>12,79</b>	<b>75,39</b>				

Ek Tablo 3. %1 katkı içerikli asfalt karışımına ait Marshall Föyü

Briket No	Bitüm			Briket Yükseklikleri (mm)				Havadaki	Sudaki	Doygun Yüze	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş
								Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	Sıcaklık	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	(kg)
10	4,50	51,8	140	61,7	62,1	62,1	61,9	1198,8	707,4	1199,2	491,8	2,438					3,48	1035	1,040	1076
11	4,50	51,8	140	62,0	61,9	62,5	62,2	1199,9	707,3	1200,4	493,1	2,433					3,45	999	1,033	1032
12	4,50	51,8	140	62,3	61,5	61,6	61,8	1198,9	707,4	1199,3	491,9	2,437					3,37	1042	1,043	1087
												<b>2,436</b>	<b>2,520</b>	<b>3,34</b>	<b>12,80</b>	<b>73,89</b>	<b>3,43</b>			<b>1065</b>
13	4,50	51,8	140	61,5	61,2	61,5	61,4	1198,1	706,4	1198,6	492,2	2,434					Dolaylı Çekme Deneyinde Kullanıldı.			
14	4,50	51,8	140	61,5	61,1	61,9	61,5	1199,0	707,9	1199,4	491,5	2,439								
15	4,50	51,8	140	61,8	61,5	61,6	61,6	1198,7	707,7	1199,2	491,5	2,439								
												<b>2,438</b>	<b>2,520</b>	<b>3,29</b>	<b>12,75</b>	<b>74,23</b>				
16	4,50	51,8	140	61,4	61,6	62,2	61,7	1197,8	707,1	1198,2	491,1	2,439					Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinde Kullanıldı.			
17	4,50	51,8	140	61,9	61,5	61,8	61,7	1199,8	707,7	1200,3	492,6	2,436								
18	4,50	51,8	140	61,4	61,8	62,1	61,8	1198,2	707,1	1198,7	491,6	2,437								
												<b>2,437</b>	<b>2,520</b>	<b>3,29</b>	<b>12,75</b>	<b>74,19</b>				
55	4,50	51,8	140	62,2	61,7	62,2	62,0	1198,7	707,3	1199,0	491,7	2,438					Statik Sünme Deneyinde Kullanıldı.			
56	4,50	51,8	140	61,4	61,5	61,2	61,4	1199,2	707,9	1199,5	491,6	2,439								
57	4,50	51,8	140	61,9	61,9	62,3	62,0	1199,2	707,8	1199,7	491,9	2,438								
												<b>2,438</b>	<b>2,520</b>	<b>3,25</b>	<b>12,72</b>	<b>74,44</b>				
58	4,50	51,8	140	61,4	61,8	61,1	61,4	1198,4	707,5	1199,3	491,8	2,437					Dinamik Sünme Deneyinde Kullanıldı.			
59	4,50	51,8	140	62,0	61,2	61,7	61,6	1197,9	706,4	1198,5	492,1	2,434								
60	4,50	51,8	140	61,8	61,4	61,7	61,6	1199,0	708,2	1199,7	491,5	2,440								
												<b>2,437</b>	<b>2,520</b>	<b>3,31</b>	<b>12,77</b>	<b>74,08</b>				
61	4,50	51,8	140	61,1	61,8	61,3	61,4	1198,8	707,7	1199,4	491,7	2,438					İndirekt Yorulma Deneyinde Kullanıldı.			
62	4,50	51,8	140	61,9	62,0	61,2	61,7	1198,5	706,8	1199,0	492,2	2,435								
63	4,50	51,8	140	61,8	61,6	62,1	61,8	1199,3	707,9	1199,8	491,9	2,438								
												<b>2,437</b>	<b>2,520</b>	<b>3,30</b>	<b>12,76</b>	<b>74,12</b>				

Ek Tablo 4. %2 katkı içerikli asfalt karışımına ait Marshall Föyü

Briket No	Bitüm			Briket Yükseklikleri (mm)				Havadaki	Sudaki	Doygun Yüze	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş
								Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	Sıcaklık	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	(kg)
19	4,50	51,8	140	62,1	61,7	61,6	61,8	1198,7	706,2	1199,1	492,9	2,432					3,19	1020	1,043	1064
20	4,50	51,8	140	62,5	62,0	62,2	62,3	1197,5	704,3	1198,0	493,7	2,426					3,22	1030	1,030	1061
21	4,50	51,8	140	62,1	61,9	61,9	62,0	1199,1	709,3	1199,7	490,4	2,445					3,35	1081	1,038	1122
												<b>2,434</b>	<b>2,522</b>	<b>3,47</b>	<b>12,86</b>	<b>73,00</b>	<b>3,25</b>			<b>1082</b>
22	4,50	51,8	140	61,3	61,7	61,9	61,6	1198,4	708,4	1198,9	490,5	2,443					Dolaylı Çekme Deneyinde Kullanıldı.			
23	4,50	51,8	140	61,2	61,1	61,7	61,3	1198,3	707,9	1198,9	491,0	2,441								
24	4,50	51,8	140	62,2	62,1	62,1	62,1	1198,6	705,3	1199,2	493,9	2,427								
												<b>2,437</b>	<b>2,522</b>	<b>3,37</b>	<b>12,77</b>	<b>73,62</b>				
25	4,50	51,8	140	62,3	61,8	62,3	62,2	1198,7	705,4	1199,0	493,6	2,428					Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinde Kullanıldı.			
26	4,50	51,8	140	61,7	64,5	61,3	62,5	1197,4	706,3	1197,9	491,6	2,436								
27	4,50	51,8	140	61,2	61,7	62,0	61,6	1198,9	708,0	1199,3	491,3	2,440								
												<b>2,435</b>	<b>2,522</b>	<b>3,45</b>	<b>12,84</b>	<b>73,14</b>				
64	4,50	51,8	142	61,3	61,3	61,1	61,2	1198,6	706,5	1199,1	492,6	2,433					Statik Sünme Deneyinde Kullanıldı.			
65	4,50	51,8	143	61,7	61,2	61,9	61,6	1199,1	708,3	1199,6	491,3	2,441								
66	4,50	51,8	144	61,5	61,4	61,8	61,6	1198,2	707,2	1198,8	491,6	2,437								
												<b>2,437</b>	<b>2,522</b>	<b>3,36</b>	<b>12,76</b>	<b>73,67</b>				
67	4,50	51,8	146	62,2	62,2	61,5	62,0	1198,3	707,3	1198,8	491,5	2,438					Dinamik Sünme Deneyinde Kullanıldı.			
68	4,50	51,8	147	62,3	61,9	61,4	61,9	1197,9	705,8	1198,6	492,8	2,431								
69	4,50	51,8	148	61,5	61,9	61,2	61,5	1198,0	707,9	1198,4	490,5	2,442								
												<b>2,437</b>	<b>2,522</b>	<b>3,36</b>	<b>12,76</b>	<b>73,67</b>				
70	4,50	51,8	150	61,2	62,1	61,4	61,6	1199,2	708,9	1199,8	490,9	2,443					İndirekt Yorulma Deneyinde Kullanıldı.			
71	4,50	51,8	151	61,7	62,3	61,6	61,9	1197,6	704,4	1198,1	493,7	2,426								
72	4,50	51,8	152	61,6	61,6	62,0	61,7	1198,5	706,6	1199,1	492,5	2,434								
												<b>2,434</b>	<b>2,522</b>	<b>3,48</b>	<b>12,87</b>	<b>72,96</b>				



Ek Tablo 5. %4 katkı içerikli asfalt karışımına ait Marshall Föyü

Briket No	Bitüm			Briket Yükseklikleri (mm)				Havadaki	Sudaki	Doygun Yüze	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş
								Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	Sıcaklık	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	(kg)
28	4,50	51,8	140	61,6	61,9	62,1	61,9	1198,4	706,4	1198,8	492,4	2,434					3,21	1070	1,040	1113
29	4,50	51,8	140	62,1	61,7	61,3	61,7	1200,2	706,6	1200,7	494,1	2,429					3,25	1066	1,046	1115
30	4,50	51,8	140	62,2	62,0	62,1	62,1	1199,6	708,3	1200,2	491,9	2,439					3,17	1104	1,035	1143
												<b>2,434</b>	<b>2,523</b>	<b>3,53</b>	<b>12,88</b>	<b>72,62</b>	<b>3,21</b>			<b>1123</b>
31	4,50	51,8	140	61,2	61,1	61,5	61,3	1197,6	706,5	1198,0	491,5	2,437					Dolaylı Çekme Deneyinde Kullanıldı.			
32	4,50	51,8	140	61,4	61,6	61,9	61,6	1198,9	706,4	1199,5	493,1	2,431								
33	4,50	51,8	140	61,6	61,4	61,4	61,5	1196,5	705,1	1197,1	492,0	2,432								
												<b>2,433</b>	<b>2,523</b>	<b>3,55</b>	<b>12,90</b>	<b>72,49</b>				
34	4,50	51,8	140	61,8	62,6	62,1	62,2	1197,9	706,6	1198,4	491,8	2,436					Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinde Kullanıldı.			
35	4,50	51,8	140	61,8	61,6	62,1	61,8	1198,0	706,1	1198,4	492,3	2,433								
36	4,50	51,8	140	61,4	61,4	61,5	61,4	1199,5	707,7	1200,1	492,4	2,436								
												<b>2,435</b>	<b>2,523</b>	<b>3,48</b>	<b>12,83</b>	<b>72,90</b>				
73	4,50	51,8	140	61,2	62,1	61,5	61,6	1200,1	706,8	1200,7	493,9	2,430					Statik Sünme Deneyinde Kullanıldı.			
74	4,50	51,8	140	61,7	61,7	61,2	61,5	1197,9	707,1	1198,4	491,3	2,438								
75	4,50	51,8	140	62,3	62,1	61,8	62,1	1198,4	707,2	1198,9	491,7	2,437								
												<b>2,435</b>	<b>2,523</b>	<b>3,48</b>	<b>12,83</b>	<b>72,91</b>				
76	4,50	51,8	140	62,1	61,7	61,2	61,7	1198,2	706,2	1198,7	492,5	2,433					Dinamik Sünme Deneyinde Kullanıldı.			
77	4,50	51,8	140	61,4	61,2	61,9	61,5	1199,9	707,9	1200,5	492,6	2,436								
78	4,50	51,8	140	61,7	61,4	61,9	61,7	1196,8	705,4	1196,3	490,9	2,438								
												<b>2,436</b>	<b>2,523</b>	<b>3,46</b>	<b>12,82</b>	<b>73,02</b>				
79	4,50	51,8	140	62,3	61,8	62,0	62,0	1197,7	706,4	1198,3	491,9	2,435					İndirekt Yorulma Deneyinde Kullanıldı.			
80	4,50	51,8	140	62,1	61,2	61,4	61,6	1198,2	706,6	1198,9	492,3	2,434								
81	4,50	51,8	140	61,5	62,1	61,8	61,8	1198,7	707,4	1199,1	491,7	2,438								
												<b>2,436</b>	<b>2,523</b>	<b>3,46</b>	<b>12,82</b>	<b>73,01</b>				

Ek Tablo 6. %6 katkı içerikli asfalt karışımına ait Marshall Föyü

Briket No	Bitüm			Briket Yükseklikleri (mm)				Havadaki	Sudaki	Doygun Yüze	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş	
								Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite	
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	Sıcaklık	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	(kg)	
37	4,50	51,8	140	61,4	61,2	61,4	61,3	1198,9	706,5	1199,5	493,0	2,432					3,36	1079	1,059	1143	
38	4,50	51,8	140	61,5	61,4	61,9	61,6	1199,0	707,3	1199,6	492,3	2,436					3,05	1101	1,049	1155	
39	4,50	51,8	140	61,4	60,8	62,1	61,5	1199,7	706,7	1200,2	493,5	2,431					3,29	1056	1,053	1112	
												<b>2,433</b>	<b>2,523</b>	<b>3,59</b>	<b>12,92</b>	<b>72,23</b>	<b>3,23</b>			<b>1137</b>	
40	4,50	51,8	140	61,2	61,8	61,6	61,5	1198,8	706,4	1199,3	492,9	2,432					Dolaylı Çekme Deneyinde Kullanıldı.				
41	4,50	51,8	140	61,5	62,5	61,9	61,9	1200,0	707,9	1200,6	492,7	2,436									
42	4,50	51,8	140	61,6	61,4	61,3	61,4	1199,6	707,3	1200,1	492,8	2,434									<b>2,434</b>
43	4,50	51,8	140	62,2	61,9	61,5	61,9	1198,6	706,9	1199,1	492,2	2,435					Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinde Kullanıldı.				
44	4,50	51,8	140	61,4	61,4	61,6	61,5	1198,9	707,0	1199,5	492,5	2,434									
45	4,50	51,8	140	61,7	61,6	61,6	61,6	1199,2	705,6	1199,7	494,1	2,427									<b>2,432</b>
82	4,50	51,8	140	61,2	62,1	61,4	61,6	1200,2	707,5	1200,7	493,2	2,433					Statik Sünme Deneyinde Kullanıldı.				
83	4,50	51,8	140	61,4	60,9	62,1	61,5	1198,9	706,1	1198,3	492,2	2,436									
84	4,50	51,8	140	61,7	62,3	61,4	61,8	1199,2	707,3	1199,6	492,3	2,436									<b>2,435</b>
85	4,50	51,8	140	60,9	61,8	61,4	61,4	1198,1	706,9	1198,5	491,6	2,437					Dinamik Sünme Deneyinde Kullanıldı.				
86	4,50	51,8	140	62,3	61,5	61,5	61,8	1199,8	707,1	1200,2	493,1	2,433									
87	4,50	51,8	140	61,6	62,0	61,4	61,7	1198,4	705,8	1198,9	493,1	2,430									<b>2,434</b>
88	4,50	51,8	140	61,7	61,8	61,7	61,7	1199,2	706,6	1199,6	493,0	2,432					İndirekt Yorulma Deneyinde Kullanıldı.				
89	4,50	51,8	140	61,7	62,1	62,3	62,0	1199,6	707,3	1200,1	492,8	2,434									
90	4,50	51,8	140	61,9	61,0	61,8	61,6	1200,0	707,9	1200,4	492,5	2,437									<b>2,434</b>

Ek Tablo 7. Orijinal ve katkılı asfalt bağlayıcı içeren karışımlara ait dolaylı çekme mukavemeti föyü

Numune Adı	Briket No	Briket Yüksekliği (h, cm)	Briket Çapı (d, cm)	Pmaks. (kg)	ITS (kg/cm <sup>2</sup> )
Orijinal asfalt	7	6,15	10,16	1219,39	12,43
	8	6,16	10,16	1192,86	12,14
	9	6,21	10,16	1205,10	12,17
<b>Ortalama</b>					<b>12,25</b>
1% Katkılı Asfalt	16	6,17	10,16	1149,56	11,68
	17	6,17	10,16	1242,27	12,62
	18	6,1	10,16	1256,12	12,91
<b>Ortalama</b>					<b>12,40</b>
2% Katkılı Asfalt	25	6,22	10,16	1272,45	12,82
	26	6,25	10,16	1257,14	12,61
	27	6,16	10,16	1260,20	12,83
<b>Ortalama</b>					<b>12,75</b>
4% Katkılı Asfalt	34	6,22	10,16	1284,69	12,95
	35	6,18	10,16	1293,88	13,13
	36	6,14	10,16	1289,80	13,17
<b>Ortalama</b>					<b>13,08</b>
6% Katkılı Asfalt	43	6,19	10,16	1323,47	13,40
	44	6,15	10,16	1307,14	13,32
	45	6,16	10,16	1316,33	13,40
<b>Ortalama</b>					<b>13,37</b>

Ek Tablo 8. Orijinal asfalt karışımına ait dolaylı çekme f6y6

Sıcaklık	Briket No		3000						2000						1000					
			40		60		80		40		60		80		40		60		80	
			µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5°C	4	A	6,145	19951	7,006	18966	7,007	18172	6,605	19412	6,719	18905	6,949	19127	6,814	19323	6,95	19132	7,18	18769
		B	6,719	19262	6,835	19020	7,122	18420	7,065	18377	7,352	17759	7,811	16857	6,835	19184	6,778	18446	7,524	17653
	5	A	6,733	20131	6,399	18933	6,344	17928	6,455	19106	6,678	18303	7,011	19150	6,399	20162	6,344	19758	6,733	19304
		B	6,344	19441	6,344	19981	6,959	18870	5,843	20855	6,789	19614	6,956	18603	6,01	20255	6,567	19509	6,733	18715
	6	A	6,442	20822	7,012	19831	7,239	19156	6,099	20106	6,784	19719	6,84	19418	5,929	19378	7,012	19320	6,954	19048
		B	6,214	20613	6,499	19237	6,784	20115	5,985	20352	6,784	20015	6,669	19053	5,786	19143	6,784	19541	7,012	18706
		<b>Ortalama</b>	<b>6,433</b>	<b>20037</b>	<b>6,683</b>	<b>19328</b>	<b>6,909</b>	<b>18777</b>	<b>6,342</b>	<b>19701</b>	<b>6,851</b>	<b>19053</b>	<b>7,039</b>	<b>18701</b>	<b>6,296</b>	<b>19574</b>	<b>6,739</b>	<b>19284</b>	<b>7,023</b>	<b>18699</b>
25°C	4	A	30,841	5057	34,4	4317	38,021	3867	30,498	4823	37,448	3977	38,999	3616	31,59	4527	38,021	3775	41,704	3425
		B	25,909	5728	29,179	5075	32,11	4549	26,939	5428	29,467	4971	32,339	4485	27,511	5351	30,269	4888	32,683	4457
	5	A	26,76	5389	29,565	4973	31,7	4583	26,821	5519	29,515	4959	31,639	4594	26,872	5558	29,454	5003	31,476	4466
		B	27,431	5409	29,342	4969	31,527	4541	26,648	5466	30,409	4764	32,147	4418	27,157	5352	32,086	4548	32,879	4350
	6	A	26,97	5312	29,347	4907	30,647	4657	26,233	5534	29,971	4884	31,037	4653	26,632	5502	30,586	4866	31,323	4684
		B	27,646	5240	30,084	4830	31,436	4577	27,595	5286	30,248	4865	31,836	4558	27,195	5440	30,248	4961	31,498	4664
		<b>Ortalama</b>	<b>27,59</b>	<b>5356</b>	<b>30,32</b>	<b>4845</b>	<b>32,57</b>	<b>4462</b>	<b>27,46</b>	<b>5343</b>	<b>31,18</b>	<b>4737</b>	<b>33</b>	<b>4387</b>	<b>27,83</b>	<b>5288</b>	<b>31,78</b>	<b>4674</b>	<b>33,59</b>	<b>4341</b>
40°C	4	A	93,043	1369	109,671	1221	130,689	1095	112,584	1274	126,527	1130	138,285	1032	120,18	1196	132,874	1077	149,627	940
		B	121,845	1161	136,828	952	147,754	879	131,626	982	147,441	883	160,344	809	136,828	953	149,314	930	157,118	834
	5	A	113,322	1258	139,035	1001	156,516	872	131,209	1050	146	934,525	158,854	858	132,023	1039	145,032	938	156,923	862
		B	134,258	978	149,199	891	163,732	807	138,222	956	151,13	885	163,021	815	135,478	984	150,926	880	162,309	722
	6	A	97,648	1243	115,952	1109	135	923	119,64	1153	137,155	1007	154,159	888	127,629	1081	141,56	978	157,744	869
		B	134,39	1004	150,881	900	164,3	813	134,492	1006	147,706	917	159,588	842	132,136	1025	144,428	945	149,549	901
		<b>Ortalama</b>	<b>115,8</b>	<b>1169</b>	<b>133,6</b>	<b>1012</b>	<b>149,7</b>	<b>898,2</b>	<b>128</b>	<b>1070</b>	<b>142,7</b>	<b>959,4</b>	<b>155,7</b>	<b>874</b>	<b>130,7</b>	<b>1046</b>	<b>144</b>	<b>958</b>	<b>155,5</b>	<b>854,7</b>

Ek Tablo 9. %1 katkı içerikli asfalt karışımına ait dolaylı çekme füyü

Sıcaklık	Briket No		3000						2000						1000					
			40		60		80		40		60		80		40		60		80	
			µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5°C	13	A	6,336	19609	7,249	18450	7,078	18820	6,678	19428	7,021	18915	7,249	18460	6,279	19990	6,907	19411	7,364	18229
		B	6,508	19094	6,793	19233	7,307	18254	6,85	19392	6,85	20116	7,364	18696	6,508	19655	6,907	19925	7,421	18631
	14	A	7,713	18976	7,832	18677	8,467	18146	7,771	18607	8,061	17972	8,234	17426	7,771	18210	8,061	18235	7,887	18488
		B	7,423	19402	8,234	18540	8,351	18164	7,423	19073	8,524	18212	8,351	17266	7,713	18672	8,699	16950	8,351	17370
	15	A	7,168	19920	6,886	19678	7,958	18491	7,056	20164	7,45	19129	7,732	18273	7,394	19420	7,79	18442	7,79	18335
		B	7,282	19608	7,338	19358	7,846	17889	6,999	20466	7,564	18788	7,62	18553	7,168	19952	7,62	18794	8,128	17579
		<b>Ortalama</b>	<b>7,072</b>	<b>19435</b>	<b>7,389</b>	<b>18989</b>	<b>7,835</b>	<b>18294</b>	<b>7,13</b>	<b>19522</b>	<b>7,578</b>	<b>18855</b>	<b>7,758</b>	<b>18112</b>	<b>7,139</b>	<b>19317</b>	<b>7,664</b>	<b>18626</b>	<b>7,824</b>	<b>18105</b>
25°C	13	A	24,681	4814	23,805	4769	27,984	4145	22,555	5444	24,881	4576	28,097	4130	23,067	5026	249,932	4567	27,37	4258
		B	23,135	4980	25,044	4481	28,046	4079	23,067	4920	25,44	4439	27,984	4115	23,129	4956	24,819	4564	27,933	4159
	14	A	25,042	5324	27,421	4770	30,197	4313	25,505	5136	27,595	4740	30,197	4309	25,382	5211	27,533	4772	29,91	4387
		B	25,781	5107	28,271	4542	30,473	4204	25,618	5074	27,595	4675	30,361	4234	25,331	5131	27,872	4648	30,422	4289
	15	A	23,895	5968	25,618	5518	28,496	4931	24,542	5749	27,195	5237	29,797	4731	24,819	5660	27,421	5213	29,797	4739
		B	25,204	5524	27,708	5060	29,746	4658	25,044	5580	27,257	5132	30,248	4608	24,998	5581	26,632	5295	29,398	4765
		<b>Ortalama</b>	<b>24,62</b>	<b>5286</b>	<b>26,31</b>	<b>4857</b>	<b>29,16</b>	<b>4388</b>	<b>24,39</b>	<b>5317</b>	<b>26,66</b>	<b>4800</b>	<b>29,45</b>	<b>4355</b>	<b>24,45</b>	<b>5261</b>	<b>64,03</b>	<b>4843</b>	<b>29,14</b>	<b>4433</b>
40°C	13	A	104,5	1303	128,961	1072	144	943	121,688	1105	136,848	983,339	152,52	883,981	124,966	1074	138,282	971	152,622	884
		B	128,126	1028	142,67	925	155,695	843	130,497	1000	143,404	915	156,822	838	129,575	1008	143,404	920	155,081	853
	14	A	98,951	1391	120,766	1176	136,541	950	112,879	1148	126,4	1017	145,247	880	118,308	1084	129,473	992	143,096	895
		B	122,974	1028	130,292	951	147,911	846	12,2	1017	133,468	929	148,218	845	121,176	1020	132,443	944	148	878
	15	A	102,6	1307	120,664	1055,04	137,463	949	96,459	1312	16,901	1071	134,39	965	112,674	1147	127,015	1025	140,433	933
		B	107,414	1151	125,478	995	143,404	884	120,869	1048	133,877	945	149,447	854	122,405	1036	136,643	937	149,037	869
		<b>Ortalama</b>	<b>110,8</b>	<b>1201</b>	<b>128,1</b>	<b>1029</b>	<b>144,2</b>	<b>902,5</b>	<b>99,1</b>	<b>1105</b>	<b>115,1</b>	<b>976,7</b>	<b>147,8</b>	<b>877,7</b>	<b>121,5</b>	<b>1062</b>	<b>134,5</b>	<b>964,8</b>	<b>148</b>	<b>885,3</b>

Ek Tablo 10. %2 katkı içerikli asfalt karışımına ait dolaylı çekme f6y6

Sıcaklık	Briket No		3000						2000						1000					
			40		60		80		40		60		80		40		60		80	
			μϵ	E	μϵ	E	μϵ	E	μϵ	E	μϵ	E	μϵ	E	μϵ	E	μϵ	E	μϵ	E
5°C	22	A	7,327	21080	7,268	21166	7,619	21516	6,785	18185	6,898	17565	7,577	17055	6,955	18466	7,746	16888	8,199	15957
		B	6,799	21597	7,033	21883	7,971	21865	6,672	18878	7,011	17749	7,52	17221	7,238	17590	7,35	17692	7,69	16835
	23	A	7,968	17978	8,319	16557	9,198	15055	6,955	18293	7,068	17799	7,916	17524	7,011	18253	7,011	18541	7,407	17454
		B	7,909	17032	8,437	16189	8,788	15562	6,615	18845	7,124	17806	7,633	17528	6,39	20154	7,35	18399	6,729	19912
	24	A	6,468	17837	7,056	16872	6,879	17590	6,898	18089	6,955	17950	8,029	17473	6,672	20163	7,294	18164	7,294	18165
		B	7,114	18624	7,408	18276	7,585	17880	6,615	18050	6,785	17851	7,633	17071	7,068	17443	7,011	17573	6,898	17061
		<b>Ortalama</b>	<b>7,264</b>	<b>19025</b>	<b>7,587</b>	<b>18491</b>	<b>8,007</b>	<b>18245</b>	<b>6,757</b>	<b>18390</b>	<b>6,974</b>	<b>17787</b>	<b>7,718</b>	<b>17312</b>	<b>6,889</b>	<b>18678</b>	<b>7,294</b>	<b>17876</b>	<b>7,37</b>	<b>17564</b>
25°C	22	A	25,826	5464	27,34	5278	28,917	4914	24,895	5880	27,572	5375	30,208	4872	25,18	5844	27,869	5364	30,324	4875
		B	25,244	5730	27,869	5208	30,557	4717	25,762	5625	28,165	5195	30,557	4756	25,593	5711	27,689	5313	30,377	4812
	23	A	26,506	5556	28,933	5067	31,832	4573	27,136	5384	29,983	4898	32,767	4442	27,199	5421	30,624	4852	32,767	4506
		B	26,39	5226	30,971	4696	33,461	4303	27,662	5251	31,318	4681	33,923	4279	28,124	5222	31,433	4716	33,524	4371
	24	A	24,78	5636	27,451	5170	30,338	4628	25,695	5524	28,132	5069	30,338	4646	25,582	5593	28,53	5053	31	4619
		B	25,746	5421	28,53	4924	29,66	4639	25,921	5381	28,869	4865	31,304	4445	25,633	5482	28,294	4930	31	4586
		<b>Ortalama</b>	<b>25,75</b>	<b>5506</b>	<b>28,52</b>	<b>5057</b>	<b>30,79</b>	<b>4629</b>	<b>26,18</b>	<b>5508</b>	<b>29,01</b>	<b>5014</b>	<b>31,52</b>	<b>4573</b>	<b>26,22</b>	<b>5546</b>	<b>29,07</b>	<b>5038</b>	<b>31,5</b>	<b>4628</b>
40°C	22	A	115,053	1388	123,732	1243	139,397	1092	116,217	1325	130,929	1183	149,24	1036	118,651	1301	127,331	1198	136	1102
		B	113,147	1278	126,484	1159	138,55	1052	113,888	1271	127,648	1151	139,82	1047	113,677	1281	128,177	1160	139	1066
	23	A	107,3	1523	114,613	1369	130,9	1166	111,509	1392	123,174	1261	132,9	1146	111,616	1370	122,425	1257	132	1157
		B	115,255	1298	126,491	1193	135,374	1088	115,255	1297	121,462	1223	132,698	1119	112,258	1329	122,318	1226	131	1138
	24	A	152,05	985	176,42	757	192,95	689	166,354	804	178,963	735	195,493	679	166,036	808	176,102	758	191	702
		B	166,99	886	176,632	741	190,513	690	160,421	815	171,228	767	185,957	712	155,864	842	166,142	791	181	735
		<b>Ortalama</b>	<b>128,3</b>	<b>1226</b>	<b>140,7</b>	<b>1077</b>	<b>154,6</b>	<b>962,8</b>	<b>130,6</b>	<b>1151</b>	<b>142,2</b>	<b>1053</b>	<b>156</b>	<b>956,5</b>	<b>129,7</b>	<b>1155</b>	<b>140,4</b>	<b>1065</b>	<b>151,7</b>	<b>983,3</b>

Ek Tablo 11. %4 katkı içerikli asfalt karışımına ait dolaylı çekme f6y6

Sıcaklık	Briket No		3000						2000						1000					
			40		60		80		40		60		80		40		60		80	
			µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5°C	31	A	6,282	19568	6,81	19361	6,987	17681	7,327	17174	7,619	16576	7,561	16823	7,033	18199	7,619	16718	7,619	16848
		B	6,106	19425	6,635	19509	7,104	18101	7,15	17615	7,092	17680	7,619	16603	6,975	17870	7,033	17995	7,561	16932
	32	A	7,156	17649	7,676	16436	8,079	16229	7,968	17195	8,495	16363	8,379	16518	8,144	16960	8,437	16465	8,672	16119
		B	6,983	17117	7,617	16837	8,31	16550	7,733	17507	8,255	16602	8,672	15841	7,909	17302	8,086	16932	8,319	16464
	33	A	7,96	18676	7,131	18658	8,246	18506	6,526	20529	6,644	20493	7,291	18593	6,938	19621	7,232	19020	7,408	18616
		B	7,101	18775	7,017	18041	8,476	18337	7,173	18635	7,585	17929	7,708	17777	7,114	19098	7,291	18812	7,761	17778
		<b>Ortalama</b>	<b>6,931</b>	<b>18535</b>	<b>7,148</b>	<b>18140</b>	<b>7,867</b>	<b>17567</b>	<b>7,313</b>	<b>18109</b>	<b>7,615</b>	<b>17607</b>	<b>7,872</b>	<b>17026</b>	<b>7,352</b>	<b>18175</b>	<b>7,616</b>	<b>17657</b>	<b>7,89</b>	<b>17126</b>
25°C	31	A	25,655	5675	27,952	5203	30,239	4802	25,655	5655	28,239	5204	29,771	4871	25,538	5747	28,069	5278	29,473	4962
		B	24,07	5985	26,952	5380	29,473	4851	25,133	5784	27,42	5307	29,707	4856	25,484	5740	27,771	5321	29,824	4903
	32	A	24,552	6015	28,733	5565	31,495	4635	25,555	5787	29,32	5454	31,144	4700	26,429	5624	29,373	5075	30,845	4781
		B	26,077	5589	29,618	4929	32,082	4486	26,845	5429	29,32	5007	32,445	4476	26,376	5565	29,618	4994	32,082	4577
	33	A	25,05	6169	27,041	5636	28,927	5123	24,336	6138	26,637	5627	28,575	5145	24,517	6093	26,52	5644	27,691	5299
		B	24,102	6017	26,275	5571	28,458	5083	24,102	6057	26,27	5597	28,043	5194	23,868	6170	25,987	5706	27,925	5231
		<b>Ortalama</b>	<b>24,92</b>	<b>5908</b>	<b>27,76</b>	<b>5381</b>	<b>30,11</b>	<b>4830</b>	<b>25,27</b>	<b>5808</b>	<b>27,87</b>	<b>5366</b>	<b>29,95</b>	<b>4874</b>	<b>25,37</b>	<b>5823</b>	<b>27,89</b>	<b>5336</b>	<b>29,64</b>	<b>4959</b>
40°C	31	A	103,56	1377	121,07	1171	135,49	1040	115,4	1220	128,28	1103	141,43	991	118,526	1185	132,096	1067	144,288	972
		B	122,025	1114	136,019	1005	151,603	903	127,538	1068	142,804	961	157,22	871	129,976	1055	142,274	966	156,162	885
	32	A	99,045	1416	97,859	1456	112,98	1227	99,003	1418	108,512	1286	120,685	1139	102,343	1374	111,95	1250	119,64	1157
		B	101,022	1350	111,64	1226	121,83	1103	105,183	1304	117,044	1164	127,96	1054	110,073	1244	121,101	1133	131,609	1035
	33	A	100,55	1442	128,016	1113	139,134	1004	116,79	1211	128,535	1096	142,563	979	120,638	1171	132,172	1073	142,979	980
		B	123,963	1101	136,017	1012	147,031	929	128,85	1059	141	970	158,357	869	133,211	1031	145,68	953	156,2	885
		<b>Ortalama</b>	<b>108,4</b>	<b>1300</b>	<b>121,8</b>	<b>1164</b>	<b>134,7</b>	<b>1034</b>	<b>115,5</b>	<b>1213</b>	<b>127,7</b>	<b>1097</b>	<b>141,4</b>	<b>983,8</b>	<b>119,1</b>	<b>1177</b>	<b>130,9</b>	<b>1074</b>	<b>141,8</b>	<b>985,7</b>

Ek Tablo 12. %6 katkı içerikli asfalt karışımına ait dolaylı çekme f6y6

Sıcaklık	Briket No		3000						2000						1000					
			40		60		80		40		60		80		40		60		80	
			µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5°C	40	A	6,596	18817	6,955	17603	7,803	16524	6,81	19130	7,104	19185	6,4	18412	6,928	19117	6,869	19064	5,93	19224
		B	7,269	17960	7,463	17170	7,463	17139	6,4	19417	6,575	18920	5,636	18346	6,635	19984	6,752	19423	6,341	19639
	41	A	7,265	18697	7,294	17996	7,86	16597	7,56	17426	8,31	16988	7,676	16637	7,848	16381	8,079	15749	7,502	15159
		B	6,879	18834	6,785	18799	7,35	18023	7,848	17450	8,258	16706	7,502	15268	7,848	16580	8,599	15708	7,156	15135
	42	A	7,278	17489	7,011	18023	7,011	17877	8,017	15531	8,647	14623	7,158	15276	8,246	15283	8,533	15566	7,33	14825
		B	6,679	18874	7,407	18259	7,407	17469	7,845	16404	8,476	16275	7,558	15899	7,903	16318	8,59	15225	7,387	15960
		<b>Ortalama</b>	<b>6,994</b>	<b>18445</b>	<b>7,153</b>	<b>17975</b>	<b>7,482</b>	<b>17272</b>	<b>7,413</b>	<b>17560</b>	<b>7,895</b>	<b>17116</b>	<b>6,988</b>	<b>16640</b>	<b>7,568</b>	<b>17277</b>	<b>7,904</b>	<b>16789</b>	<b>6,941</b>	<b>16657</b>
25°C	40	A	24,676	5950	27,076	5434	29,486	4936	26,311	5526	28,488	5127	30,187	4790	27,076	5399	28,955	5100	30,473	4775
		B	26,73	5393	28,84	5012	30,187	4748	27,256	5288	29,189	4980	30,537	4696	27,49	5255	29,656	4925	30,537	4729
	41	A	24,55	6314	26,131	5839	26,184	5581	23,255	6301	25,197	5891	26,89	5452	23,489	6291	25,431	5878	27,129	5434
		B	23,138	6234	25,25	5771	26,832	5394	23,022	6293	25,484	5758	27,48	5319	23,32	6299	24,96	5921	27,14	5412
	42	A	22,4	7196	24,285	6538	26,043	6111	22,869	7052	24,871	6413	27,23	6066	22,93	7081	24,104	6623	25,99	6129
		B	22,58	7060	24,456	6426	26,27	6010	22,75	7030	24,403	6464	26,34	6014	22,93	7037	24,456	6523	26,23	6073
		<b>Ortalama</b>	<b>24,01</b>	<b>6358</b>	<b>26,01</b>	<b>5837</b>	<b>27,5</b>	<b>5463</b>	<b>24,24</b>	<b>6248</b>	<b>26,27</b>	<b>5772</b>	<b>28,11</b>	<b>5390</b>	<b>24,54</b>	<b>6227</b>	<b>26,26</b>	<b>5828</b>	<b>27,92</b>	<b>5425</b>
40°C	40	A	107	1315	127,209	1204	140,93	1082	119,87	1286	131,676	1167	146,035	1048	124,125	1137	139,654	1005	145,291	954
		B	125,72	1196	140,823	1074	154,757	977	127,847	1182	142,738	1061	158,267	956	132,846	1152	145,503	1050	153,693	983
	41	A	92,492	1567	107,189	1414	123,934	1193	103,616	1427	115,828	1275	127,88	1145	104,032	1406	117,108	1253	128,307	1131
		B	108,469	1316	120,414	1185	135,133	1047	113,8	1243	126,067	1133	139,613	1020	114,975	1244	125,747	1139	143,879	997
	42	A	99,943	1527	118,54	1259	129,083	1135	107,9	1354	117,678	1238	127,592	1129	106,472	1361	115,557	1257	124,61	1155
		B	106,93	1305	116,941	1208	128,657	1096	107,037	1301	117,687	1201	128,124	1103	105,705	1310	115,983	1219	124,61	1141
		<b>Ortalama</b>	<b>106,8</b>	<b>1371</b>	<b>121,9</b>	<b>1224</b>	<b>135,4</b>	<b>1088</b>	<b>113,3</b>	<b>1299</b>	<b>125,3</b>	<b>1179</b>	<b>137,9</b>	<b>1067</b>	<b>114,7</b>	<b>1268</b>	<b>126,6</b>	<b>1154</b>	<b>136,7</b>	<b>1060</b>



Ek Tablo 13. Marshall stabilite düzeltme katsayıları

Boy (mm)	Katsayı	Boy (mm)	Katsayı	Boy (mm)	Katsayı	Boy (mm)	Katsayı	Boy (mm)	Katsayı
50,0	1,515	54,0	1,320	58,0	1,165	62,0	1,038	66,0	0,943
50,1	1,509	54,1	1,316	58,1	1,162	62,1	1,035	66,1	0,941
50,2	1,504	54,2	1,311	58,2	1,159	62,2	1,033	66,2	0,939
50,3	1,498	54,3	1,307	58,3	1,156	62,3	1,030	66,3	0,938
50,4	1,493	54,4	1,303	58,4	1,153	62,4	1,028	66,4	0,936
50,5	1,487	54,5	1,298	58,5	1,149	62,5	1,025	66,5	0,934
50,6	1,481	54,6	1,294	58,6	1,146	62,6	1,023	66,6	0,932
50,7	1,476	54,7	1,289	58,7	1,143	62,7	1,020	66,7	0,930
50,8	1,470	54,8	1,285	58,8	1,137	62,8	1,018	66,8	0,928
50,9	1,465	54,9	1,281	58,9	1,134	62,9	1,015	66,9	0,925
51,0	1,460	55,0	1,276	59,0	1,131	63,0	1,013	67,0	0,923
51,1	1,455	55,1	1,272	59,1	1,128	63,1	1,010	67,1	0,920
51,2	1,450	55,2	1,268	59,2	1,124	63,2	1,008	67,2	0,918
51,3	1,445	55,3	1,263	59,3	1,121	63,3	1,005	67,3	0,915
51,4	1,440	55,4	1,259	59,4	1,118	63,4	1,003	67,4	0,913
51,5	1,435	55,5	1,254	59,5	1,115	63,5	1,000	67,5	0,910
51,6	1,430	55,6	1,250	59,6	1,112	63,6	0,998	67,6	0,908
51,7	1,425	55,7	1,246	59,7	1,109	63,7	0,995	67,7	0,905
51,8	1,420	55,8	1,243	59,8	1,106	63,8	0,993	67,8	0,903
51,9	1,415	55,9	1,239	59,9	1,103	63,9	0,990	67,9	0,900
52,0	1,410	56,0	1,235	60,0	1,099	64,0	0,988	68,0	0,898
52,1	1,405	56,1	1,231	60,1	1,096	64,1	0,985	68,1	0,895
52,2	1,400	56,2	1,228	60,2	1,093	64,2	0,983	68,2	0,893
52,3	1,395	56,3	1,224	60,3	1,090	64,3	0,980	68,3	0,890
52,4	1,390	56,4	1,220	60,4	1,087	64,4	0,978	68,4	0,888
52,5	1,386	56,5	1,216	60,5	1,084	64,5	0,975	68,5	0,886
52,6	1,381	56,6	1,213	60,6	1,081	64,6	0,973	68,6	0,884
52,7	1,377	56,7	1,209	60,7	1,078	64,7	0,970	68,7	0,883
52,8	1,373	56,8	1,205	60,8	1,074	64,8	0,968	68,8	0,881
52,9	1,368	56,9	1,201	60,9	1,071	64,9	0,965	68,9	0,879
53,0	1,364	57,0	1,198	61,0	1,068	65,0	0,963	69,0	0,877
53,1	1,359	57,1	1,194	61,1	1,065	65,1	0,960	69,1	0,875
53,2	1,355	57,2	1,190	61,2	1,062	65,2	0,958	69,2	0,873
53,3	1,351	57,3	1,187	61,3	1,059	65,3	0,956	69,3	0,871
53,4	1,346	57,4	1,184	61,4	1,056	65,4	0,954	69,4	0,869
53,5	1,342	57,5	1,181	61,5	1,053	65,5	0,953	69,5	0,868
53,6	1,338	57,6	1,178	61,6	1,049	65,6	0,951	69,6	0,866
53,7	1,333	57,7	1,174	61,7	1,046	65,7	0,949	69,7	0,864
53,8	1,329	57,8	1,171	61,8	1,043	65,8	0,947	69,8	0,862
53,9	1,324	57,9	1,168	61,9	1,040	65,9	0,945	69,9	0,860

### Ek-İstatistiksel Analizler

İstatistiksel analizlerde parametrik testlerin kullanılabilmesi için belli koşulların sağlanması gerekmektedir. Bu koşullar içerisinde en çok dikkat edileni verilerin normal dağılım göstermesi ve varyansların eşit olmasıdır [231, 232, 233]. Araştırmalarda bu koşullar sağlanmadığında non-parametrik istatistik yöntemlerinden faydalanılır. Non-parametrik istatistik yöntemlerinde, ikiden fazla ölçüm sonucunun karşılaştırılması işleminde Friedman Two-Way ANOVA Testi (Çift Yönlü Varyans Analizinin Parametrik Olmayan Karşılığı) kullanılır [234]. Bu çalışmada da veriler normal dağılım göstermediği için deney sonuçlarının karşılaştırılmasında, non-parametrik istatistik yöntemlerinden biri olan Friedman Two-Way ANOVA testi kullanılmıştır.

Araştırma kapsamında öncelikle %0 (orijinal asfalt), %1, %2, %4 ve %6 katkı oranları için penetrasyon deneyinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Ek Tablo 14. Penetrasyon deneyi için Friedman Testi Two-Way ANOVA analizi sonuçları

Katkı Oranı	N	Sıralama Ortalamaları	Sd	X <sup>2</sup>	P	Fark
%0	3	5.00	4	12.00	.017	%1-%0, %2-%0, %4-%0, %6-%0, %2-%1, %4-%1, %6-%1, %4-%2, %6-%2, %6-%4
%1		4.00				
%2		3.00				
%4		2.00				
%6		1.00				

Tablo 14 incelendiğinde, penetrasyon deney sonuçlarının (her bir katkı oranı için 3 ölçüm yapılmıştır), orijinal asfalta ilave edilen katkı oranlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [ $Q_k = 12.00$ ;  $p < .05$ ]. Bir başka ifade ile en az bir katkı oranından elde edilen değerlerin, diğer katkı oranlarından elde edilen değerlerden farklı olduğu istatistiksel olarak 0.05 manidarlık düzeyinde söylenebilir. Bu farkın hangi katkı oranı veya katkı oranlarına ilişkin bir fark olduğunu belirlemek amacı ile ikili gruplar arası “Wilcoxon İşaret Sıralaması Testi (Wilcoxon matched-paires signed ranks)” uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün katkı oranlarının, katkısız asfalta göre penetrasyon değerini düşürmede etkili olduğu ancak bu düşüşü en çok %6 katkı oranının sağladığı görülmüştür.

Ek Tablo 15. Yumuşama noktası deneyi için Friedman Testi Two-Way ANOVA analizi sonuçları

Katkı Oranı	N	Sıralama Ortalamaları	Sd	X <sup>2</sup>	P	Fark
%0	4	1.25	4	14.80	.005	%1-%0, %2-%0, %4-%0,
%1		1.75				%6-%0, %4-%1, %6-%1,
%2		3.25				%6-%2, %6-%4
%4		3.75				
%6		5.00				

Tablo 15 incelendiğinde, yumuşama noktası deney sonuçlarının (Her bir katkı oranı için deney 2 kez yapılmış olup, toplamda 4 okuma yapılmıştır), orijinal asfalta ilave edilen katkı oranlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [ $Q_k = 14.80$ ;  $p < .05$ ]. Bu farkın hangi katkı oranı veya katkı oranlarına ilişkin bir fark olduğunu belirlemek amacı ile ikili gruplar arası “Wilcoxon İşaret Sıralaması Testi (Wilcoxon matched-paires signed ranks)” uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün katkı oranlarının, katkısız asfalta göre yumuşama noktası değerini artırmada etkili olduğu ancak bu artışı en çok %6 katkı oranının sağladığı görülmüştür.

Ek Tablo 16. Özgül ağırlık deneyi için Friedman Testi Two-Way ANOVA analizi sonuçları

Katkı Oranı	N	Sıralama Ortalamaları	Sd	X <sup>2</sup>	P	Fark
%0	3	1.00	4	11.467	.022	%1-%0, %2-%0, %4-%0,
%1		2.00				%6-%0, %2-%1, %4-%1,
%2		3.00				%4-%2, %6-%1, %6-%2
%4		4.33				
%6		4.67				

Tablo 16 incelendiğinde, özgül ağırlık deney sonuçlarının (her bir katkı oranı için 3 ölçüm yapılmıştır) orijinal asfalta ilave edilen katkı oranlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [ $Q_k = 11.467$ ;  $p < .05$ ]. Bu farkın hangi katkı oranı veya katkı oranlarına ilişkin bir fark olduğunu belirlemek amacı ile ikili gruplar arası “Wilcoxon İşaret Sıralaması Testi (Wilcoxon matched-paires signed ranks)” uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün katkı oranlarının, katkısız asfalta göre özgül ağırlık

değerini artırmada etkili olduğu ancak bu artışı en çok %6 katkı oranının sağladığı görülmüştür.

Ek Tablo 17. DSR deneyi için Friedman Testi Two-Way ANOVA analizi sonuçları

Katkı Oranı	N	Sıralama Ortalamaları	Sd	X <sup>2</sup>	P	Fark
%0	9	1.00	4	36.00	.000	%1-%0, %2-%0, %4-%0,
%1		2.00				%6-%0, %2-%1, %4-%1,
%2		3.00				%6-%1, %4-%2, %6-%2,
%4		4.00				%6-%4
%6		5.00				

Tablo 17 incelendiğinde, DSR deney sonuçlarının (58°C, 64°C, 70°C her bir sıcaklık değeri için 3 ölçüm olmak üzere, her bir katkı oranı için toplam 9 ölçüm yapılmıştır) orijinal asfalta ilave edilen katkı oranlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [ $Q_k = 36.00$ ;  $p < .05$ ]. Bu farkın hangi katkı oranı veya katkı oranlarına ilişkin bir fark olduğunu belirlemek amacı ile ikili gruplar arası “Wilcoxon İşaret Sıralaması Testi (Wilcoxon matched-paires signed ranks)” uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün katkı oranlarının, katkısız asfalta göre DSR değerini artırmada etkili olduğu ancak bu artışı en çok %6 katkı oranının sağladığı görülmüştür.

Ek Tablo 18. RV deneyi için Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları

Katkı Oranı	N	Sıralama Ortalamaları	Sd	X <sup>2</sup>	P	Fark
%0	15	1.00	4	58.00	.000	%1-%0, %2-%0, %4-%0,
%1		2.20				%6-%0, %2-%1, %4-%1,
%2		3.00				%6-%1, %4-%2, %6-%2,
%4		3.80				%6-%4
%6		5.00				

Tablo 18 incelendiğinde, RV deney sonuçlarının (90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C her bir sıcaklık değeri için 3 ölçüm olmak üzere, her bir katkı oranı için toplam 15 ölçüm yapılmıştır) orijinal asfalta ilave edilen katkı oranlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [ $Q_k = 58.00$ ;  $p < .05$ ]. Bu farkın hangi katkı oranı veya katkı oranlarına ilişkin bir fark olduğunu belirlemek amacı ile ikili gruplar arası

“Wilcoxon İşaret Sıralaması Testi (Wilcoxon mached-paires signed ranks)” uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün katkı oranlarının, katkısız asfalta göre viskozite değerini artırmada etkili olduğu ancak bu artışı en çok %6 katkı oranının sağladığı görülmüştür.

Ek Tablo 19. RTFOT deneyi sonrası Penetrasyon testi için Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları

Katkı Oranı	N	Sıralama Ortalamaları	Sd	X <sup>2</sup>	P	Fark
%0	3	4.83	4	11.86	.018	%1-%0, %2-%0, %4-%0,
%1		4.17				%6-%0, %2-%1, %4-%1,
%2		3.00				%6-%1, %4-%2, %6-%2,
%4		2.00				%6-%4
%6		1.00				

Tablo 19 incelendiğinde, RTFOT deneyi sonrası penetrasyon test sonuçlarının, orijinal asfalta ilave edilen katkı oranlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [ $Q_k = 11.86$ ;  $p < .05$ ]. Bu farkın hangi katkı oranı veya katkı oranlarına ilişkin bir fark olduğunu belirlemek amacı ile ikili gruplar arası “Wilcoxon İşaret Sıralaması Testi (Wilcoxon mached-paires signed ranks)” uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün katkı oranlarının, katkısız asfalta göre penetrasyon değerini artırmada etkili olduğu ancak bu artışı en çok %6 katkı oranının sağladığı görülmüştür.

Ek Tablo 20. RTFOT deneyi sonrası Yumuşama Noktası testi için Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları

Katkı Oranı	N	Sıralama Ortalamaları	Sd	X <sup>2</sup>	P	Fark
%0	4	1.00	4	15.40	.004	%1-%0, %2-%0, %4-%0,
%1		2.00				%6-%0, %2-%1, %4-%1,
%2		3.25				%6-%1, %6-%2, %6-%4
%4		3.75				
%6		5.00				

Tablo 20 incelendiğinde, RTFOT deneyi sonrası yumuşama test sonuçlarının, orijinal asfalta ilave edilen katkı oranlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [ $Q_k = 15.40$ ;  $p < .05$ ]. Bu farkın hangi katkı oranı veya katkı oranlarına ilişkin bir fark olduğunu belirlemek amacı ile ikili gruplar arası “Wilcoxon İşaret

Sıralaması Testi (Wilcoxon mached-paires signed ranks)” uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün katkı oranlarının, katkısız asfalta göre yumuşama noktası değerini artırmada etkili olduğu ancak bu artışı en çok %6 katkı oranının sağladığı görülmüştür.

Ek Tablo 21. RTFOT deneyi sonrası DSR testi için Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları

Katkı Oranı	N	Sıralama Ortalamaları	Sd	X <sup>2</sup>	P	Fark
%0	6	1.00	4	24.00	.000	%1-%0, %2-%0, %4-%0,
%1		2.00				%6-%0, %2-%1, %4-%1,
%2		3.00				%6-%1, %4-%2, %6-%2,
%4		4.00				%6-%4
%6		5.00				

Tablo 21 incelendiğinde, RTFOT deneyi sonrası DSR test sonuçlarının (64°C, 70°C) her bir sıcaklık değeri için 3 ölçüm olmak üzere, her bir katkı oranı için toplam 6 ölçüm yapılmıştır), orijinal asfalta ilave edilen katkı oranlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [ $Q_k = 24.00$ ;  $p < .05$ ]. Bu farkın hangi katkı oranı veya katkı oranlarına ilişkin bir fark olduğunu belirlemek amacı ile ikili gruplar arası “Wilcoxon İşaret Sıralaması Testi (Wilcoxon mached-paires signed ranks)” uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün katkı oranlarının, katkısız asfalta göre DSR değerini artırmada etkili olduğu ancak bu artışı en çok %6 katkı oranının sağladığı görülmüştür.

RTFOT deneyi öncesi ve sonrası penetrasyon değerleri arasında anlamlı bir ilişkinin olup olmadığını tespit edebilmek için ilgili ölçüm değerlerine basit korelasyon analizi uygulanmıştır. Spearman’s rho korelasyon testi, verilerin normal dağılım göstermediği durumlarda kullanılır [235]. Deneylerden elde edilen veriler normal dağılım göstermediği için korelasyon analizinde Spearman’s rho korelasyon testi kullanılmıştır ve ilgili sonuçlar Tablo 22’de verilmiştir.

Ek Tablo 22. RTFOT deneyi öncesi ve sonrası Penetrasyon değerlerinin karşılaştırılması

	RTFOT Öncesi Penetrasyon	RTFOT Sonrası Penetrasyon
%0 RTFOT Öncesi	1	
%0 RTFOT Sonrası	.991**	1
%1 RTFOT Öncesi	1	
%1 RTFOT Sonrası	.916**	1
%2 RTFOT Öncesi	1	
%2 RTFOT Sonrası	.866**	1
%4 RTFOT Öncesi	1	
%4 RTFOT Sonrası	.879**	1
%6 RTFOT Öncesi	1	
%6 RTFOT Sonrası	.911**	1

Sperman's rho testi sonucunda tüm katkı oranları için RTFOT öncesi penetrasyon değerleri ile RTFOT sonrası penetrasyon değerleri arasında pozitif yönlü kuvvetli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. İki değişken arasında pozitif bir ilişkinin olması, X değişkenindeki değerlerin artması durumunda Y değişkenine ait değerlerin de artma eğiliminde olduğunu ya da X değerlerinin düşmesi durumunda Y değerlerinin de düşme eğiliminde olduğunu gösterir [234]. Bu bağlamda tüm katkı yüzdeleri için RTFOT deneyi öncesi penetrasyon değerlerinin RTFOT deneyi sonrasında düşme eğiliminde olduğu ve aralarında kuvvetli bir ilişki bulunduğu söylenilebilir.

RTFOT deneyi öncesi yumuşama noktası değerleri ile RTFOT deneyi sonrası yumuşama noktası değerleri arasında anlamlı bir ilişkinin olup olmadığını tespit edebilmek için ilgili ölçüm değerlerine Spearman's rho korelasyon testi uygulanmıştır. Tablo 23'de Spearman's rho testi sonuçları verilmiştir.

Ek Tablo 23. RTFOT deneyi öncesi ve sonrası Yumuşama Noktası değerlerinin karşılaştırılması

	RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası	RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası
%0 RTFOT Öncesi	1	
%0 RTFOT Sonrası	.778**	1
%1 RTFOT Öncesi	1	
%1 RTFOT Sonrası	.704**	1
%2 RTFOT Öncesi	1	
%2 RTFOT Sonrası	.943**	1
%4 RTFOT Öncesi	1	
%4 RTFOT Sonrası	.841**	1
%6 RTFOT Öncesi	1	
%6 RTFOT Sonrası	.949**	1

Sperman's rho testi sonucunda tüm katkı oranları için RTFOT deneyi öncesi yumuşama noktası değerleri ile RTFOT deneyi sonrası yumuşama noktası değerleri arasında pozitif yönlü kuvvetli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda tüm katkı yüzdeleri için RTFOT deneyi öncesi yumuşama noktası değerlerinin RTFOT deneyi sonrasında artma eğiliminde olduğu ve aralarında kuvvetli bir ilişki bulunduğu söylenilebilir.

RTFOT deneyi öncesi ve sonrası DSR testi değerleri arasında anlamlı bir ilişkinin olup olmadığını tespit edebilmek için ilgili ölçüm değerlerine Spearman's rho korelasyon testi uygulanmıştır. Tablo 24'de Spearman's rho testi sonuçları verilmiştir.

Ek Tablo 24. RTFOT deneyi öncesi ve sonrası DSR testi değerlerinin karşılaştırılması

	RTFOT Öncesi DSR testi	RTFOT Sonrası DSR testi
%0 RTFOT Öncesi	1	
%0 RTFOT Sonrası	.986**	1
%1 RTFOT Öncesi	1	
%1 RTFOT Sonrası	.956**	1
%2 RTFOT Öncesi	1	
%2 RTFOT Sonrası	.928**	1
%4 RTFOT Öncesi	1	
%4 RTFOT Sonrası	.943**	1
%6 RTFOT Öncesi	1	
%6 RTFOT Sonrası	.971**	1



Sperman's rho testi sonucunda tüm katkı oranları için RTFOT deneyi öncesi ve sonrası DSR değerleri arasında pozitif yönlü kuvvetli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda tüm katkı yüzdeleri için RTFOT deneyi öncesi DSR değerlerinin RTFOT deneyi sonrasında artma eğiliminde olduğu ve aralarında kuvvetli bir ilişki bulunduğu söylenilebilir.

Ek Tablo 25. Dinamik Sünme Deneyi Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları

Katkı Oranı	N	Sıralama Ortalamaları	Sd	X <sup>2</sup>	P	Fark
%0	10	5.00	4	40.00	.000	%1-%0, %2-%0, %4-%0,
%1		4.00				%6-%0, %2-%1, %4-%1,
%2		2.92				%4-%2, %6-%1, %6-%2,
%4		2.00				%6-%4
%6		1.08				

Tablo 25 incelendiğinde, dinamik sünme değerlerinin, orijinal asfalta ilave edilen katkı oranlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [ $Q_k = 40.00$ ;  $p < .05$ ]. Bu farkın hangi katkı oranı veya katkı oranlarına ilişkin bir fark olduğunu belirlemek amacı ile ikili gruplar arası “Wilcoxon İşaret Sıralaması Testi (Wilcoxon matched-paires signed ranks)” uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün katkı oranlarının, katkısız asfalta göre dinamik sünme modülü değerini artırmada etkili olduğu ancak bu artışı en çok %6 katkı oranının sağladığı görülmüştür.

Ek Tablo 26. Statik Sünme Deneyi Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları

Katkı Oranı	N	Sıralama Ortalamaları	Sd	X <sup>2</sup>	P	Fark
%0	7	5.00	4	28.00	.000	%1-%0, %2-%0, %4-%0,
%1		4.00				%6-%0, %2-%1, %4-%1,
%2		2.92				%4-%2, %6-%1, %6-%2,
%4		2.00				%6-%4
%6		1.08				

Tablo 26 incelendiğinde, statik sünme değerlerinin, orijinal asfalta ilave edilen katkı oranlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [ $Q_k = 28.00$ ;  $p < .05$ ]. Bu farkın hangi katkı oranı veya katkı oranlarına ilişkin bir fark olduğunu

belirlemek amacı ile ikili gruplar arası “Wilcoxon İşaret Sıralaması Testi (Wilcoxon mached-paires signed ranks)” uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün katkı oranlarının, katkısız asfalta göre statik sünme değerini artırmada etkili olduğu ancak bu artışı en çok %6 katkı oranının sağladığı görülmüştür.

Ek Tablo 27. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi Deformasyonlar Friedman Two-Way ANOVA analizi sonuçları

Katkı Oranı	N	Sıralama Ortalamaları	Sd	X <sup>2</sup>	P	Fark
%0	12	5.00	4	47.254	.000	%1-%0, %2-%0, %4-%0,
%1		4.00				%6-%0, %2-%1, %4-%1,
%2		2.92				%4-%2, %6-%1, %6-%2,
%4		2.00				%6-%4
%6		1.08				

Tablo 27 incelendiğinde, indirekt çekme yorulma deneyinde deformasyon değerlerinin, orijinal asfalta ilave edilen katkı oranlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [ $Q_k = 47.254$ ;  $p < .05$ ]. Bu farkın hangi katkı oranı veya katkı oranlarına ilişkin bir fark olduğunu belirlemek amacı ile ikili gruplar arası “Wilcoxon İşaret Sıralaması Testi (Wilcoxon mached-paires signed ranks)” uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bütün katkı oranlarının, katkısız asfalta göre deformasyonu azaltmada etkili olduğu ancak bu artışı en çok %6 katkı oranının sağladığı görülmüştür.

## ÖZGEÇMİŞ

Bahadır YILMAZ 1983 yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2002 yılında kazanmış olduğu Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2006 yılında bitirerek İnşaat Mühendisi unvanı aldı. 2006-2007 yılları arasında askerlik görevini Siirt İl Jandarma Komutanlığı bünyesinde bitirdikten sonra Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Bu süre zarfında özel inşaat firmalarında kalite kontrol mühendisi ve şantiye şefi olarak çalıştı. 2010 yılında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Aynı yıl yüksek lisans programından mezun oldu ve Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Evli ve bir çocuk babası olan YILMAZ iyi derecede İngilizce bilmekte ve halen Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki görevine devam etmektedir.