

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**FARKLI BİYOKÜTLELERİN PİROLİZİNDEN
ELDE EDİLEN BİYOÇARLARIN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU

Doktora Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ulaştırma Bilim Dalı

OCAK, 2020

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Ulaştırma Bilim Dalı

Doktora Tezi

FARKLI BİYOKÜTLELERİN PİROLİZİNDEN
ELDE EDİLEN BİYOÇARLARIN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Tez Yazarı
Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU

Danışman
Prof. Dr. Mehmet YILMAZ

OCAK, 2020
ELAZIĞ

T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı: Farklı Biyokütlelerin Pirolizinden Elde Edilen Biyoçarların Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Yazarı: Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU

İlk Teslim Tarihi: 4.12.2019

Savunma Tarihi: 3.1.2020

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mehmet YILMAZ
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

İmza

Onayladım

Başkan: Prof. Dr. Necati KULOĞLU
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Onayladım

Üye: Prof. Dr. Baha Vural KÖK
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Onayladım

Üye: Prof. Dr. Ali TOPAL
Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Onayladım

Üye: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL
İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Soner ÖZGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Farklı Biyokütlelerin Pirolizinden Elde Edilen Biyoçarların Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

03/01/2020

Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU



ÖNSÖZ

Esnek üstyapılarda çoğunlukla petrolün rafinajından elde edilen bitümlü bağlayıcılar kullanılmaktadır. Petrol kaynaklı malzemelerin kullanımının neden olduğu çevre, rezerv ve ekonomi ile ilgili kaygılar, petrol rezervine bağlı olarak azalan bitüm miktarı karayolu sektöründe bitümlü malzemelerin performansını arttıracak alternatif malzemeler üzerine çalışmaların artmasına neden olmuştur. Yenilenemeyen ve fosil kaynaklı malzemelerin kullanımının neden olduğu ekonomik ve çevresel sorunlar sürdürülebilirlik açısından çeşitli alternatif malzemelerin ve katkı maddelerinin karayolu sektöründe değerlendirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu tez çalışmasında, ülkemizde bol miktarda bulunan ve ekonomik değeri düşük olan kayısı çekirdeği kabuğu, ceviz kabuğu ve talaşın pirolizinden elde edilen biyoçarların karayolu üstyapılarının performansını arttırmak amacıyla bitüm katkı malzemesi olarak kullanılabilirlikleri araştırılmış, bu artık malzemelerden farklı bir alanda ekonomik fayda sağlanması hedeflenmiştir.

Yapmış olduğum tez çalışmasının hem ders hem de tez döneminde beni bilgisiyle ve emeğiyle hiç yalnız bırakmayan, bildiğim her şeyi kendisine borçlu olduğum sadece hocalığıyla değil insani yönüyle de her zaman örnek alacağım değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Mehmet YILMAZ' a öncelikle gönülden teşekkür ederim.

Kendilerinden ders alarak bilgilerinden istifade ettiğim ulaştırma ana bilim dalının değerli hocaları Prof. Dr. Necati KULOĞLU' na, Prof. Dr. Baha Vural KÖK' e ve Doç. Dr. Taner ALATAŞ' a şükranlarımı sunarım.

Tezimin özellikle laboratuvar çalışmaları sırasında yardıma her ihtiyaç duyduğumda yanımda olup bana dost ve kardeş olan Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AKPOLAT ve Araş. Gör. Dr. Erkut YALÇIN' a emeklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamızda kullandığımız biyokütlelerin pirolizlerinin yapılması sürecinde danışmanlığını esirgemeyen, gerekli piroliz cihazının tasarımında ve yaptırılmasında yardımcı olan biyomühendislik bölümünden başta sayın Prof. Dr. H. Soner ALTUNDOĞAN hocama ve Dr. Öğr. Üyesi Aykut TOPDEMİR' e destekleri için teşekkür ederim. Tez çalışmamı yaptığım sürede ihtiyaç duyduğum her an yardımına koşan İnşaat Müh. Böl. Teknisyenlerinden sayın Feti YETİK'e teşekkür ederim.

Maddi yönden tezimizi destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimine (FÜBAP), MF.18.33 numaralı projemi destekledikleri için teşekkür ederim.

Son olarak dualarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU
ELAZIĞ, 2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa

Önsöz	iv
İçindekiler	v
Özet	vii
Abstract	viii
Şekiller Listesi	ix
Tablolar Listesi	xiv
Simgeler ve Kısaltmalar	xvi
1. GİRİŞ	1
2. AMAÇ VE KAPSAM	4
3. BİTÜM, BİTÜMÜN YAPISI VE REOLOJİSİ	6
3.1. Bitüm	6
3.2. Bitümün Kimyasal Bileşimi	6
3.2.1. Bitümün Elementel Analizi	6
3.2.2. Çözünürlüğe Göre Bitümün Sınıflandırılması	8
3.2.3. Diğer Sınıflandırma Metodları	12
3.3. Bitümün Yapısı	12
3.3.1. Basit Koloidal Modeller	12
3.3.2. Karmaşık Bitüm Modelleri	14
3.3. Bitümün Bileşimi, Yapısı ve Reolojisi Arasındaki İlişki	15
3.3.1. Bitüm Bileşenlerinin Özelliklerine Etkisi	15
3.4. Bitümün Kullanım Döngüsü Boyunca Kimyasal Bileşimi ile Fiziksel Özellikleri Arasındaki İlişki	16
3.4.1. Bitüm İşleme ve Asfalt Üretimi Sırasında Meydana Gelen Değişiklikler	17
3.4.2 Bitümde Servis Ömrü Boyunca Meydana Gelen Yapısal Değişiklikler	17
3.4.3. Bitümün Oksidasyonu Sırasında Gözlenen Kimyasal Değişiklikler	18
4. BİYOKÜTLE	20
4.1. Biyokütle Çevrim Teknolojileri	26
4.1.1. Doğrudan Yakma	27
4.1.2. Havasız Çürütme	27
4.1.3. Fermantasyon	28
4.1.4. Gazlaştırma	28
4.1.5. Biyofotoliz	29
4.1.6. Piroliz	29
5. MATERYAL VE METOT	40
5.1. Malzeme Temini, Piroliz Sistemi ve Piroliz İşleminin Gerçekleştirilmesi	40
5.2. Çalışmada Kullanılan Ana Bağlayıcının Özellikleri ve SHRP Yöntemine Göre Uygun Bağlayıcı Sınıfı Seçilmesi	45
5.3. Çalışmada Kullanılan Agregası ve Özellikleri	49
Tablo 5.5. Kırmataş kalker agregasının özellikleri ve uygulanan deneyler [113]	49
5.4. Superpave Bağlayıcı Deneyleri	50
5.4.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)	50
5.4.2. Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV)	51
5.4.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi	52

5.4.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi	53
5.4.5. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi	56
5.4.6. Depolama Stabilitesi Deneyi	58
5.4.7. Elastik Geri Dönme ve Kuvvet Ölçümü Düktilite Deneyi	59
5.4.8. Çoklu Gerilme Uygulaması Sonrası Sünme-Elastik Geri Dönme (MSCR) Deneyi.....	61
5.5. Superpave Karışım Tasarımı	66
5.5.1. Tasarım Agregada Gradasyonu Seçimi.....	66
5.5.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Tasarım Bitüm İçeriklerinin Tespit Edilmesi	68
5.5.3. Marshall Stabilitesi ve Akma Deneyi	69
5.5.4. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi (AASHTO T 283)	70
5.5.5. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi.....	72
5.5.6. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi	74
5.5.7. Dinamik Sünme Deneyi	78
5.5.8. Kırılma Mekanik Yaklaşımlarıyla BSK'ların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi.....	82
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	92
6.1. Modifiye Bitümlerin Hazırlanması	92
6.2. Optimum Piroliz Sıcaklığının Belirlenmesi.....	92
6.3. Biyokütlelerin ve Piroliz Sonrası Elde Edilen Biyoçarların Malzeme Karakterizasyonu.....	100
6.4. Bağlayıcı Deney Sonuçları	103
6.4.1. Konvansiyonel Bağlayıcı Deney Sonuçları	104
6.4.2. Bağlayıcıların Superpave Yöntemine Göre Performans Seviyeleri	108
6.4.3. Dinamik Mekanik Analiz Deney Sonuçları.....	115
6.4.4. Elastik Geri Dönme ve Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deney Sonuçları.....	117
6.4.5. Çoklu Gerilme Uygulanması Sonrası Sünme-Elastik Geri Dönme (MSCR) Deney Sonuçları	118
6.4.6. Depolama Stabilitesi Deney Sonuçları	125
6.5. Superpave Yöntemine Göre Karışımların Tasarım Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi	134
6.5.1. PG 58-28 sınıfı Bağlayıcı ile Hazırlanan Sıcak Karışımların Tasarım Bitüm İçeriğinin Tespit Edilmesi	136
6.5.2. Modifiye Bağlayıcılar ile Hazırlanan Karışımların Tasarım Bitüm İçeriğinin Tespit Edilmesi.....	150
6.6. Marshall Stabilitesi ve Akma Deney Sonuçları.....	153
6.7. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deney Sonuçları	156
6.8. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları.....	162
6.9. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları	165
6.10. Dinamik Sünme Deney Sonuçları	179
6.11. Karışımların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi	186
7. SONUÇLAR	199
Kaynaklar	203
Özgeçmiş	a

ÖZET

Farklı Biyokütlelerin Pirolizinden Elde Edilen Biyoçarların Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2020, Sayfa: xvii + 211

Yenilenemeyen ve fosil kaynaklı malzemelerin kullanımının neden olduğu ekonomik ve çevresel sorunlar sürdürülebilirlik açısından çeşitli alternatif malzemelerin ve katkı maddelerinin karayolu sektöründe değerlendirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Dünyanın en büyük ve yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütle, çeşitli termokimyasal yöntemlerin uygulanmasından sonra karbonca zengin bir yapıya sahip olmalarından dolayı bitüm katkı malzemesi olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Piroliz işlemi sonucunda elde edilen katı ürüne biyoçar denilmektedir.

Bu tez çalışmasında, ülkemizde bol miktarda bulunan ve ekonomik değeri düşük olan kayısı çekirdeği kabuğu, ceviz kabuğu ve talaşın pirolizinden elde edilen biyoçarların karayolu üstyapılarının performansını arttırmak amacıyla bitüm katkı malzemesi olarak kullanılabilirlikleri araştırılmış, bu artık malzemelerden farklı bir alanda ekonomik fayda sağlanması hedeflenmiştir.

Çalışmada öncelikle biyokütleler farklı koşullarda piroliz işlemine tutulmuş, elde edilen biyoçarlar bitüm katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Hazırlanan bağlayıcılar üzerinde dinamik kayma reometresi deneyi uygulanarak optimum piroliz sıcaklığı ve en uygun katkı oranı tespit edilmiştir. Belirlenen koşullarda hazırlanan biyoçarlar kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmış, saf ve modifiye bağlayıcılar üzerine geleneksel ve Superpave bağlayıcı deneyleri uygulanmıştır. Bu bağlayıcılar kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım (BSK) numuneleri üzerinde ise Marshall stabilite ve akma, çekme dayanımı oranı, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma, çatlak ilerleyişine karşı dayanım ve dinamik sünme deneyleri uygulanarak biyoçarların BSK'ların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri geniş bir aralıkta değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan bitüm modifikasyonunda biyoçar kullanılması ile bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansının iyileştiği, düşük sıcaklık davranışının önemli oranda etkilenmediği belirlenmiştir. Karışım deneyleri sonucunda biyoçar modifiyeli bitüm kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların stabilite, rijitlik, yorulma ömrü, çatlak ilerleyişi ve kalıcı deformasyona karşı dayanımının arttığı, nem hasarına karşı dayanımının ise azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitümlü bağlayıcı, Biyokütle, Piroliz, Biyoçar, Bitümlü sıcak karışım

ABSTRACT

Investigation of the Usability of Biochars Obtained from the Pyrolysis of Different Biomasses in Bitumen and Bituminous Hot Mixtures

Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

January 2020, Pages: xvii + 211

Economic and environmental problems caused by using nonrenewable and fossil-based materials led to the need for utilizing various alternative material and additives in the highway industry in terms of sustainability.

Biomass, which is one of the largest and renewable energy sources in the world, has the potential to be used as bitumen additive materials thanks to its hydrocarbon structure provided by the application of various thermochemical methods. The additive product obtained from the pyrolysis process is called biochar.

In this thesis study, the usability of biochar obtained from ground apricot seed shell, ground walnut shell and sawdust pyrolysis, which are abundant in Turkey and have low economic value, was investigated as a bitumen additive material to improve the performance of highway pavements, and it was aimed to provide economic benefits from these waste materials in a different field.

In the study, biomasses were firstly subjected to the pyrolysis process in different conditions and the biochars obtained were used as bitumen additive materials. The dynamic shear rheometer test was conducted on the manufactured binders to determine optimum pyrolysis temperature and the most suitable ratio for additive. Modified bitumens were prepared by using biochars prepared under the designated conditions and traditional and Superpave binder tests were conducted on pure and modified binders. Marshall stability and flow, tensile strength ratio, indirect tensile stiffness modulus, indirect tensile fatigue, resistance to crack propagation and dynamic creep tests were conducted on hot mix asphalt (HMA) specimens manufactured by using these binders to evaluate the effects of biochars on HMAs' mechanical properties in a wide range.

Based on the results obtained, it was determined that the use of biochars in bitumen modification improved the high-temperature performance of bituminous binders and did not affect low-temperature behavior significantly. As a result of mixture tests, it was determined that using biochar-modified bitumen improved the stability, stiffness, fatigue life, crack propagation and resistance to permanent deformation of hot mix asphalt and diminished resistance to moisture damage.

Keywords: Bituminous binder, Biomass, Pyrolysis, Biochar, Hot mix asphalt

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Bitümün geniş kimyasal kompozisyonu analizinin (SARA) şematik gösterimi.....	9
Şekil 3.2. Doygunların kimyasal yapısının şematik gösterimi	9
Şekil 3.3. Aromatiklerin kimyasal yapısının şematik gösterimi	10
Şekil 3.4. Asfaltın kimyasal yapısının şematik gösterimi.....	11
Şekil 3.5. ‘SOL’ tipi bitümlerin şematik gösterimi	13
Şekil 3.6. ‘JEL’ tipi bitümlerin şematik gösterimi	13
Şekil 3.7. Asfaltın nano-agrega ve kümelerinin şematik gösterimi	14
Şekil 3.8. Karıştırma, serme ve hizmet ömrü boyunca bitüm bileşimindeki fraksiyonların değişimi	19
Şekil 4.1. Biyokütleli oluşturan kaynaklar	20
Şekil 4.2. Türkiye biyokütle enerji potansiyeli atlası (BEPA)	22
Şekil 4.3. Kayısı çekirdeği kabukları ve öğütüldükten sonra granül hali	23
Şekil 4.4. Kayısı çekirdeği granülüyle kumlaması tamamlanmış tank parçaları ve gövdesi	24
Şekil 4.5. Ceviz kabukları ve öğütüldükten sonra granül hali	24
Şekil 4.6. Farklı boyutlarda elenmiş talaşlar ve atık talaş yığını	25
Şekil 4.7. Biyokütle çevrim yöntemleri	26
Şekil 4.8. Piroliz ile biyoyağ elde edilmesi ve çeşitli distile biyoyağ örnekleri	31
Şekil 4.9. Bazı tarımsal artıklardan elde edilen biyoçar ürünleri.....	32
Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğu (a), ceviz kabuğu (b) ve talaş (c) biyokütlelerinin elendikten sonraki kısmı	40
Şekil 5.2. Yavaş piroliz deney düzeneğini oluşturan bölümler	41
Şekil 5.3. Laboratuvar yavaş piroliz deney düzeneğinin genel görünümü	41
Şekil 5.4. Biyokütlenin piroliz cihazına doldurulması ve deney sonrası elde edilen biyoçarın görünüşü	42
Şekil 5.5. Piroliz sonrası sıvı ürün olarak elde edilen biyoyağ örnekleri.....	42
Şekil 5.6. Optimum piroliz sıcaklığının ve biyoçar oranlarının belirlenmesi için deneysel plan	43
Şekil 5.7. Deneysel plan	44
Şekil 5.8. Elazığ iline ait en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının frekans dağılım eğrisi.....	47
Şekil 5.9. Elazığ için uygun bağlayıcı sınıfı seçimi.....	49
Şekil 5.10. Çalışmada kullanılmak üzere seçilen agrega gradasyonu	50
Şekil 5.11. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi.....	51
Şekil 5.12. PAV deney aleti	52
Şekil 5.13. Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi	53
Şekil 5.14. Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi	54
Şekil 5.15. Numunenin silikon kalıba doldurulması (a) ve üst plağa yerleştirilmesi (b).....	54
Şekil 5.16. DSR deneyinde numunelere uygulanan deformasyon yönleri	55
Şekil 5.17. Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özelliği	55

Şekil 5.18. Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi	56
Şekil 5.19. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti	57
Şekil 5.20. BBR deneyi için numune hazırlanması ve kalıptan çıkartılan numuneler	57
Şekil 5.21. Sünme oranının belirlenmesi	58
Şekil 5.22. Numune doldurularak ağzı kapatılmış tüplerin dik şekilde etüve yerleştirilmesi	59
Şekil 5.23. Etüvden çıkarılan tüplerin kesilmesi sonrası alt ve üst parçalarının görünümü	59
Şekil 5.24. Elastik geri dönme testinde uzayan numunelerin kesilmesi	60
Şekil 5.25. Kuvvet ölçümlü düktilite cihazı ve deney numuneleri	61
Şekil 5.26. 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyesinde 10 döngü için tipik MSCR test sonucu	62
Şekil 5.27. 19 mm maksimum boyut için maksimum yoğunluk gradasyonu	66
Şekil 5.28. 19 mm maksimum boyut için Superpave gradasyon limitleri	67
Şekil 5.29. Marshall stabilite ve akma aleti	69
Şekil 5.30. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması	71
Şekil 5.31. Çekme dayanımı deney düzeneği	72
Şekil 5.32. UMATTA aleti ve ITSM deney düzeneği	73
Şekil 5.33. Yorulma deney düzeneği	76
Şekil 5.34. Temsili deformasyon - yük tekrür sayısı ilişkisi	77
Şekil 5.35. Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi	79
Şekil 5.36. Dinamik sünme deney düzeneği	80
Şekil 5.37. Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi	81
Şekil 5.38. Akma sayısının bulunmasında karşılaşılan zorluklar	81
Şekil 5.39. Akma sayısının bulunması	82
Şekil 5.40. Kırılma modları	83
Şekil 5.41. BSK' lara uygulanan lineer elastik kırılma mekaniği deneyleri	85
Şekil 5.42. Kırılma deneylerinde en çok kullanılan deney geometrileri (a) Tek çentikli kiriş eğilme deneyi (b) Yarım daire eğilme deneyi (c) Disk şeklinde numune çekme deneyi	86
Şekil 5.43. SCB deneyinde asfalt karışımların elde edilen başlıca yük-deformasyon diyagram türleri (a) 10°C veya 1°C sıcaklıktaki elastik kırılma (b) 15°C sıcaklıktaki plastik göçme (uzama sertleşmesi yok) (c) 25°C veya daha yüksek sıcaklıkta oluşan uzama sertleşmesi	87
Şekil 5.44. YI değerinin belirlenmesi	88
Şekil 5.45. Yarım daire eğilme deney düzeneği	89
Şekil 5.46. Numuneye çentik açılması	89
Şekil 6.1. Biyoçarın saf bitüme ilave edilmesi ve yüksek kesmeli (high shear) modifiye bitüm mikseri	92
Şekil 6.2. Farklı piroliz sıcaklıklarında elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin G* değerleri ..	93
Şekil 6.3. Farklı piroliz sıcaklıklarında elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin faz açısı (δ°) değerleri	94
Şekil 6.4. Farklı sıcaklıklarda pirolizden elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin kalıcı modül (G') değerleri	95

Şekil 6.5. Farklı sıcaklıklarda pirolizden elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin kayıp modül (G") değerleri	97
Şekil 6.6. Farklı sıcaklıklarda pirolizden elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin tekerlek izi parametreleri ($G^*/\sin \delta$)	98
Şekil 6.7. Kül fırını ve krozelerin sabit tartıma getirilmesi	100
Şekil 6.8. Nem tayini cihazı	101
Şekil 6.9. Ceviz kabuğu (a), kayısı çekirdeği kabuğu (b) ve talaş (c) biyoçarlarının SEM görüntüleri	103
Şekil 6.10. Saf ve modifiye bağlayıcıların penetrasyon değerleri	104
Şekil 6.11. Saf ve modifiye bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri	105
Şekil 6.12. Saf ve modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksi değerleri	106
Şekil 6.13. Saf ve modifiye bağlayıcıların 135 ve 165°C sıcaklıktaki viskozite değerleri	106
Şekil 6.14. Saf bağlayıcının viskozite-sıcaklık ilişkisi	107
Şekil 6.15. Farklı sıcaklıklardaki kompleks modül (G^*) değerlerinin katkı türü ve oranı ile değişimi	109
Şekil 6.16. Farklı sıcaklıklardaki orijinal (yaşlandırılmamış) bağlayıcıların faz açısı (δ°) değerlerinin katkı türü ve oranı ile değişimi	109
Şekil 6.17. Farklı sıcaklıklardaki orijinal bağlayıcıların tekerlek izi ($G^*/\sin \delta$) parametrelerinin sıcaklık ve katkı türü ile değişimi	110
Şekil 6.18. Kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların tekerlek izi ($G^*/\sin \delta$) parametreleri	111
Şekil 6.19. Bağlayıcıların farklı frekanstaki G^* ana eğrileri ((a) Ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümler (b) Kayısı çekirdeği biyoçarı modifiyeli bitümler (c) Talaş biyoçarı modifiyeli bitümler) ...	115
Şekil 6.20. Aynı oranda katkı içeren modifiye bitümlerin farklı frekanstaki G^* ana eğrileri ((a) %5 katkı içeriği (b) %10 katkı içeriği (c) %15 katkı içeriği) ve çalışmada kullanılan oranlarda katkı içeren modifiye bitümlerin ana eğrileri (d)	116
Şekil 6.21. Bağlayıcıların kuvvet-deformasyon ilişkisi	117
Şekil 6.22. Farklı sıcaklıklarda 3.2 kPa'daki sünme uyumunun (a), 0.1kPa'daki sünme uyumunun (b), 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyesindeki yüzdesel farkın değişimi (c)	119
Şekil 6.23. Farklı sıcaklıklarda 3.2 kPa'daki ortalama yüzde geri dönmenin (a), 0.1kPa'daki ortalama yüzde geri dönmenin (b), ortalama yüzde geri dönmenin yüzdesel farklılığındaki değişim (c)	120
Şekil 6.24. Saf bağlayıcının 52°C (a), 58°C (b), 64°C (c) sıcaklıktaki şekil değiştirme-zaman grafiği	121
Şekil 6.25. %10T modifiyeli bağlayıcının 52°C (a), 58°C (b), 64°C (c) sıcaklıktaki şekil değiştirme-zaman grafiği	122
Şekil 6.26. %15C modifiyeli bağlayıcının 52°C (a), 58°C (b), 64°C (c) sıcaklıktaki şekil değiştirme-zaman grafiği	123
Şekil 6.27. %15K modifiyeli bağlayıcının 52°C (a), 58°C (b), 64°C (c) sıcaklıktaki şekil değiştirme-zaman grafiği	124
Şekil 6.28. Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon deney sonuçları	125
Şekil 6.29. Depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası deney sonuçları	127
Şekil 6.30. Depolama stabilitesi tüplerinden elde edilen bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite deney sonuçları	128
Şekil 6.31. Depolama stabilitesi tüplerinden elde edilen bağlayıcıların 165°C sıcaklıktaki viskozite deney sonuçları	128
Şekil 6.32. Depolama stabilitesi tüplerinin alt kısımlarından elde edilen numunelerin G^* değerleri	130

Şekil 6.33. Depolama stabilitesi tüplerinin üst kısmından elde edilen numunelerin G^* değerleri	131
Şekil 6.34. Ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi sonrası G^* değerleri.....	132
Şekil 6.35. Kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi sonrası G^* değerleri	133
Şekil 6.36. Talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi sonrası G^* değerleri	133
Şekil 6.37. Cooper yoğurmalı sıkıştırıcı	140
Şekil 6.38. Sıkıştırılan numunelerin yoğunluk eğrileri ve ortalaması	141
Şekil 6.39. Karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri	147
Şekil 6.40. Karışımların hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm içeriği ile değişimleri	148
Şekil 6.41. PG58-28 ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan BSK'ların hacimsel özellikleri.....	152
Şekil 6.42. Deneye tabi tutulan numunelerin bir kısmının görünüşü	155
Şekil 6.43. Karışımlarının stabilize ve MQ değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi	155
Şekil 6.44. Karışım numunelerinin çekme dayanımı değerleri.....	160
Şekil 6.45. Karışımlarının çekme dayanımı oranlarının katkı kullanımı ile değişimi	161
Şekil 6.46. Karışımların ITSM değerlerinin sıcaklıkla (a) ve katkı türü ile (b) değişimi	164
Şekil 6.47. Yorulma deneyi sonrasında numunelerin görünüşü	166
Şekil 6.48. Karışımların 250 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	170
Şekil 6.49. Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	170
Şekil 6.50. Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	171
Şekil 6.51. Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı (N_i) – karışım türü ilişkisi	172
Şekil 6.52. Yorulma ömrü (N_f) – karışım türü ilişkisi	173
Şekil 6.53. Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N_p) – karışım türü ilişkisi	174
Şekil 6.54. Maksimum yük tekrar sayısı – katkı türü ilişkisi	175
Şekil 6.55. N_i değerindeki deformasyon miktarı – katkı türü ilişkisi	176
Şekil 6.56. N_f değerindeki deformasyon miktarı – katkı türü ilişkisi	176
Şekil 6.57. N_{mak} değerindeki deformasyon miktarı – katkı türü ilişkisi.....	177
Şekil 6.58. $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı – katkı türü ilişkisi	178
Şekil 6.59. Karışımların yorulma ömür diyagramları.....	179
Şekil 6.60. Dinamik sünme deneyi sonrasında numunelerin görünüşü	180
Şekil 6.61. Saf karışımın akma sayısının bulunmasına bir örnek	181
Şekil 6.62. Karışımların %5 E_c değerine kadar kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi	183
Şekil 6.63. Karışımların %5 kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısı ve akma sayısı değerleri	183
Şekil 6.64. Karışımların 15.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri	184
Şekil 6.65. Karışımların 15.000 yük tekrarındaki esneklik modülü değerleri	185
Şekil 6.66. Karışımların 15.000 yük tekrarındaki sünme modülü değerleri	185
Şekil 6.67. Döner testere ile numunelerin yarım daire şeklinde kesilmesi	187

Şekil 6.68. Deney numunelerine çentik açılması ve değişik yükseklikte çentiğe sahip numuneler	187
Şekil 6.69. Yarım daire eğilme deney düzeneği	188
Şekil 6.70. Hızı ayarlanabilir Marshall cihazının dijital göstergesi.....	188
Şekil 6.71. 1 cm çentiğe sahip numunelerin yük deformasyon ilişkisi.....	189
Şekil 6.72. Maksimum yük – katkı türü ilişkisi.....	193
Şekil 6.73. Maksimum yük anındaki deformasyon – katkı türü ilişkisi	194
Şekil 6.74. Maksimum yüke kadar yük–deformasyon eğrisi altında kalan alan–katkı türü ilişkisi.....	194
Şekil 6.75. Maksimum yükten yük boşalınca kadar yük – deformasyon eğrisi altında kalan alan –.....	195
katkı türü ilişkisi	195
Şekil 6.76. Yükün boşaldığı andaki deformasyon – katkı türü ilişkisi	196
Şekil 6.77. Yük – deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan – katkı türü ilişkisi	196
Şekil 6.78. Karışımların J_c değerleri.....	197

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. 01.01.2019 tarihi itibari ile ülkemizin yol ağı uzunluğu (km)	1
Tablo 3.1. Akaryakıt külünün içerdiği metalik elementler	7
Tablo 3.2. Farklı kaynaklardan elde edilen bitümlerin elementel analizi	7
Tablo 3.3. 100 penetrasyonlu bir bitümün tipik elementel analizi	11
Tablo 3.4. Damıtılmış ve hava üflenerek üretilmiş bitümün kimyasal kompozisyonlarının karşılaştırılması	17
Tablo 4.1. Biyokütle kaynakları, çevrim yöntemleri ve elde edilen yakıtların uygulama alanları.....	26
Tablo 5.1. Saf bağlayıcı deney sonuçları	45
Tablo 5.2. Elazığ'ın 33 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri	46
Tablo 5.3. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları	47
Tablo 5.4. %50 ve %98 güvenilirlik seviyeleri için hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları	48
Tablo 5.5. Kırmataş kalker agregasının özellikleri ve uygulanan deneyler	49
Tablo 5.6. Bağlayıcı sınıfına bağlı olarak PAV deney sıcaklıkları	52
Tablo 5.7. DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri	56
Tablo 5.8. MSCR testi için trafik hızına ve seviyesine göre bağlayıcı seçimi	61
Tablo 5.9. Asfalt bağlayıcı performans seviyesi sınıflandırması	64
Tablo 5.9. Asfalt bağlayıcı performans seviyesi sınıflandırması (Devamı)	65
Tablo 5.10. Superpave karışım gradasyonları	68
Tablo 5.11. Superpave karışım gradasyon limitleri	68
Tablo 5.12. Yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneylerinin karşılaştırılması	75
Tablo 6.1. Biyokütle ve biyoçarların proximate ve elementel analiz sonuçları	102
Tablo 6.2. Dönel viskozite deney sonuçları	108
Tablo 6.3. RTFOT sonrası bağlayıcıların kütle kayıpları	111
Tablo 6.4. Uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları.....	113
Tablo 6.5. Bağlayıcıların BBR deney sonuçları.....	113
Tablo 6.6. Bağlayıcıların Superpave performans seviyeleri	113
Tablo 6.7. PG 58-X ve PG 64-X Superpave bağlayıcı şartnamesi.....	114
Tablo 6.8. Bağlayıcıların elastik geri dönme yüzdeleri ve kuvvet ölçüm düktilite alanları	117
Tablo 6.9. PG ve MSCR testine göre performans seviyeleri	120
Tablo 6.10. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların MSCR testinden elde edilen sonuçları.....	124
Tablo 6.11. Agrega özgül ağırlıkları	135
Tablo 6.12. Deneme karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları	138
Tablo 6.13. Taşıt sayısına göre sıkıştırma parametreleri.....	139
Tablo 6.14. Deneme karışımlarının ölçülen hacim özgül ağırlıkları.....	140
Tablo 6.15. Numunelerin %5,107 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri	141

Tablo 6.16. Karışımın Nini ve Ndes'deki %Gmm değerleri.....	143
Tablo 6.17. Deneme karışımlarının sıkıştırma hesap özeti	144
Tablo 6.18. Deneme karışımlarının sıkıştırma sonuçları ve şartname kriterleri.....	146
Tablo 6.19. Farklı bitüm içeriklerinde sıkıştırılan karışım numunelerinin fiziksel özellikleri.....	146
Tablo 6.20. Karışım numunelerinin yoğunluk değerleri ve hacim özellikleri.....	147
Tablo 6.21. Karışımların %5,08 tasarım bitüm bağlayıcı içeriğindeki özellikleri	149
Tablo 6.22. Maksimum yoğurma sayısında sıkıştırılan numunelerin Gmm ve Gmb değerleri.....	149
Tablo 6.23. Numunelerin Nmaks.'da %5,08 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri.....	149
Tablo 6.24. Karışım numunelerinin Nmaks,'da %5,08 bitüm içeriğindeki yoğunluk değerleri	150
Tablo 6.25. Karışımların %5,08 tasarım bitüm içeriğindeki özellikleri.....	150
Tablo 6.26. PG58-28 ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri	151
Tablo 6.27. Marshall stabilite ve akma deney sonuçları	154
Tablo 6.28. Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	158
Tablo 6.29. Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	159
Tablo 6.30. Karışım numunelerin ITSM deney sonuçları.....	163
Tablo 6.31. Karışımların 250 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları.....	167
Tablo 6.32. Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları.....	168
Tablo 6.33. Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları.....	169
Tablo 6.34. Yorulma deneyinden elde edilen değerler	179
Tablo 6.35. Numunelerin dinamik sünme deney sonuçları.....	182
Tablo 6.36. Kısa dönem yaşlandırılmış 1 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları.....	190
Tablo 6.37. Kısa dönem yaşlandırılmış 2 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları.....	191
Tablo 6.38. Kısa dönem yaşlandırılmış 3 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları.....	192
Tablo 6.39. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanmış numunelerin J_c değerleri	197

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

s	: Standart sapma
T20mm	: Yüzeyden 20 mm derinlikteki kaplama tasarım yüksek sıcaklığı
Thavamaks	: En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı
E	: Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemi
Tmin	: Kaplama yüzeyindeki tasarım düşük sıcaklığı
Thavamin	: En düşük 1 günlük ortalama hava sıcaklığı
G*	: Kompleks kayma modülü
G*/sinδ	: Tekerlek izi parametresi
δ	: Faz açısı
P1, P2, PN	: Her bir agrega grubunun ağırlıkça yüzdesi
G1, G2, GN	: Her bir agrega grubunun hacim ve zahiri özgül ağırlığı
Vba	: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi
Pb	: Bağlayıcı yüzdesi
Ps	: Agrega yüzdesi
Gb	: Bağlayıcının özgül ağırlığı
Va	: Hava boşluğu hacmi
VFA	: Bitümle dolu boşluk
VMA	: Agregalar arası boşluk
Vbe	: Efektif bağlayıcı hacmi
Sn	: Agrega karışımındaki nominal maksimum elek boyutu
Pbi	: Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi
Ws	: Agreganın ağırlığı
Wb	: Toplam agrega ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı
Gmm	: Asfalt karışımının maksimum özgül ağırlığı
Gmb	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
P0,075	: Karışımında kullanılan 0,075 mm'lik (No. 200) elekten geçen filler malzemesinin agrega karışımındaki ağırlıkça yüzdesi
Gb	: Asfaltın özgül ağırlığı
Gse	: Agrega karışımının efektif özgül ağırlığı
VMA	: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi
VFA	: Asfaltla dolu mineral agregadaki boşluk yüzdesi
Wm	: Numunenin ağırlığı
γsu	: Suyun yoğunluğu
Vmx	: Numunenin hesapla bulunan hacmi
d	: Kalıbın çapı
hx	: Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği
C	: Düzeltme faktörü
Gmb(ölçülen)	: Sıkışmış numunenin ölçülen hacim özgül ağırlığı
Gmb(tahmini)	: Sıkışmış numunenin hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı
Gmb(düz.)	: Herhangi bir yoğurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı
DP	: Filler oranı
h	: Numune yüksekliği
J	: Absorbe su hacmi
B'	: Vakum işleminden sonra numunenin doymun kuru yüzey ağırlığı
B	: Vakum işleminden önce numunenin doymun kuru yüzey ağırlığı
S'	: Doymunluk derecesi
I	: Hava boşluğu hacmi
V	: Numune hacmi
TS	: Çekme dayanımı
Pmak	: Kırılmaya neden olan maksimum yük
TSyaş	: Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değeri
TSkuru	: Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değeri
F	: İndirekt çekme rijitlik modülü deneyinde maksimum dikey yük
H	: 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon

L	: Ortalama numune yüksekliği
R	: Poisson oranı
Sm	: Bitümün Rijitlik modülü
Nf	: Yorulma ömrü
k1 ve k2	: Malzeme karakteristikleri
rp	: Çatlak ilerleme oranı
Np	: Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı
δf	: Bozulma anında toplam deformasyon
δi	: Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu
K	: Kısa dönem yaşlandırılmış numune
KŞ	: Kısa dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numune
Ni, Nf, Nmak	: Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayıları
δi, δf, δmak	: Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarları
R2	: Belirtme katsayısı

Kısaltmalar

AASHTO	:American Association of State Highway and Transportation Official (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
BBR	: Kiriş Eğme Reometresi
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)
ESDY	: Eşdeğer Standart Tek Dingil Yüğü
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)
İÇYD	: İndirekt Çekme Yorulma Deneyi
IEC	: İyon Değişim Kromatografisi
ITS	: Indirect Tensile Strenght (İndirekt Çekme Mukavemeti)
ITSM	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (İndirekt Çekme Rijitlik Modülü)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LVDT	:Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü)
MSCR	: Multiple Stress Creep Recovery (Çoklu Gerilme Sünme-Elastik Geri Dönme)
MQ	: Marshall Quotient (Marshall Oranı)
PAV	: Pressure Aging Vessel (Basınçlı Yaşlandırma Kabı)
PG	: Performance Grade (Performans Sınıfı)
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Viskozimetre)
RTFOT	: Rolling Thin Film Oven Test (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi)
SEC	: Boyut Dışlama Kromatografisi
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavement (Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama)
SHRP	: Strategic Highway Research Program (Stratejik Otoyol Araştırma Programı)
TSR	: Tensile Strength Ratio (Çekme Dayanımı Oranı)
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafineleri Anonim Şirketi
UMATTA	: Universal Material Testing Apparatus (Üniversal Malzeme Deney Aleti)

1. GİRİŞ

Bitümlü sıcak karışımları oluşturan iki ana unsur agrega ve bitümlü malzemelerdir. Bitümlü bağlayıcıların karışımdaki ana görevi bitümlü sıcak karışımların (BSK) kohezyonunu sağlamaktır. Agregalar ise karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcılar ayrıca agrega tanelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmasını önlemekte, oluşturdukları düzgün yüzeyler ile sürüş konforunu sağlamakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcılar, temel olarak hidrokarbonlar ve türevlerini içeren, trikloretilen içerisinde çözülebilen, uçucu olmayan ve ısıtıldığında gittikçe yumuşayan, viskoz bir sıvı veya katı bir madde olarak tanımlanmaktadır. Esnek üstyapı kaplama tabakalarını oluşturan iki ana unsurdan biri olan bitümlü bağlayıcılar, petrolün rafinajından elde edilmektedir.

Yenilenemeyen bir kaynak olan petrolün, 2016 verilerine göre 51 yıllık rezervi bulunmaktadır [1]. Karayolu endüstrisi, esnek kaplama yapımında kullanılan ve bir petrol ürünü olan bitümlü bağlayıcıların gittikçe azalması ve fiyatların artması sorunu ile karşı karşıyadır. Bitümlü bağlayıcı fiyatları ile ilgili yapılan çalışmalarda 2006-2011 yılları arasında fiyatların %25 arttığı tespit edilmiştir. Raporlarda her geçen yıl ihtiyaç duyulan asfalt talebinin artacağı buna bağlı olarak fiyatların sürekli olarak yükseleceği belirtilmiştir [2].

Ekonomik gelişme ve nüfus artışına bağlı olarak sürekli yükselen ulaşım talebi sebebiyle yapılan yeni yollar ve mevcut yolların bakımı, ihtiyaç duyulan bitümlü bağlayıcı miktarını arttırmaktadır. Ülkemizde 2019 yılı verilerine göre karayolu kaplamalarının %58,41'i sathi kaplama iken %35,76'sı bitümlü sıcak karışım kaplıdır. İlerleyen dönemde Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) bünyesinde bulunan yolların tamamının bitümlü sıcak karışım (BSK) ile kaplanacağı öngörülmektedir. Bu durum önümüzdeki yıllarda çoğunluğu ithal bir ürün olan bitümlü bağlayıcılardan önemli oranda kullanılacağını göstermektedir. Ayrıca günümüzde BSK uygulamalarının çoğunda kullanılan ve çoğunlukla yurtdışından ithal edilen katkı maddelerinin kullanımı da önümüzdeki yıllarda artarak devam edecektir. Tablo 1.1'de 01.01.2019 tarihi itibarı ile ülkemizin sathi cinsine göre yol ağı görülmektedir.

Tablo 1.1. 01.01.2019 tarihi itibarı ile ülkemizin yol ağı uzunluğu (km) [3]

Yol Sınıfı	Asfalt Betonlu	Sathi Kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Geçit Vermez	Toplam Uzunluk
Otoyollar	2159	-	-	-	-	-	2159
Devlet Yolları	17520	13115	58	27	-	301	31021
İl Yolları	4403	26218	232	537	443	2320	34153
Toplam	24082	39333	290	564	443	2621	67333

Fosil kaynaklı malzemelerin kullanımının neden olduğu ekonomik ve çevresel sorunlar sürdürülebilirlik açısından çeşitli alternatif malzemelerin ve katkı maddelerinin karayolu sektöründe değerlendirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Sahip olduğu coğrafya, iklim koşulları, tarım arazisi potansiyeli ve güneşlenme süresi gibi etkenler sayesinde Türkiye, tarımsal kökenli (bitkisel, hayvansal ve su), orman kökenli (talaş, ağaç kabuğu ve kozalak gibi), kentsel ve endüstriyel kökenli (belediye çöplükleri, kanalizasyon ve endüstriyel atıklar) biyokütle kaynakları açısından zengindir. Özellikle bir tarım ülkesi olması açısından Türkiye’de çok çeşitli ürünler yetiştirilebilmektedir. Bunun sonucunda tarım alanlarından büyük miktarlarda biyokütle ortaya çıkmaktadır (yaklaşık 50-65 milyon ton/yıl).

Dünyanın en büyük ve yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütle, çeşitli termokimyasal yöntemlerin uygulanmasından sonra bitüm katkı malzemesi olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir [4]. Biyokütlelerin kısa zamanda yenilenebilir ve hidrokarbon yapıya sahip olması, bunların kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliğini ön plana çıkarmıştır. Biyokütlelerden ekonomik değeri yüksek olan ürünler elde etmek için çeşitli çevrim yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olarak kullanılan yöntem pirolizdir. Organik malzemelerin oksijensiz ortamda ve yüksek sıcaklık altında termokimyasal bozunması işlemine piroliz (karbonizasyon) denilmektedir. Bu bozunma sonucunda katı, sıvı ve gaz fazlarında ürünler elde edilmektedir. Piroliz sonucunda elde edilen ürünlerin gaz fazına biyogaz, sıvı ürüne biyoyağ, ve katı ürüne ise biyoçar denilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında ülkemizde bol miktarda bulunan ve ekonomik değeri düşük olan üç çeşit biyokütle (öğütölmüş kayısı çekirdeğı kabuğı, öğütölmüş ceviz kabuğı ve talaş) farklı sıcaklıklarda piroliz işlemine tabi tutularak biyoçar ve biyoyağlar elde edilmiştir. Biyoçarla modifiye edilen bağlayıcılar performans açısından değerlendirilerek optimum piroliz sıcaklığı belirlenmiştir. Belirlenen optimum piroliz sıcaklığında biyoçarlar üretilmiş ve farklı oranlarda bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Katkılı bağlayıcılar üzerinde geleneksel ve Superpave bağlayıcı deneyleri uygulanarak her biyoçar için en uygun oran seçilerek bitümlü sıcak karışım (BSK) numuneleri hazırlanmıştır. Her bir biyoçar katkılı bağlayıcı için Superpave yöntemine göre tasarım bitüm içerikleri belirlenmiş ve bunlara göre karışım numuneleri hazırlanarak bunlar üzerinde Marshall stabilite ve akma, çekme dayanımı oranı, indirekt çekme rijitlik modölü, indirekt çekme yorulma, çatlak ilerleyişine karşı dayanım deneyleri yapılmıştır. Biyokütlelerin pirolizinden elde edilen biyoçarların bitümlü bağlayıcıların reolojik ve BSK’ların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri geniş bir aralıkta değerlendirilmiştir. Böylece ülkemizde bol miktarda bulunan ve uluslararası arenada daha önce denenmemiş biyokütlelerin biyoçarlarının karayolu üstyapılarının performansını arttırmak amacıyla bitüm katkı malzemesi olarak kullanılabilirlikleri araştırılarak bu atık malzemelerden farklı bir alanda ekonomik fayda

sağlanması, bu malzemelerin kullanılması halinde yolların bakım ve onarım giderlerinin azaltılması veya geciktirilmesi amaçlanmıştır.



2. AMAÇ VE KAPSAM

Esnek üstyapılarda çoğunlukla petrolün rafinajından elde edilen bitümlü bağlayıcılar kullanılmaktadır. Petrol kaynaklı malzemelerin kullanımının neden olduğu çevre, rezerv ve ekonomi ile ilgili kaygılar, petrol rezervine bağlı olarak azalan bitüm miktarı karayolu sektöründe bitümlü malzemelerin performansını arttıracak alternatif malzemeler üzerine çalışmaların artmasına neden olmuştur.

Dünyanın en geniş ve sürdürülebilir kaynaklarından olan biyokütle, petrol kökenli ürünlerin içerdiği sabit karbona sahip olması dolayısıyla önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyokütle, çeşitli termokimyasal yöntemlerin uygulanmasından sonra geleneksel petrol ürünlerinin yerine kullanılabilir. Bu nedenle çalışmanın

Bilindiği üzere bitümlü bağlayıcılar karbon esaslı malzemelerdir. Bu nedenle çalışmanın ana konusunu doğal ve organik atık malzemelerin piroliz (karbonizasyon) işlemine tabi tutulmasıyla elde edilen karbonca zengin ve bu özelliğiyle bitümle uyumlu olan biyoçarların, bitümlü bağlayıcıların reolojik ve bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması oluşturmaktadır.

Yapılan çalışmayla;

- Farklı biyokütle kaynaklarından tam olarak karbonize olmuş biyoçar elde edilmesi için piroliz işleminde gerekli olan sıcaklığın belirlenmesi,
- Farklı oranlarda biyoçarların bitümlü bağlayıcılara ilave edilmesi ile bitümün reolojik özelliğinin iyileştirilmesi,
- Biyoçar içeren bitümlü bağlayıcıların Superpave şartnamesine göre performans seviyelerinin belirlenmesi,
- Saf bitüm ve biyoçar içeren bağlayıcılarla tasarım bitüm içeriklerinde karışım numunelerinin hazırlanması ve bu numuneler üzerinde çeşitli karışım deneylerinin yapılması, bu deneylerle farklı kaynaklardan elde edilen biyoçarların bitümlü sıcak karışımların stabilitesine, rijitliğine, nem hasarına, kalıcı deformasyona ve yorulma çatlaklarına karşı dayanımına etkisinin geniş bir çerçevede incelenmesi, faydalı yönlerinin tespit edilmesi,
- Farklı biyokütlelerin pirolizinden elde edilen biyoçarların bağlayıcı ve karışım deneyleri sonucunda bitüm katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi,
- Bir petrol ürünü olan bitümün modifikasyonunda kullanılan maddelere alternatif bir kaynak önerilmesi ve bu amaçla Türkiye'de bol miktarda bulunan doğal ve organik atık malzemelerin kullanılabilirliğinin belirlenmesi,

- Elde edilecek olumlu sonuçlar doğrultusunda ekonomik faydanın yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik açısından da biyokütlelerin karayolu sektöründe değerlendirilmesinin sağlayacağı faydaların ortaya koyulması,
- Çalışmanın sonuçlarının uluslararası dergilerde paylaşılmasıyla biyomalzemelerin karayolu sektöründe kullanımı ile ilgili ülkemizdeki sınırlı sayıdaki literatüre zenginlik kazandırılması,
- Yapılacak çalışmalarla yakın gelecekte çok daha yaygın olarak kullanılabilecek biyokütle kaynakları ve bunların farklı bir alanda kullanılmasıyla ülke ekonomisine sağlayacağı faydalar hakkındaki bilgi birikiminin artmasına katkıda bulunulması amaçlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında ülkemizde bol miktarda bulunan ve ekonomik değeri düşük olan biyokütlelerin (öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğu, öğütülmüş ceviz kabuğu ve talaş) pirolizinden elde edilen biyoçarların karayolu üstyapılarının performansını arttırmak amacıyla bitüm katkı malzemesi olarak kullanılabilirlikleri araştırılmıştır. Yurtdışında biyokütle ürünlerinin bitümlü bağlayıcılara katkı maddesi olarak kullanımı üzerine çalışmalar bulunmasına rağmen bu tez çalışmasında ülkemizde bol miktarda bulunan ve uluslararası alanda daha önce denenmemiş biyokütlelerin biyoçarları bitüm katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Böylece bu atık malzemelerden farklı bir alanda ekonomik fayda sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca BSK'lar üzerinde olumlu etkilerinin belirlenmesi, bu malzemelerin kullanılması halinde yolların bakım ve onarım giderlerinin azaltılması veya geciktirilmesini sağlayacağı düşünülmektedir.

3. BİTÜM, BİTÜMÜN YAPISI VE REOLOJİSİ

3.1. Bitüm

Bitüm, doğrusal alifatik, sikloalifatik ve aromatik türevlerden oluşan organik bileşiklerin bir karışımıdır. Doğrusal alifatik bileşikler, n-heptan gibi doymuş doğrusal karbon bileşiklerdir. Sikloalifatik bileşikler; doymuş karbon atomlarından oluşan halka yapıları (sikloheksan v.b.) veya düşük sayıda doymamış gruba sahip siklik yapılardan (sikloheksen v.d.) ve aromatik bileşiklerden en az bir aromatik halkaya sahip bileşiklerdir (benzen v.b.). Moleküller arasındaki etkileşim ve karışımdaki diğer moleküllerin seyreltme etkisi bitümün özelliklerine yansımaktadır. Çok çeşitli bileşikler ve bu bileşiklerin bitümden bitüme değişen çeşitliliği, bireysel izolasyonlarını ve tanımlanmasını zorlaştırmaktadır [5].

Bitümün bileşenleri genellikle çözünürlük, polarite veya hidrodinamik boyut gibi parametrelere dayanarak sınıflara ayrılmaktadır. Hidrodinamik boyut, bir molekül veya moleküler kümeleşme (örneğin bir kolloidal partikül) bir çözücü içerisindeki kapladığı hacmi ifade eder. Bu hacim, çözücüdeki moleküllerin, moleküle veya kümelenmiş moleküle tutunmasını içermekte olup kullanılan çözücünün yanı sıra moleküler yapıya da bağlı olarak değişmektedir.

Bitümü karakterize etmenin en yaygın yöntemi onun reolojisidir. Reoloji, maddenin akışı ve deformasyonu ile ilgilenen bilimdir. Bir bitümün belirli bir sıcaklıktaki reolojik özellikleri, malzemedeki moleküllerin hem denklemi (kimyasal bileşimi) hem de geometrik yapısı (fiziksel düzeni) ile ilişkilidir. Atom sayısındaki, geometrik yapısındaki ya da her ikisindeki değişiklikler, reolojik davranışta değişime neden olmaktadır. Bu nedenle bitüm reolojisindeki değişiklikleri anlamak için, bitümün moleküler yapısının ve geometrisinin reolojiyi etkilemek için nasıl bir etkileşime girdiğinin bilinmesi gerekmektedir [5].

3.2. Bitümün Kimyasal Bileşimi

3.2.1. Bitümün Elementel Analizi

Bitüm büyük ölçüde hidrokarbon moleküllerinden oluşmakla birlikte bazı heterosiklik türler ve kükürt, azot ve oksijen atomları bulunduran fonksiyonel gruplar da içermektedir [6-8]. Bitüm ayrıca eser miktarda nikel, vanadyum, demir, kalsiyum ve magnezyum gibi metalleri; metalik tuzlar, oksitler veya porfirin şeklindeki yapıları içermektedir. Porfirinler doğal olarak meydana gelen karmaşık organik bileşiklerdir: örneğin, kanda bulunan hemoglobin ve yeşil bitkilerde bulunan klorofil, metal atomlarıyla ilişkili porfirin örnekleridir. Porfirinler dört azot atomu içerir ve bu atomlar birer metal atomuna bağlanabilirler bu sayede metaloporfirin

oluştururlar. Farklı ham petrollerden üretilse de elementel analizler sonucu bitümler genel olarak; % 82-88 karbon, % 8-11 hidrojen, % 0-1.5 oksijen, % 0-6 sülfür ve % 0-1 azot içermektedir.

1930’larda yapılan demir ve vanadyumu tanımlayan analitik çalışmalar sayesinde bitümlerin metaloporfirik içerdiği bilinmektedir. Buna bağlı olarak deniz bitkileri klorofili ve petrolün kaynağı arasındaki bağlantı kurulabilmiştir. Ultraviyole emisyon spektrofrafisi ile yapılan incelemede akaryakıt külünün aşağıdaki metalik elementleri içerdiği gösterilmiştir (Tablo3.1) [9] .

Tablo 3.1. Akaryakıt külünün içerdiği metalik elementler [9]

Alüminyum	Kurşun	Sodyum
Baryum	Magnezyum	Stronsiyum
Kalsiyum	Manganez	Tantal
Krom	Molibden	Kalay
Bakır	Uranyum	Vanadyum
Nikel	Potasyum	Çinko
Galyum	Silikon	Zirkonyum
Demir	Gümüş	Lantan

Bu elementler esas olarak petrolün ağır bileşikler yada uçucu olmayan bileşiklerinde bazıları inorganik atık olarak koloidal formda bazıları ise tuzu olarak (örneğin karboksilik asit), geçiş metal kompleksleri yada porfirin tipi bileşikler olarak bulunurlar. Çeşitli kaynaklardan elde edilen bitümlerin analizi Tablo 3.2.'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Farklı kaynaklardan elde edilen bitümlerin elementel analizi [9]

	Karbon %w	Hidrojen %w	Nitrojen %w	Sülfür %w	Oksijen %w	Nikel ppm	Vanadyum ppm
Aralık Ortalama	80,2-84,3 82,8	9,8-10,8 10,2	0,2-1,2 0,7	0,9-6,6 3,8	0,4-1,0 0,7	10-139 83	7-1590 254
	Demir ppm	Manganez ppm	Kalsiyum ppm	Magnezyum ppm	Sodyum ppm	Atomik oran H/C	
Aralık Ortalama	5-147 67	0,1-3,7 1,1	1-335 118	1-134 26	6-159 63	1,42-1,50 1,47	

Çoğu akaryakıtta mevcut olan baskın metaller sodyum, vanadyum, demir, nikel ve krom olup, sodyumun çoğu sodyum klorür olarak bulunmaktadır. Vanadyum ve nikel büyük ölçüde porfirin yapıları halkaya bağlı çok sayıdaki değişik grupları (bir molekülün merkez yapısına eklenmiş çeşitli organik gruplar) içeren ve yapısal izomeri (organik moleküllerdeki grupların farklı pozisyonlarda bulunması sonucu molekül denklemi değişmeden kimyasal ve fiziksel

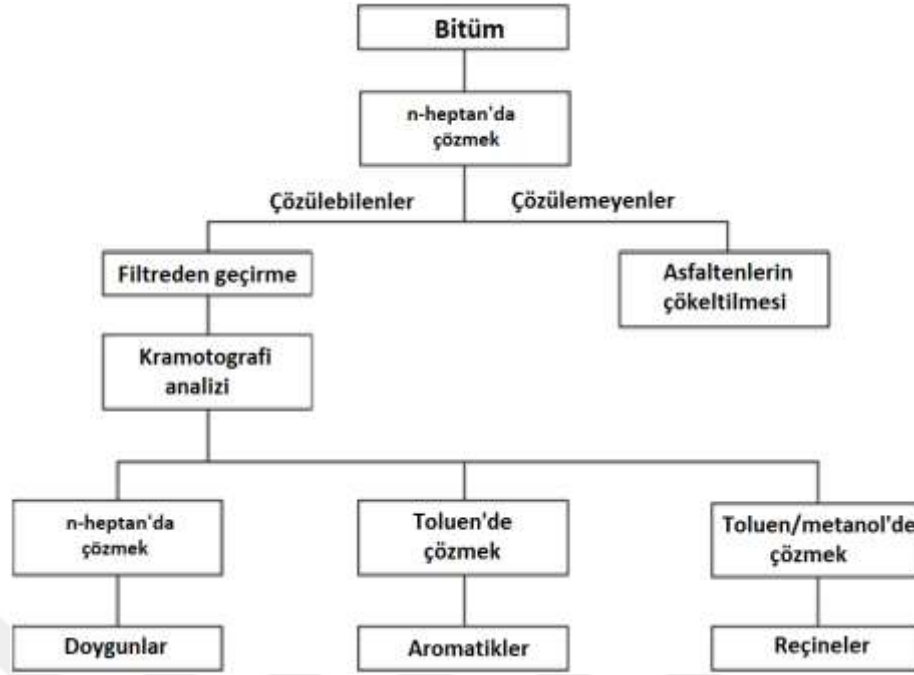
özelliklerin değişmesi hali) şeklinde bulunur. Bitüm ve akaryakıt ilişkili ürünler olup, Goodrich benzer elementlerin bitümlü bileşiklerde bulunacağını tahmin etmektedir [10]. Bitümün ham petrol kaynağına, imalat işlemi ve yaşlandırma sırasında meydana gelen kimyasal modifikasyonlara göre yapısı değişmektedir.

Bitümün kimyasal bileşiminin karmaşık olmasından dolayı tam bir analizini yapmak ve yapılan analizlerin reolojik özelliklerle korelasyonu son derece zor olmaktadır. Ek olarak, elde edilen veri kümesi genel olarak bitüm için değil, sadece belirli bir bitüm numunesi için geçerli olmaktadır. Geleneksel olarak, bitüm, asfalten ve malten denilen iki geniş kimyasal gruba ayrılmıştır. Maltenler ayrıca doymuş, aromatikler ve reçineler olarak üç alt gruba bölünebilirler. Bu dört grubun sınırları net olarak çizilmemiştir ve bir miktar çakışma olmaktadır. Bununla birlikte, bu sınıflandırma bitüm reolojisinin geniş kimyasal bileşimine ve kompozisyonuna göre ayarlanmasını mümkün kılmaktadır. Çözücü ekstraksiyonu nispeten hızlı bir teknik olduğu için çekicidir [11] ancak elde edilen ayırma, bir çözücü etkisinin seçici adsorpsiyon ile birleştirildiği kromatografi tekniği ile elde edilen sonuçtan daha zayıftır. Benzer şekilde, basit adsorpsiyon yöntemleri [12] elüsyon çözeltisinin sürekli olarak kolondan aşağı doğru ilerlerken taze adsorban ve farklı denge koşullarına tekrar maruz kaldığı kolon kromatografisi kadar etkili değildir.

1987 yılında ABD kongresi, Stratejik Karayolları Araştırma Programı'nı (SHRP) - 5 yıllık uygulamalı araştırma girişimi- ABD karayollarının bozulma koşullarıyla mücadele etmek, bu yolların; performansını, dayanıklılığını, güvenliğini ve verimliliğini artırmak için teknik ve teknolojiler geliştirmek ve değerlendirmek için görevlendirmiştir [13]. SHRP bitüm kimyasını araştırmak için yapılan çalışmanın bir parçası olarak, bileşenleri fonksiyonel gruplarının doğasına ve moleküler ağırlıklarına göre ayırmak için yöntemler geliştirilmiştir.

3.2.2. Çözünürlüğe Göre Bitümün Sınıflandırılması

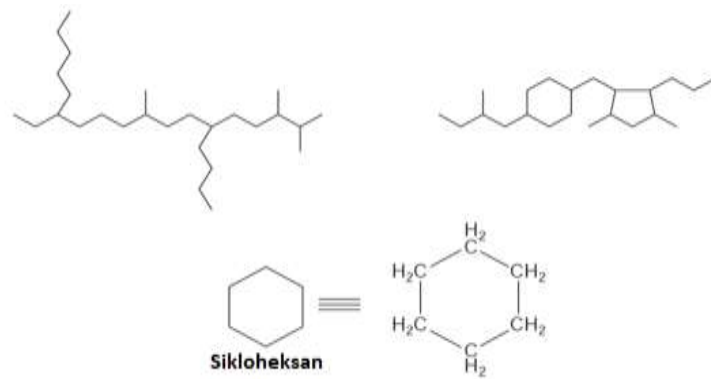
Kromatografik teknikler bitüm oluşumunu tanımlamak için en yaygın kullanılan yöntemlerdir [14-15]. Bu yöntemlerin temeli, başlangıçta n-heptan kullanılarak asfaltenleri çöktürmek ve ardından kalan bileşenlerin/fraksiyonların kromatografik olarak ayrılmasıdır. Bu tekniği kullanarak bitüm, doymuşlar, aromatikler, reçineler ve asfaltenler (SARA) olarak dört gruba ayrılabilir. Bu dört geniş bileşen grubunun ve metalik bileşenlerin temel özellikleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Bitümün geniş kimyasal kompozisyonu analizinin (SARA) şematik gösterimi [14-15]

Doygunlar

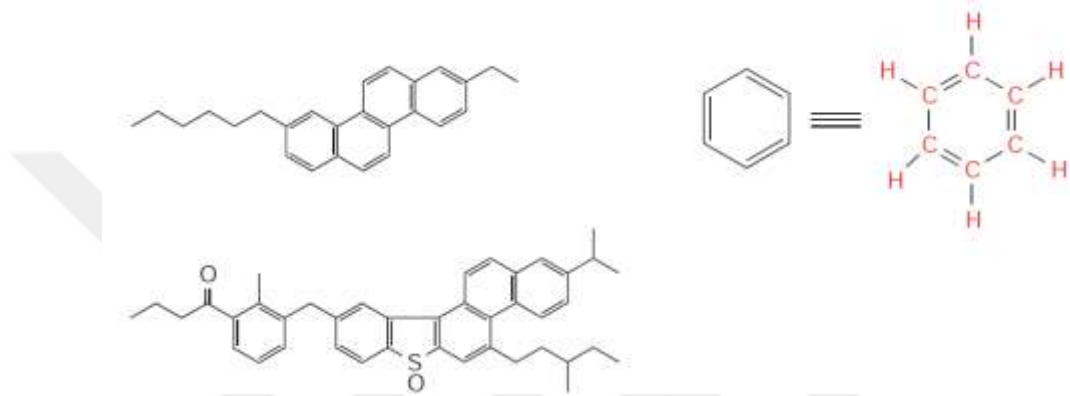
Doygunlar, sikloalifatik bileşiklerle birlikte düz ve dallı zincirli alifatik hidrokarbonlardan oluşmaktadır. Bunlar saman renginde veya renksiz polar olmayan viskoz yağlar olup doymuş fraksiyonun hidrojen-karbon molar oranı (H/C) yaklaşık olarak 2'dir [16]. Ortalama moleküler kütlenin 470 ile 880 g/mol arasında değiştiği bilinmektedir. Bu fraksiyon bitümün % 5-20' sini oluşturmaktadır. Şekil 3.2.'de iki farklı doymuş yapı ve sikloheksanın yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Doymuşların kimyasal yapısının şematik gösterimi [16]

Aromatikler

Aromatikler, bitümdeki en düşük molekül ağırlıklı naftenik aromatik bileşikler içermekte ve peptidlenmiş asfaltenler için dağılıma ortamının ana oranını temsil etmektedir. Aromatikler toplam bitümün % 40-65'ini oluşturan koyu kahverengi viskoz sıvılardır. Bitümde aromatik fraksiyonun H/C oranının 1,4 ile 1,6 arasında olduğu söylenebilir. Ortalama moleküler ağırlık aralığı 570-980 g/mol kadardır [16]. Aromatikler doymamış halka sistemlerine bağlı polar olmayan karbon zincirlerinden oluşmaktadırlar (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Aromatiklerin kimyasal yapısının şematik gösterimi [16]

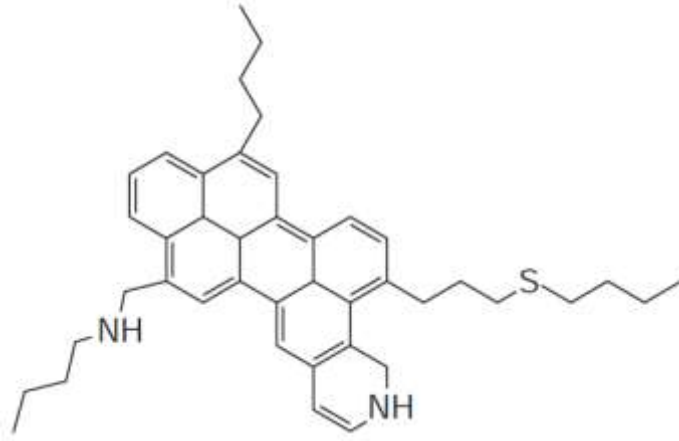
Reçineler

Reçineler n-heptan içinde çözünebilen, büyük ölçüde hidrojen ve karbondan oluşan ve az miktarda oksijen, kükürt ve azot atomu içeren yapılardır. Koyu kahverengi renginde, katı ya da yarı katı olmakta, doğada kutupsal ve kuvvetli bir şekilde yapışkandırlar. Reçineler, asfaltenler için dağıtıcı maddeler veya peptizerlerdir. Reçinelerin asfaltenlere oranı, bir dereceye kadar bitümün çözelti veya jelatinli karakterini düzenlemektedir. Bitümden ayrılan reçinelerin 780 ila 1400 g/mol arasında değişen molekül ağırlığına ve 1,4-1,7'lik H/C atomik oranına sahip oldukları tespit edilmiştir.

Asfaltenler

Asfaltenler, karbon ve hidrojene ek olarak bazı azot, kükürt ve oksijen atomları içeren n-heptan'da çözünmeyen siyah veya kahverengi amorf katı maddelerdir. Asfaltenler genellikle oldukça yüksek moleküler ağırlıklı yüksek polar ve karmaşık aromatik malzemeler olarak kabul edilir. Moleküler ağırlıkların belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılmakla beraber yaygın olarak 800 ila 3500 g/mol arasında değişen çeşitli değerler verirler. Buhar basıncına dayanan yöntemlere göre osmo-metrik ölçümleri sonucunda asfaltenlerin 0,98 ila 1,6 H/C oranına sahip oldukları belirlenmiştir [16]. Parçacık büyüklükleri 2-5 nm arasındadır. Asfalten içeriği bir bitümün reolojik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Asfalten içeriğinin artırılması,

daha düşük penetrasyon, daha yüksek bir yumuşama noktası ve sonuç olarak daha yüksek viskozite ile daha sert, daha viskoz bir bitüm ortaya çıkartır. Asfaltenerler, bitümün % 5-25'ini oluşturmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, asfaltenerlerin bir preparatif veya kromatografik metot kullanarak artan bir çözünürlük parametresi ile çözücülerde çözünürlüklerine bağlı olarak daha fazla alt birimlere ayrılabilceğini göstermiştir [17]. Asfaltenerin tipik kimyasal yapısı Şekil 3.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Asfaltenerlerin kimyasal yapısının şematik gösterimi [17]

Kromatografik yöntem, n-heptan'da çözünmeyen asfaltenerleri üç alt fraksiyona ayırmaktadır. Ekstraktif çözücünün çözünürlük parametresi arttıkça, asfaltener alt fraksiyonlarında nispi miktarlarda aromatik kaynaşık halka yapılarının arttığı görülmüştür. Bu yöntem ile bitümde bulunan asfaltenerlerin yapısını ve türünü daha fazla incelemek mümkün olabilmektedir. Tablo 3.3.'te 100 mm penetrasyon değerine sahip bir bitümün dört grubunun tipik elementel analizi detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.3. 100 penetrasyonlu bir bitümün tipik elementel analizi [18]

	Bitümdeki oranı %w	Karbon %w	Hidrojen %w	Nitrojen %w	Sülfür %w	Oksijen %w	Atomik oran H/C
Asfaltenerler (n-heptan)	5,7	82,0	7,3	1,0	7,8	0,8	1,1
Reçineler	19,8	81,6	9,1	1,0	5,2	-	1,4
Aromatikler	62,4	83,3	10,4	0,1	5,6	-	1,5
Doygunlar	9,6	85,6	13,2	0,05	0,3	-	1,8

3.2.3. Diğer Sınıflandırma Metodları

Bitüm bileşenleri, iyon değişim kromatografisi (IEC) tekniği kullanılarak kutuplarına göre gruplara ayrılabilir [19]. Bu teknik bitümü güçlü asit, zayıf asit, güçlü baz, zayıf baz ve nötr fraksiyon olmak üzere beş bileşene ayırır. Bu bileşenlerin yapısal analizi, element analizi ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile gerçekleştirilirken, fraksiyon moleküler ağırlıkları, buhar basıncı osmo-metrisi ile belirlenmektedir. Fonksiyonel grupların fraksiyonlar içindeki özellikleri, dağılımı ve bir bitüm numunesinden elde edilen ayrı fraksiyonların reolojisi de incelenebilmektedir.

IEC tekniğinin deney değişkenlerine karşı hassas olduğu belirtilmiştir. Bu teknikte numunelerin geri kazanılması asla tam olarak sağlanamamaktadır. Yaşlanma meydana gelmiş bitüm numunelerini analiz ederken, reçineye kalıcı olarak adsorbe edilen numune miktarı, orijinal bitüm numuneleri için gözlenenden daha fazla olmaktadır.

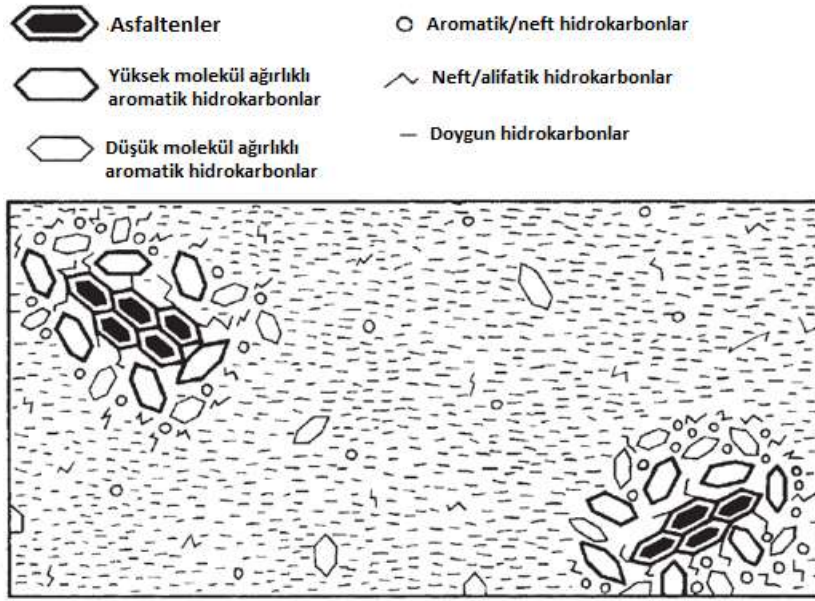
Bitüm bileşenlerinin hidrodinamik hacimlerine dayalı olarak boyut dışlama kromatografisi (SEC) yöntemi kullanılarak fraksiyonlarına ayrılması diğer bir tekniktir. Bitümün bileşenlerine, molekül boyutuna veya ilişkili moleküllerin boyutuna göre ayrılması için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. IEC ile karşılaştırıldığında, SEC tekniğini kullanarak numunelerin geri kazanımı daha yüksek olmaktadır. Elde edilen fraksiyonlar üzerinde viskozite ve reolojik çalışmalar yapılmış, oksidasyon ürünleri olan sülfoksitleri ve ketonları içeren reaksiyonların düşük molekül ağırlıklı fraksiyonlarda mevcut olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, bu moleküllerin diğer moleküllerle kolayca polar gruplarla etkileşmediği gösterilmiştir [19].

3.3. Bitümün Yapısı

3.3.1. Basit Kolloidal Modeller

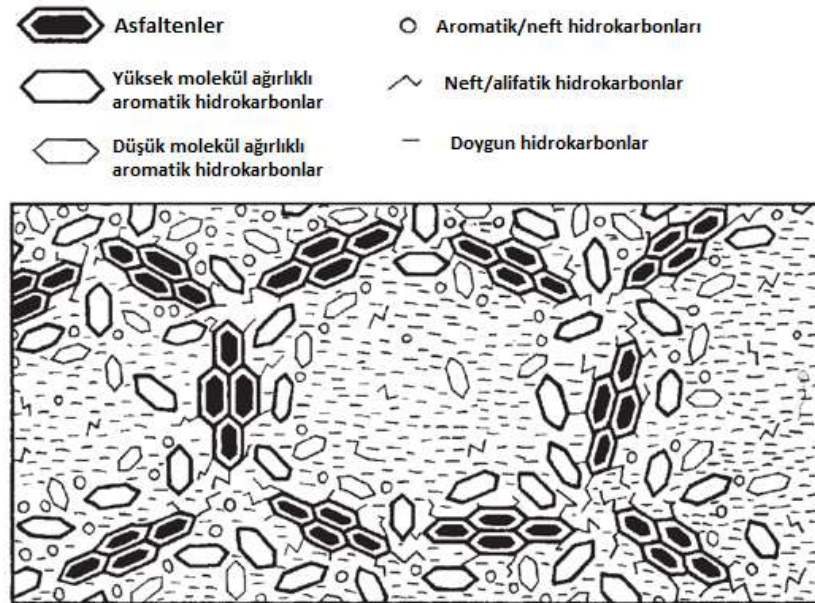
Bitüm, geleneksel olarak, düşük molekül ağırlıklı yağlı bir ortamda (maltenler) dağılmış veya çözünmüş yüksek moleküler ağırlıklı asfaltin kümeciklerinden oluşan bir kolloidal sistem olarak kabul edilmektedir [20]. Bu kümecikler, dengeleyici bir çözücü tabaka olarak işlev gören emilmiş bir aromatik reçineler kılıfıyla birlikte asfaltin olarak kabul edilirler. Kümecinin ortasından uzaklaştıkça, daha az polar aromatik reçinelere doğru geçiş olur ve bu tabakalar dışarı doğru uzandıkça daha az aromatik yağlı dağılım ortamına geçilir. Yeterli miktarda reçine ve yeterli çözme gücüne sahip aromatiklerin varlığında, asfaltinler tamamen peptize olur ve elde edilen bu kümecikler bitüm içinde iyi bir hareketliliğe sahip olur.

Bunlar Şekil 3.5' de gösterilen 'SOL' tipi bitümler olarak bilinirler.



Şekil 3.5. 'SOL' tipi bitümlerin şematik gösterimi [20]

Aromatik/reçine fraksiyonu, bu kümecikleri peptitlemek için yeterli miktarda mevcut değilse veya yetersiz çözme gücüne sahipse, asfaltenler birlikte daha fazla etkileşime girebilirler. Bu durumda bağlı kümeciklerin düzensiz ve yapısında boşlukların bulunmasına neden olur. Bu iç boşluklar ise kümecikler arası karışık yapılı sıvı ile dolar. Bunlar Şekil 3.6' da gösterildiği gibi, 'JEL' tipi bitümler olarak bilinirler. Bunlara çatı kaplama amacıyla kullanılan oksitlenmiş bitümler örnek olarak gösterilebilirler.

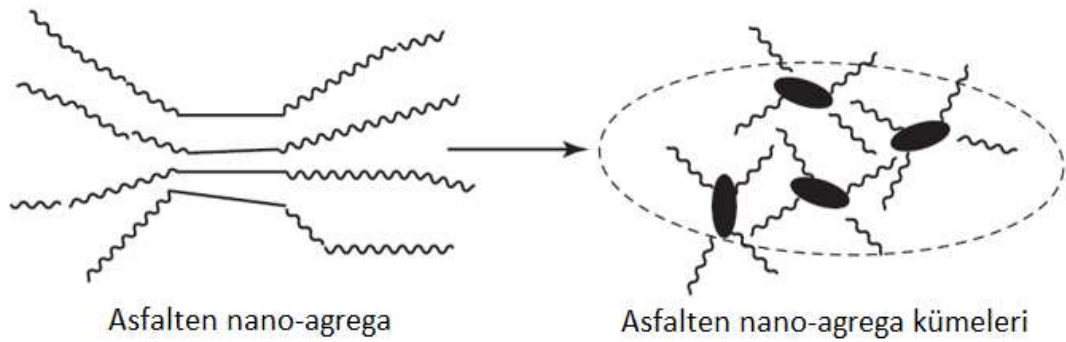


Şekil 3.6. 'JEL' tipi bitümlerin şematik gösterimi [20]

Asfaltlenlerin bitümdeki koloidal davranışı, topaklanma ve çözölmelerinden kaynaklanmaktadır. Asfaltlenlerin peptitleştirilme derecesi, sistemin sonuçtaki viskozitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Bu etkiler artan sıcaklıkla azalır ve bazı bitömenlerin jel karakteri, yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında kaybolabilir. Doymuşların, aromatiklerin ve reçinelerin viskoziteleri, moleküler ağırlık dağılımına ve moleköller arasındaki etkileşime bağılıdır. Moleküler ağırlık arttıkça ve etkileşim derecesi arttıkça viskozite de artar. Sürekli fazın (yani maltenlerin) viskozitesi, dağılmış fazın (yani asfaltlenlerin) varlığı ile bitöme artan doğal bir viskozite kazandırır. Sürekli fazın (yani maltenlerin) viskozitesi, bitömin doğal viskozitesini verir ve buda dağınık fazın (yani asfaltlenlerin) varlığı ile artar. Doymuş fraksiyonlar, maltenlerin asfaltlenleri çözme kabiliyetlerini azaltmaktadır. Çünkü yüksek doygün içerikler asfaltlenlerin belirgin bir şekilde topaklanmasına yol açabilmektedir. Buna göre, jel karakterindeki bir artış ve bitüm için daha düşük bir sıcaklık bağımlılığı sadece asfaltlen içeriğinden değil doygün içeriğinden de kaynaklanmaktadır.

3.2.2. Karmaşık Bitüm Modelleri

Dickie ve Yen (1967), çalışmalarında farklı bir koloidal sistem modeli önermişlerdir. Bu kolloidal sistem, üst üste istiflenerek oluşmuş asfaltlenlerden oluşmaktadır [21].



Şekil 3.7. Asfaltlen nano-agrega ve kümelerinin şematik gösterimi [21]

Bu modeldeki asfaltlenler “ada” yapısı olarak bilinen yapılara (başka bir ifade ile, alifatik yan zincirlere sahip merkezi bir poliaromatik çekirdek olan yerler) uyarlar. Asfaltlenlerin polyaromatik çekirdekleri bu istiflenme davranışına neden olur. Mullins tarafından sadeleştirilen modelde, asfaltlen istiflerinin “nano agrega” olarak adlandırılan yapıları oluşturduğunu öne sürölmektedir [22]. Bu nano-agregalar birlikte kümeler oluşturmaktadır (Şekil 3.7).

Bu modelde nano-agregaların yaklaşık altı asfaltlen molekölü tarafından oluşturulduğu öne sürölmektedir. Asfaltlenlerin poliromatik çekirdeğinin, ortalama olarak yedi kaynaşık aromatik

halka içerdği belirtilmektedir. Nano-agregaların asfaltın kümeleri, bitümün kolloidal kısmını oluşturmaktadır.

Asfaltın nano-agregasyonu ile ilgili alternatif birleşme modeli Gray ve arkadaşları tarafından önerilmiştir [23]. Bu öneride asfaltın, aynı zamanda asfaltın molekülünün “ada” dizilimini de doğrulamaktadır. Burada nano-agregasyon, aromatik çekirdek istiflemenin yanı sıra hidrojen bağı, Brøndsted asit-baz etkileşimleri, metal kompleks oluşumu ve hidrofobik grup etkileşimlerine dayanmaktadır. Bu modelde önerilen asfaltın nano-agrega yapısı Dickie ve Yen-Mullins tarafından önerilen nano-agrega yapısına kıyasla moleküllerin rastgele dağıldığını benimsemektedir.

Yapılan diğer çalışmalar, “ada” tipine uyan asfaltın ek olarak, “takımadalar” tipi asfaltın da mevcut olduğunu göstermiştir. Bu asfaltın tiplerinin her ikisinin de var olduğu öne sürülmüştür [24]. “Takımadalar” tipi asfaltın, “ada” tipi asfaltın için önerilen alifatik zincirlerle tutturulmuş merkezi büyük birleşmiş çekirdeğin aksine alifatik zincirlerle birbirine bağlanmış birkaç kaynaşmış aromatik gruptan oluşur. Asfaltın nano-agreganın iç yapısından bağımsız olarak, kolloidal dağılım, malten fazında dağılmış kolloidal parçacıklar olarak asfaltı oluşturmaktadır.

3.3. Bitümün Bileşimi, Yapısı ve Reolojisi Arasındaki İlişki

3.3.1. Bitüm Bileşenlerinin Özelliklerine Etkisi

Bitüm bileşenlerinin (yani SARA fraksiyonları) bitümün özellikleri üzerindeki etkisi daha önce incelenmiş ve bu bileşenlerin değişimlerinin etkileri değerlendirilmiştir. Buna göre bir numunede diğer bileşenleri değiştirirken, asfaltın konsantrasyonu sabit tutlursa;

- Aromatik içeriğinin sabit bir doymuş/reçine oranında artırılmasının, kayma duyarlılığındaki marjinal bir düşüş dışında reoloji üzerinde çok az etkiye sahip olduğu,
- Reçinelerin aromatlara sabit bir oranda tutulması ve doyma içeriğinin artırılması durumunda bitümün yumuşadığı,
- Reçinelerin eklenmesinin bitümü sertleştirdiği ve penetrasyon indeksini ve kayma hassasiyetini azalttığını, ancak viskoziteyi arttırdığı gözlenmiştir [25-28].

Ayrıca, bitümün reolojik özelliklerinin, asfaltın içeriğine kuvvetle bağlı olduğu gösterilmiştir [29]. Sabit bir sıcaklıkta, bir bitümün viskozitesi, ana maltenlere harmanlanan asfaltın konsantrasyonu yükseldikçe artmaktadır. Fakat viskozitedeki artış asfaltın küresel ve çözülmeyen maddeler olması durumunda beklenenin oldukça üzerindedir. Bu, asfaltın birbirleriyle ve/veya çözme ortamlarıyla etkileşime girebileceğini göstermektedir. Seyreltilmiş bir toluen çözeltisinde bile, artan asfaltın konsantrasyonları ile gözlenen viskozite artışı, kullanılan asfaltın miktarından neredeyse beş kat daha fazla çözülmeyen küreler

konsantrasyonuna tekabül eder. Bitüm asfaltınların aromatik/naftenik halka yapılarından oluşan plaka benzeri tabaka yığınları olduğuna inanılmaktadır. Bir çözeltinin, özellikle seyreltik bir çözeltinin viskozitesi, asfaltın partiküllerinin şekline bağlıdır. Boyut arttıkça şekil önemli bir miktarda değişiyorsa boyut önemlidir. Yüksek sıcaklıklarda, asfaltın agregalarını bir arada tutan bağlar kırılır ve bu, agrega veya kümelerin hem boyutunda hem de şeklinde bir değişikliğe neden olur. Sonuç olarak, sıcaklık arttıkça viskozite düşer. Bununla birlikte, sıcak bir bitüm soğudukça, asfaltın nano-agregaları arasında bağlantılar meydana gelir ve kümelenme oluşur. Newton sıvısı dışındaki davranışlarda bitüm soğudukça görülen bu belirgin artışın sebebi asfaltın ve diğer maddeler arasındaki moleküller içi ve moleküller dışı etkileşim sebebiyle olmaktadır. Kesme altında, bu uzun süreli etkileşimler klasik Newton kavramlarıyla yeterince açıklanmayan bir şekilde deforme olur ve hatta ayrışırlar. Sonuç olarak, oda ve ortalama sıcaklıklarda, bitümün reolojisinin, asfaltın partiküllerinin birleşme derecesi ve bu birleşmeleri stabilize etmek için sistemde bulunan diğer türlerin nispi miktarına bağlı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Reçineler ve asfaltın arasındaki etkileşimle ilgili soru Mullins (2010) tarafından yapılan araştırmalarda dikkate alınmıştır. Asfaltın nano-agregaları ve reçine fraksiyonu arasında sınırlı bir etkileşim olduğunu gösteren bazı kanıtlar vardır [22]. Asfaltınların bitümden veya ham yağlardan ayrılması düşünüldüğünde, asfaltınların bir çözünürlük sınıfı olduğu unutulmamalıdır. Yapılan deneyler sonucunda asfaltınların ham yağlardan ayrılması, mevcut olan miktardan daha düşük miktarda reçinenin bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca, reçinelerin asfaltın nano-agregaları üzerindeki sınırlı stabilize edici etkisinin kanıtı olarak da belirtilmiştir. Bununla birlikte, mikrokalerimetrik ölçümleri kullanan diğer çalışmalar (yani, ısı içeriğindeki son derece küçük değişikliklerin ölçümleri), reçine ile asfaltın fazları arasında gerçekten etkileşimin olduğunu göstermiştir. Bu ölçümlerin simülasyonlarla öngörülenlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Küçük açılı nötron saçılması ölçümlerini içeren diğer çalışmalar, asfaltın nano agregasının boyutunun, reçinelerin varlığında daha küçük olduğunu gösterdi, bu da iki bileşen arasında bir etkileşim olduğunu göstermiştir. Reçineler ve asfaltın bileşenleri arasındaki etkileşimin veya etkileşimin kapsamına ilişkin soru, Dickie ve Yen-Mullins modelinde ele alınmamıştır.

3.4. Bitümün Kullanım Döngüsü Boyunca Kimyasal Bileşimi ile Fiziksel Özellikleri Arasındaki İlişki

Atmosferik ve vakumlu damıtma, hafif bileşenleri bitüm hammaddesinden uzaklaştırır. Distilatların kaybı, doymuş maddelerin tercihi bir şekilde uzaklaştırılmasına ve asfaltın konsantrasyonuna yol açar. Okside, tecrit sınıflarında kullanılanlar gibi bazı bitümlü uygulama gereksinimlerini karşılamak için kullanılmaktadır. Bu çatı kaplama bitümleri, benzer penetrasyon değerlerinde, kaplama sınıfı bitüm örneklerinden daha yüksek bir yumuşama noktası gerektirir. Hava bitüme 240 ila 320 ° C arasında değişen bir sıcaklıkta, spesifik bitüm özellikleri elde

edilinceye kadar üflenir. Bitümün distilasyon ile elde edilmesi ve hammaddeye üflenerek elde edilmesi metotları ile üretilen numunelerin aynı penetrasyon değerlerindeki kimyasal kompozisyonlarının karşılaştırılması Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4. Damıtılmış ve hava üflenerek üretilmiş bitümün kimyasal kompozisyonlarının karşılaştırılması [18]

	Vakum Kalıntısı	Damıtma				Hava Üfleme		
25°C'deki Penetrasyon: dmm	285.0	185	99	44	12	84	46	9
Asfaltenler: %w	9,1	9,9	10,5	11,3	12,5	15,2	17,3	22,9
Reçineler: %w	18,6	16,7	18,2	17,7	21,3	21,0	22,21	21,5
Aromatikler: %w	51,2	53,0	52,4	58,4	53,8	47,6	45,0	40,5
Doğunlar: %w	16,2	15,1	14,1	11,2	9,4	16,2	15,6	15,1

Goppel ve Knoterus (1955), bitüm üfleme işlemi sırasında bitümün içine karbonil, karboksilik asit, ester ve hidroksil gruplarının eklendiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca üfleme işlemi sırasında asfaltenlerin moleküler ağırlığının arttığını belirtmişlerdir. Bitümün belirli bir vakum kalıntısından veya akıntılı vakum kalıntısından hava üflemesi, asfalten içeriğinde önemli bir artış ve aromatik içeriğinde bir düşüş ile sonuçlanır [30]. Doymuş ve reçine içeriği, esasen, üflemeden önceki ile aynı düzende kalmaktadır.

3.4.1. Bitüm İşleme ve Asfalt Üretimi Sırasında Meydana Gelen Değişiklikler

Asfaltlar yüksek sıcaklıklarda üretilmektedir. Bu işlem sırasında, bitümün özellikleri değişmektedir. Bitümün bu işlem öncesinde ve sonrasında sergilediği davranışları farklıdır. Bu değişiklikler bitümün “yaşlanma” diye tabir edilen şekilde oksitlenmesinden meydana gelir. RTFOT veya TFOT testlerinin bitümün yaşlanmasını simüle ettiği tespit edilmiştir [31]. Bununla birlikte, daha sonraki araştırmalar RTFOT ve TFOT'un hizmet süresince yaşlanma için iyi bir öngörme metodu olmadığını ortaya koymuştur [32].

Bitüm örneklerinin standart RTFOT ve TFOT koşullarına tabi tutulduktan sonra analiz edilmesi sonucunda, sülfoksit ve keton gruplarının konsantrasyonlarında bir artış olduğu görülmüştür [33]. Ayrıca oksidasyonda, bitümün aromatik fraksiyonunun genellikle azaldığı ve reçine ile asfalten fraksiyonlarının arttığı bulunmuştur.

3.4.2 Bitümde Servis Ömrü Boyunca Meydana Gelen Yapısal Değişiklikler

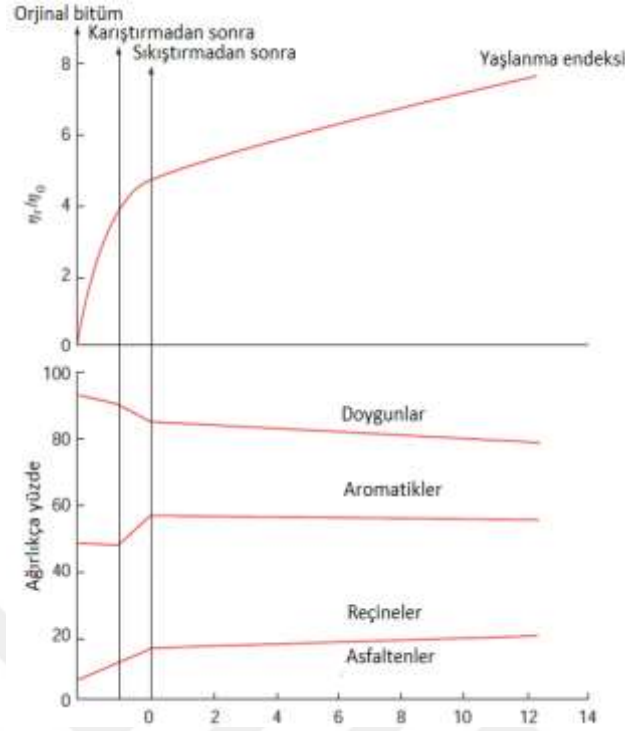
Bitümün kullanım ömrü boyunca meydana gelen oksidasyon, asfalt üretimi sırasında gerçekleşen sıcaklıklardan daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Bu düşük sıcaklıklar, meydana gelen reaksiyonların kinetiği üzerinde bir etkiye sahip olmaktadır [33]. Sıcaklığın bitüm

oksidasyon kinetiği üzerindeki etkisi çeşitli oksidasyon yöntemleri kullanılarak araştırılmış ve sonuçlar bitüm yaşlanmasının anlaşılması amacıyla tartışılmıştır [34].

3.4.3. Bitümün Oksidasyonu Sırasında Gözlenen Kimyasal Değişiklikler

Bitüm, normalde mevcut veya oksidasyon sırasında oluşan polar fonksiyonel grupları, sınırlı konsantrasyonlarda içermektedir [34]. Bitümün doğal olarak: fenolik, 2-kinolon tipi, pirrolük, piridinik, sülfid ve asidik kısımlar veya diğer bazı fonksiyonel gruplar içerdiği öne sürülmüştür. Ayrıca ketonik, sülfoksit ve anhidrit fonksiyonel gruplarının oksidasyon reaksiyonları nedeniyle oluştuğu da öne sürülmüştür. Bitümdeki kutupsal gruplar ve fraksiyonları bitümün özelliklerini etkiler. Polar gruplarının varlığının ve konsantrasyonunun (bu durumda fenolik grubun) asfalt kaplama performansını etkilediği (yani, çatlamaya yatkınlığı) gösterilmiştir [35]. Aynı zamanda bitümlü yalıtım malzemesi konusunda da bu durumun doğru olduğu gösterilmiştir. Bu eğilimin, ketonların konsantrasyonu ile ilişkili olduğu da gösterilmiştir [19][36-37]. Oksitlenmiş bitümün polar içeriğinde bir artışa neden olan kimyasal reaksiyonların mekanizması da tartışılmıştır. Çalışmalar, asfalt kaplama boşluk içeriğinin yanı sıra bitümün doğasının bitüm oksitlenme oranlarında büyük bir rol oynadığını göstermiştir [34]. Metallerin ve agregatların etkisi de SHRP' nin içerisinde incelenmiştir [19]. Yapılan çalışmalar; polimerik sistemlerde kullanıldığında etkili olduğu kanıtlanmış anti-oksidanlar ve katkı maddelerinin, bitüme eklendiğinde her zaman etkili olmayabileceğini göstermiştir [38].

Asfalt kaplamaların hizmet ömrü boyunca (karıştırma, serme ve servis), bitümlü bağlayıcının bileşimindeki SARA fraksiyonlarında meydana gelen değişim Şekil 3.8.'de gösterilmiştir [18].



Şekil 3.8. Karıştırma, serme ve hizmet ömrü boyunca bitüm bileşimindeki fraksiyonların değişimi [18]

“Yaşlanma endeksi” kavramı, yaşlanma sonrası bitüm viskozitesinin yaşlanmadan önceki bitüm viskozitesine oranıdır. Yaygın olarak farklı viskozitelere sahip numunelerin yaşlanma davranışını normalize etmek için kullanılır. Viskozitedeki ana değişikliklerin karıştırma ve serme işlemiyle ilişkili olduğu görülmüştür. Test için ayrılmış bölümlerden toplanan bitüm örnekleri kaplamanın yüzeyinden 3 mm altından elde edilmiştir. Binder tabakasındaki zamana bağlı vizkosite değişiminin küçük olduğu bulunmuştur. Kimyasal yapıya bağlı olarak asfaltan içeriği karıştırma ile artmış, zaman ile dereceli olarak artmıştır. Reçineli ve aromatik içerik ise zamanla azalmıştır.

Beklenmedik bir şekilde, doygün içeriğin zamanla arttığı gözlenmiştir. Genel olarak, incelenen karışımların başlangıçtaki boşluk içeriğinin nispeten yüksek olmasına rağmen (% 5-8), karıştırmadan sonra değişikliklerin çok küçük olduğu görülmüştür. Yukarıda belirtildiği gibi bitüm, karmaşık bileşenlerin bir karışımıdır ve bu bileşenlerin etkileşimleri bitüm ve bitümle oluşturulan yapıların performansını doğrudan etkilemektedir. Bitüm yapısı, çözünürlüğü, moleküler ağırlığı, polaritesi, gibi konular ile alakalı çok sayıda araştırma yapılmış olmasına rağmen, yine de bitümün bileşimi ve performansı arasında kesin bir ilişki tam olarak kurulamamıştır. Gelecekte yapılacak olan araştırmaların bitüm bileşenlerinin bitümün özellikleri üzerindeki etkisinin aydınlatılmasında yardımcı olacağı düşünülmektedir.

4. BİYOKÜTLE

Enerji ihtiyacının karşılanması ayrıca sürdürülebilir çevre düşüncesiyle jeotermal, güneş, rüzgâr, tarımsal, dalga, hidrolik ve biyokütle enerjileri petrol kaynaklı malzemelere alternatif kaynaklar olarak değerlendirilmektedir [39]. Dünyanın en geniş ve sürdürülebilir kaynaklarından olan biyokütle, petrol kökenli ürünlerin içerdiği sabit karbona sahip olması nedeniyle önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Az miktarda kükürt, nitrojen ve kül içeren biyokütle, çeşitli termokimyasal yöntemlerin uygulanmasından sonra geleneksel petrol ürünlerinin yerine kullanılabilir [4]. Dünyada mevcut biyokütle miktarının yaklaşık olarak yıllık 220 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir [40]. Gelişmiş ülkelerde, ısı ve enerji ihtiyacının yaklaşık %10'u biyokütlelerden elde edilmektedir [41]. Yılda 56 milyon ton tarım ürünü atığı ve 10 milyon m³ ağaç atığı üreten Türkiye'nin bu büyük potansiyeli değerlendirmesi önem arz etmektedir. Türkiye'nin sahip olduğu potansiyel biyokütle santrallerinde elektrik ve ısı enerjilerine dönüştürülemediği için ithal petrol, doğal gaz ve kömüre bağımlılık sürekli artmaktadır. Ülke ekonomisinin ve endüstrisinin büyümesinde, endüstriyel işlemlerde gerekli olan çok büyük miktardaki elektrik ve ısı üretilmesinde yerli biyokütle kaynaklarından en üst düzeyde yararlanılması gerekmektedir [42].

Biyokütle enerjisinin genel olarak 3 temel kaynaktan sağlandığı görülmektedir. Bu kaynaklar; tarımsal kökenli (bitkisel, hayvansal ve su), orman kökenli (talaş, ağaç kabuğu ve kozalak gibi), kentsel ve endüstriyel kökenli (belediye çöplükleri, kanalizasyon ve endüstriyel atıklar) kaynaklar şeklinde gruplandırılmaktadır. Biyokütleyi oluşturan kaynaklar Şekil 4.1.'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Biyokütleyi oluşturan kaynaklar [42]

Biyokütle, bir türe veya çeşitli türlerden oluşan bir topluma ait yaşayan organizmaların belirli bir zamanda sahip olduğu toplam kütle olarak da tanımlanabilmektedir. Biyokütle aynı zamanda bir organik karbon olarak da kabul edilmektedir [43].

Başlıca biyokütle kaynakları ayrıntılı olarak aşağıdaki gibidir:

1. Bitkisel biyokütle kaynakları

- Yağlı tohumlu bitkiler (kanola, ayçiçek, soya v.b.)
- Şeker ve nişasta bitkileri (patates, buğday, mısır, şeker pancarı v.b.)
- Elyaf bitkileri (keten, kenaf, kenevir, sorgum, miskantus v.b.)
- Protein bitkileri (bezelye, fasulye v.b.)
- Bitkisel ve tarımsal artıklar (dal, sap, saman, kök, kabuk v.b.)

2. Orman ve Orman Ürünlerinden Elde Edilen Biyokütle Kaynakları

- Odun ve orman atıkları (enerji ormanları, enerji bitkileri ve çeşitli ağaçlar)

3. Hayvansal Biyokütle Kaynakları

- Sığır, at, koyun, tavuk gibi hayvanların dışkıları, mezbaha atıkları ve hayvansal ürünlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan atıklar.

4. Organik çöpler, Şehir ve Endüstriyel Atıklardan Elde Edilen Biyokütle Kaynakları

- Kağıt sanayi atıkları
- Kanalizasyon ve dip çamurları
- Mobilya ve ağaç endüstrisi atıkları
- Gıda işleme sanayi atıkları
- Endüstriyel ve evsel atık sular
- Belediye ve büyük sanayi tesisleri atıkları

Türkiye'nin biyokütle atık potansiyelinin yaklaşık 8,6 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) ve üretilebilecek biyogaz miktarının 1,5-2 MTEP olduğu tahmin edilmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının yapmış olduğu çalışmalar neticesinde Türkiye'nin biyokütle enerjisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda Türkiye'nin sahip olduğu biyokütle enerjisi miktarı Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası (BEPA) ortaya konmuştur (Şekil 4.2) [44].

	Nüfus	79.814.871
	Toplam Hayvan Sayısı (adet)	389.405.328
	Hayvansal Atık Miktarı (ton/yıl)	163.297.308
	Hayvansal Atıkların Enerji Değeri (TEP/yıl)	1.176.198
	Bitkisel Üretim Miktarı (ton/yıl)	176.313.301
	Bitkisel Atık Miktarı (ton/yıl)	96.451.594
	Bitkisel Atıkları Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	39.877.285
	Kentsel Katı Atık Miktarı (ton/yıl)	31.331.836
	Kentsel Organik Atıkların Enerji Değerleri (TEP/yıl)	2.315.414
	Atıkların Toplam Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	44.228.795
	Biyodizel İşleme Lisansı Sahibi Firmalar	11
	Biyometanol İşleme Lisansı Sahibi Firmalar	3
	Biyokütle Kaynaklı Elektrik Üretim Santral Sayısı	128
	Orman Atıklarının Enerji Değeri (TEP / yıl)	859.899

Şekil 4.2. Türkiye biyokütle enerji potansiyeli atlası (BEPA) [44]

Biyokütle enerjisi, sanayileşme ve artan dünya nüfusunun giderek artan enerji talebini büyük oranda karşılama potansiyeline sahip, çevreyi kirletmediği gibi sürdürülebilir olan en önemli kaynaklardan biridir. Biyokütle, her yerde yetiştirilebilmesiyle ve tükenmez bir kaynak olmasıyla sosyo ekonomik gelişmelere de katkıda bulunabilecek önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir [45]. Orman endüstrisi ve ağaç atıkları, mısır ve buğday gibi yetiştirilen tarım ürünlerinin atıkları, şehirlerde her türlü evsel atıklar, bunların dışında gübre gibi hayvansal atıklar, endüstri ve sanayi atıkları biyokütle kaynaklarına örnek olarak gösterilebilir.

Bitkilerde fotosentez yoluyla selüloz şeklinde depolanan ve farklı şekillerde kullanılan ve değerlendirilen enerjinin temel kaynağı güneştir. Dünyada güneş enerjisi biyokütle olarak depolanır ve enerjiye dönüşür. Bu enerji dünyada tüm canlıları yaşamı için esas teşkil etmektedir. Bitkilerin fotosentezi yoluyla canlılar için hayati olan organik madde sentezi gerçekleşirken yine canlıların solunumu için gerekli olan oksijen de atmosfere verilmektedir. Ortaya çıkan organik maddelerin yakılmasında salınan karbondioksit ise yine fotosentez için atmosferden alındığından karbondioksit salınımı açısından sorun oluşturmamaktadır [45].

Biyokütle'nin doğrudan yakılmasıyla en basit şekilde enerji elde edilmesinin dışında daha farklı enerji çevrim yöntemleri de uygulanmaktadır. Bunlar havasız çürütme, fermentasyon,

gazlaştırma, biyofotoliz ve piroliz gibi biyokütle çevrim yöntemleri olup biyokütleden alternatif biyoyakıtlar (sentetik yakıt, biyoetanol, biyodizel, çöpgazları) edilmektedir [46].

Biyokütle enerjisi klasik ve modern olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Ağaç kesiminden elde edilen odun ve hayvan gübrelerinden oluşan tezeklerin basit şekilde yakılması klasik biyokütle enerjisi olarak tanımlanırken, ağaç endüstrisi atıkları, enerji ormanları ve enerji bitkilerinden elde edilen etanol ve bio-dizel gibi yakıtlar ise modern biyokütle enerjisinin kaynağı olarak tanımlanır [45].

Türkiye için biyokütle enerjisi kullanımının, dışa olan enerji bağımlılığının azaltılmasının yanı sıra, tarımsal ve endüstriyel atıklardan kaynaklanan kirliliğin de önlenmesinde önemli rol oynayacağı bilinmektedir [47].

Dünyada yılda yaklaşık 3.5 milyon ton taze kayısı üretilmekte olup, bu miktarın yaklaşık 700 bin tonu Türkiye'den elde edilmektedir. Bu üretimin büyük bir kısmı Malatya ve Elazığ illerinde gerçekleştirilmektedir. Türkiye, dünya kayısı üretiminde yaklaşık %20'lik payla 1. sıradadır. Türkiye'yi Pakistan, İran, Özbekistan ve İtalya takip etmektedir. Türkiye'de üretilen kayısının önemli bir bölümünden yaklaşık 100 bin ton kuru kayısı üretimi gerçekleştirilmektedir [48]. Toplam yaş kayısının %20'sini çekirdek kabuğu oluşturmaktadır. Bu da ülkemizde yıllık ortalama 140 bin ton kayısı çekirdeği kabuğu ortaya çıktığını göstermektedir. Öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuklarının elenmesiyle elde edilen köşeli ve daha iri taneli olanlarının bir kısmı sanayide kumlama, yüzey temizleme, yüzey parlatma ve çapak almada daha ince taneli olanları ise bazı kozmetik ürünlerinde kullanılabilir (Şekil 4.3). Kayısı çekirdeği kabuğunun ekonomik değeri düşük olup çoğunlukla evsel ısınma amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 4.3. Kayısı çekirdeği kabukları ve öğütüldükten sonra granül hali [49]



Şekil 4.4. Kayısı çekirdeği granülüyle kumlaması tamamlanmış tank parçaları ve gövdesi [49]

Türkiye’de 2018 yılı verilerine göre yıllık yaklaşık 215 bin ton ceviz 100 bin ton iç ceviz üretimi yapılmaktadır [50]. Türkiye bu üretimle Çin, ABD, ve İran’dan sonra dünyadaki ceviz üreticisi ülkeler içerisinde dördüncü sırayı almakta ve dünya ceviz üretiminin %5,3’ünü karşılamaktadır [51]. Türkiye’de ceviz üretimi tüm bölgelere yayılmış durumdadır. Ceviz özellikle orman ağacı olmasından dolayı birçok bölgede ağaç sayısı yüksektir [52]. 1995 yılı itibariyle üretim rakamları incelendiğinde özellikle son yıllarda Türkiye’de ceviz üretiminin arttığı gözlenmektedir. Ülkemizde fındıktan sonra en çok üretilen sert kabuklu meyve olan ceviz 2002 yılında yaklaşık olarak 136 bin ton olarak üretilmiştir. Türkiye ceviz üretimi 2009 yılı verilerine göre 177.298 tondur. Türkiye’de üretilen cevizlerin ortalama kabuk oranının %48,4 (85.847 ton) olduğu kabul edilmektedir. Öğütülerek granül haline getirilen ceviz kabuklarından iri taneli olanları sanayide kumlama, yüzey temizleme, yüzey parlatma, çapak almada ve raspa boyada kullanılabilmektedir [53]. Ceviz kabuğunun ekonomik değeri düşük olduğundan genellikle yüksek kalorili yakıt olarak sanayi tesislerinde, ekmek fırınlarında ve besi çiftliklerinde tutuşturucu malzeme ve ısınma amaçlı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.5. Ceviz kabukları ve öğütüldükten sonra granül hali [54]

Türkiye'nin ormanlık alanları 21,2 milyon hektar olup bu Türkiye yüzölçümünün yüzde 27,2'sine karşılık gelmektedir. Orman alanlarının %99,9'u Orman Genel Müdürlüğü (OGM) tarafından yönetilmektedir. OGM'nin yıllık endüstriyel odun üretimi ortalama 16 milyon metreküptür. Yakacak odun üretimi yıllık ortalama 6 milyon metreküptür. Orman üretim artıkları en çok; orman seyreltme faaliyetlerinden, orman kurma, orman bakımı, gençleştirme ve iyileştirme faaliyetlerinden ve endüstriyel üretim faaliyetlerinden, elde edilmektedir. Kereste, mobilya, kağıt hamuru ve kağıt üretim faaliyetleri sonucu odun kabukları, yongalar, testere talaşları, lifsel atıklar gibi organik malzemelerden büyük miktarlarda biyokütle oluşmaktadır. OGM ülkemiz ormanlarındaki biyoenerjide kullanılabilecek biyokütleyi yıllık yaklaşık 5-7 milyon ton olarak hesaplamaktadır [55].

Kereste fabrikalarında tomrukların biçilmesi, yan ve baş alma işlemleri sırasında önemli miktarda testere talaşı meydana gelmektedir. Meydana gelen talaş miktarı, kullanılan ağaç türüne, biçme yöntemine, kullanılan ekipmana (şerit-katrak), tomruğun çap ve boyuna, elde edilmek istenen ürünün boyutlarına göre değişmektedir. Kerestenin rendelendiği (planyalandığı) ve çeşitli amaçlar için şekillendirildiği mobilya ve doğrama fabrikası atölyelerinde meydana gelen artıklar kimi zaman kereste hacminin %30'una kadar yükselebilmektedir. Kaplama fabrikalarında, tomrukların soyma ve kesme makinalarında soyulma ve kesilmeleri sonucu ortaya çıkan odun artıkları tomruğun çap ve boyuna, kalitesine ve uygulanan teknolojiye bağlı olarak değişmekle beraber, tomruk hacminin %50'sine kadar ulaşmaktadır. Bu artıklar, daha kârlı bir şekilde kullanma olanağı bulunmazsa, fabrikada ısı enerjisi üretmek amacıyla yakılmaktadır [56]. Farklı boyutlarda elenmiş talaşlar ve atık talaş yığını (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Farklı boyutlarda elenmiş talaşlar ve atık talaş yığını [57]

4.1. Biyokütle Çevrim Teknolojileri

Biyokütle kaynakları biyokütle çevrim teknikleri ile biyokimyasal ve termokimyasal yöntemlerle işlenerek katı, sıvı ve gaz ürünlere ve yakıtlara çevrilmektedir. Çevrim işlemleri sonunda biyoetanol, biyodizel, biyogaz ve pirolitik gaz gibi ana ürün olan yakıtların yanısıra gübre ve hidrojen gibi yan ürünler de elde edilmektedir. Şekil 4.7.'de çeşitli dönüşüm yöntemleri görülmektedir.



Şekil 4.7. Biyokütle çevrim yöntemleri [44]

Biyokütleden enerjinin yanısıra mobilya, kağıt, yalıtım malzemesi yapımı alanlarında da yararlanılmaktadır. Biyokütle kaynakları çevrim teknikleri ve bu teknikler kullanılarak elde edilen yakıtların uygulama alanları Tablo 4.1.'de görülmektedir.

Tablo 4.1. Biyokütle kaynakları, çevrim yöntemleri ve elde edilen yakıtların uygulama alanları [44]

Biyokütle	Çevrim Yöntemleri	Yakıtlar	Uygulama Alanları
Orman atıkları	Havasız çürütme	Biyogaz	Elektrik üretimi, ısınma
Tarım atıkları	Piroliz	Etanol	Isınma, ulaşım araçları
Enerji bitkileri	Doğrudan yakma	Hidrojen	Isınma
Hayvansal atıklar	Fernantasyon-Havasız çürütme	Metan	Isınma, ulaşım araçları
Çöpler (organik)	Gazlaştırma	Metanol	Uçaklar
Algler	Hidroliz	Sentetik yağ	Roketler
Enerji ormanları	Biyofotoliz	Motorin	Ürün kurutma
Bitkisel ve hayvansal yağlar	Esterleşme reaksiyonu	Motorin	Ulaşım araçları, ısınma, seracılık

4.1.1. Doğrudan Yakma

Genel olarak yakma işlemi, biyokütlenin bünyesindeki yanabilir maddelerin sıcaklığın etkisiyle birlikte oksijenle hızlı bir şekilde kimyasal tepkimesi olarak tanımlanmaktadır. Enerji üretmek maksadıyla biyokütlelerin doğrudan yakılması işlemi bilinen en eski yöntemlerdendir. Fakat günümüzde biyokütlelerden daha fazla enerji ve verim elde etmek amacıyla yeni yakma yöntemleri ve sistemleri geliştirilmektedir. Biyokütlelerin yakılmasıyla enerji üreten mevcut termik santrallerin yerini artık akışkan yataklı sistemlerle kurulan santraller almaktadır. Biyokütle kaynaklarının tamamından doğrudan yakma yöntemiyle enerji elde etmek mümkün olmakla birlikte bünyedeki nem oranı miktarı yükseldikçe sonuçta elde edilen ısı değer düşmektedir. Tarım atıklarının (ayçiçeği sapları ve mısır gibi) içinde bulunan başlıca yanabilir maddeler karbon, hidrojen ve potasyum gibi metalik bazı elementlerdir. Yakma işlemiyle gerçekleşen kimyasal tepkime esnasında havadaki oksijen tüketilmekte ve tepkime sonucunda ısı enerjisi ile birlikte su buharı, karbondioksit ve bazı metal oksitler ortaya çıkmaktadır. [58].

4.1.2. Havasız Çürütme

Havasız çürütme, oksijensiz ortamda yaşayan bazı mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilen biyolojik bir işlemdir. Tamamen oksijensiz ortamda gerçekleşen bu olay organik madde + su + bakteri = karbondioksit + metan + hidrojen sülfür + gübre + bakteri şeklinde olmakta ve termofilik ve mezofilik bakteriler tarafından gerçekleşmektedir. Bu bakterilerden termofilik olanlar 54°C'de mezofilik bakteriler ise 35°C civarında üretim yapabilmektedir. Termofilik bakteriler sıcaklık değişimlerinden çok daha fazla etkilenmekle birlikte mezofilik bakterilere kıyasla daha yüksek hızda metan üretebilmektedir.

Havasız çürütme olayında tarım atıkları, bu amaçla yetiştirilen bazı özel bitkiler ve çoğunlukla da hayvan gübresi kullanılmaktadır. Bu olay sonucunda biyokütleden sıvı ve gaz yakıt elde edilir. Gaz olarak elde edilen ve yaygın olarak kullanılan yakıt biyogaz en çok bilinenlerdendir ve % 25 – 45 arası karbondioksit ile % 55 – 75 arası metan gazı ihtiva etmektedir.

Bu yöntemle elde edilen biyogazın ısı değeri yaklaşık 5200 kilokalori/m³ olmaktadır. Biyogaz eğer hayvan gübresinden elde ediliyorsa işlem sonucunda kalan malzeme yine değerli bir gübre olarak kullanılmaktadır. Havasız çürütme yönteminin verimi kullanılan biyokütle kaynağına, sıcaklığa ve pH değerine göre değişmekle birlikte % 60 ila % 70 arasında olmaktadır. Biyokütlelerin oksijensiz ortamda mikroorganizmalar yardımıyla fermantasyona uğratılması sonucunda karbondioksit ve metan gazı ile birlikte gübre ortaya çıkmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalar havasız çürütme yoluyla evsel ve endüstriyel atıklardan elde edilen gübrenin kaliteli olmadığını göstermiştir. Fakat besleyiciliği ve kalitesi daha az olan gübrenin dışında yinede yakıt

olarak değerdendirilebilen metan gazı elde edilebilmektedir. Buna karşın hayvan gübrelerinden ve bitki artıklarından bu yöntemle yaygın olarak kullanılan ve bilinen biyogaz üretilebilmektedir [59].

4.1.3. Fermantasyon

Biyokütlenin yapısından farklı oranlarda hemiselüloz ve lignin bulunmaktadır. Selüloz enzimatik hidrolizden sonra yapılan kimyasal hidroliz, kimyasal işlemler veya enzimler yoluyla glikoza parçalanabilmektedir. Kimyasal hidroliz şartları glikozu bozabileceğinden bu işlem dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Glikozun fermantasyonu sonucunda aseton, butanol ve etanol elde edilebilmektedir. Elde edilen bu ürünlerin yanısıra ham petrolden elde edilebilecek çoğu kimyasal ürün de üretilebilmektedir. Bu ürünler petrolden elde edilen kimyasal ürünlerin yerlerine kullanılabilir. Yani selüloz, glikoz ve birçok kimyasal ürün elde etmek için kullanılabilen ucuz bir biyokütle kaynağı niteliğindedir.

4.1.4. Gazlaştırma

Yapısında karbon içeren biyokütlelerin yüksek sıcaklıkta bozunması sonucunda yanabilir gaz elde etme işlemine gazlaştırma denilmektedir. Gazlaştırma işleminde yakıt hücresine kontrollü bir şekilde hava verilmesiyle biyokütle yakılmaktadır. Bu işlem sonucunda hidrojen ve metan gibi yanabilir gazların yanı sıra azot, karbonmonoksit ve karbondioksit gibi gazlar da ortaya çıkmaktadır. Biyokütlenin gazlaştırılması işleminde çevreye herhangi bir zarar verilmez çünkü biyokütlenin içindeki kükürt miktarı ihmal edilecek seviyede olmaktadır. Biyokütle öğütölüp parçacıklara ayrılarak akışkan yataklı sistemde yanma odasında kum ile birlikte yukarı yönde hava verilip itilerek yapılmaktadır. Bu karışım hava akımı sayesinde kolaylıkla akışkan gibi hareket ettirilebilecek şekilde yürütölmektedir. Karışımındaki biyokütlenin bir kısmının yakılması ile kumun 650°C ile 850°C ısınması sağlanır. Kimyasal tepkime sonucunda oluşan gazlar yukarıya doğru çıkarken, katran ve benzeri istenmeyen zararlı maddeler siklon ayırıştırıcı içinden geçirilmek suretiyle elenmektedir. Yukarıya doğru çıkan bu gaza jeneratör gazı, gen gazı veya odun gazı adı verilmektedir. Bu gazın hacmindeki mevcut ısı değeri 4 ile 11 MJ/m³ (1000 – 2600 Kcal/m³) arasında değışmekle beraber doğal gaza kıyasla daha düşük enerjiye sahip olmaktadır.

Gazlaştırma işleminde 3 tip biyokütle kaynağı kullanılmaktadır. Bu kaynakları bitkilerin samanları, mısır sapları, pirinç, buğday ve ayçiçeğı gibi tarım atıkları, kayısı çekirdeğı kabuğı ve ceviz kabuğı gibi gıda işleme endüstrisi atıkları ve orman endüstrisi atıkları oluşturmaktadır. Gazlaştırma işleminde son yıllarda daha çok kullanılan sürekli besleme olanağıyla diğerd sistemlerden daha üstün olan akışkan yataklı sistemlerin yanısıra sabit ve oynar yataklı sistemler de kullanılmaktadır. Daha basit gazlaştırma sistemlerinde bile yakıt verimi % 85-90 olmaktadır.

4.1.5. Biyofotoliz

Biyofotoliz, deniz suyu içindeki bazı mikroskobik alglerden güneş enerjisi yoluyla oksijen ve hidrojen üretilmesi işlemidir. Bu algler deniz suyunu bir tür güneş pili gibi işleyerek fotosentetik olarak ayrıştırmaktadır. Gelecekte hidrojen yoluyla enerji üretim teknolojisi yaygınlaşıp geliştikçe biyofotoliz konusu üzerine yapılan araştırmaların önem arz edeceği düşünülmektedir.

4.1.6. Piroliz

Organik malzemelerin (biyokütle) oksijensiz ortamda yüksek sıcaklık altında termokimyasal bozunması işlemine piroliz (karbonizasyon) denilmektedir. Bu bozunma sonucunda sıcaklığın etkisiyle malzemelerin yapısında bağ kopmaları veya zincir kırılmaları meydana gelmekte ve bunun sonucunda katı, sıvı ve gaz fazlarında ürünler elde edilmektedir. Bu ürünlerden sıvı olanına biyoyağ, katı olan ürüne ise biyoçar denilmektedir. Isıl işlem sonucu metan ve hidrojen gibi gazlar meydana gelirken, organik maddelerden ise petrol ve türevlerine benzer bir yapı oluşmaktadır [60]. Piroliz işlemini gerçekleştirmek için farklı yöntemler bulunmaktadır. Herhangi bir fazda çıkan ürünlerin miktarı ve özellikleri piroliz işleminde kullanılan metoda, piroliz sıcaklığına, ısıtma hızına, atığın parçacık boyutuna ve hammaddeye bağlıdır. Piroliz öncesi biyokütlenin parçalanarak daha küçük hacimde kullanılması, ortaya çıkacak ürünlerin verimliliğini ve biyokütlenin ısınma oranlarını arttırdığından işlemin verimini yükseltmektedir. Bunun yanında kullanılan piroliz aletinin tipi de biyokütlenin gereken öğütülme miktarını belirlemektedir [56][60-61]. Sıcaklık, termokimyasal bir süreç olması itibarıyla pirolizi ve ürünlerin verimini etkileyen en önemli faktördür. Piroliz sıcaklığı 400-500°C aralığında olduğunda daha fazla biyoçar elde edilirken, 700°C ve üzerinde sıvı ve gaz bileşenlerinin verimi artmakta, daha az biyoçar elde edilmektedir. Piroliz işlemine maruz kalacak olan atığın sıcaklığının arttırılma hızı da önemli bir parametredir. Isıtma hızı ne kadar yavaş olursa pirolizden elde edilen katı ürün miktarı o kadar fazla olmaktadır. Piroliz işleminde atıkların tamamı ürün olarak geri dönüştürülebildiğinden, her türlü artık veya organik maddeye uygulanabildiğinden, kendi ürettiği gaz ile ısıtılarak enerji tüketimini azalttığından, parametreler değiştirilerek elde edilmesi istenen ürün ayarlanabildiğinden sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu nedenle piroliz işleminde hedeflenen ürün katı ürün ise atık yavaş piroliz işlemine; sıvı ürün ise atık, hızlı piroliz işlemine tabi tutulmalıdır. Piroliz işlemi yavaş, hızlı ve ani (flas) piroliz olmaz üzere 3 şekilde yapılabilmektedir.

Yavaş Piroliz

Yavaş piroliz düşük sıcaklık ve düşük ısınma hızlarında biyoçar üretimini gerçekleştirmek için binlerce yıldır kullanılmaktadır. Bu proseste, buhar alıkonma süresi çok yüksektir (5 dk-30

dk arasında) ve aynı zamanda buhar fazındaki bileşenler birbirlerini etkilemeye devam etmektedirler. Bununla beraber yavaş piroliz iyi kalitede biyoyakıt üretimine imkan vermeyen bazı teknolojik sınırlamalara sahiptir. Yavaş piroliz prosesindeki öncül ürünün parçalanması yüksek alıkonma süresine bağlı olarak oluşmaktadır ve biyoyakıt verimi ve kalitesini ileri derecede etkilemektedir. Bununla beraber uzun alıkonma süresi ve düşük ısı transferi ekstra enerji girişini gerektirmektedir [61-62].

Hızlı Piroliz

Fosil yakıtların azalması ve çevresel problemlerle ilgili olarak yenilenebilir lignoselülozik atıkların işlenmesi giderek ilgi çeken bir alan olmaktadır. Biyokütle farklı teknolojiler kullanılarak yakıt ve değerli kimyasal maddelere dönüştürülebilmektedir. Bu teknolojiler arasında hızlı piroliz en çok dikkat çeken işlemdir. Geleneksel piroliz yönteminin amacı yavaş ısıtma ile katı ürün elde etmektir. Fakat yüksek verimde sıvı ürün elde etmek amacıyla yüksek ısıtma hızlarına sahip hızlı piroliz sistemleri geliştirilmiştir. Hızlı piroliz genellikle yüksek kalitede sıvı biyoyakıt üretmek için kullanılmaktadır [63]. Hızlı piroliz sistemlerini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar; nem içeriği, tane boyutu, uygulanan ön işlemler, reaktör tipi, kullanılan ısı kaynağı, gerçekleşen ısı transferi, ısıtma hızı, reaksiyon sıcaklığı, buhar alıkonma zamanı, oluşan biyoçar ve sıvı ürünün toplanma şeklidir [64]. Hızlı piroliz, yüksek sıcaklıklarda kısa alıkonma zamanından dolayı, sıvı ürün üretiminde endüstriyel ölçekte bile tercih edilmektedir. Biyokütlenin hızlı pirolizi, oksijenin bulunmadığı ortamda hızlı bir bozunma ve buharın hızlıca yoğunlaştırılması ile %70-80 gibi yüksek oranlarda biyoyağ olarak da bilinen sıvı ürünlere dönüştürülmesi işlemidir. Yüksek biyoyağ eldesi orta dereceli piroliz sıcaklıklarında (500°C civarında), çok yüksek ısıtma hızlarında (10^3 - 10^5 °C/s) ve çok kısa buhar alıkonma sürelerinde (<2s) mümkündür. Hızlı pirolizde ikincil reaksiyonların oluşmaması için piroliz buharı, çok kısa zamanda alınıp soğutulmalıdır. Hızlı pirolizde katı ürün verimi ise en düşük seviyededir [65].

Ani (Fleş) Piroliz

Birkaç saniye ya da daha kısa bir zamanda gerçekleşen piroliz yöntemine denir. Isıtma hızı oldukça yüksek olup reaksiyon süresi de buna bağlı olarak sadece birkaç saniyedir. Bu nedenle fleş piroliz yapmak amacıyla özel reaktörler tasarlanmıştır. Akışkan yataklı reaktör ve sürükleyici akım reaktörü bu işlem için tasarlanmış iki reaktör tipidir. Flash pirolizde biyokütlenin çok hızlı bir şekilde ısıtılması için parçacık boyutunun oldukça küçük olması gerekir [66]. Flash piroliz genellikle 500°C sıcaklıkta çok hızlı ısıtma hızlarında ve 100-1000 milisaniye gibi çok kısa alıkonma sürelerinde gerçekleştirilir. Sıvı ürün verimi biyokütle tipine göre değişmekle birlikte kuru biyokütle için maksimum %70'dir. Flash piroliz sonucu oksijenlenmiş hidrokarbonlardan oluşan oldukça kompleks bir sıvı ürün elde edilir. Bunun nedeni oldukça hızlı olan sıcaklık artışından dolayı lignin, selüloz ve hemiselülozların aynı anda bozunmasıdır [66].

Biyoçarlar kimyasal açıdan selüloz, lignin ve hemiselülozdan oluşmaktadır. Elde edilecek biyoçar miktarı aynı zamanda biyokütlenin kimyasal yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Yüksek molekül ağırlıklı lineer doğal bir polimer olan selüloz, biyokütlenin yaklaşık %40-50'sini oluşturmaktadır. Hemiselüloz, çeşitli polimerize polisakkaritlerin birleşmesiyle oluşmaktadır. Lignin, bitki aleminde bulunan çok karmaşık doğal bir polimerdir. Birçok lifli bitkide lignin bol miktarda bulunmaktadır. Genellikle lignin içeriği yüksek (koyu renkli) tarımsal ve doğal atık malzemelerin pirolizinde biyoçar verimi yüksek olurken, selüloz içeriği yüksek malzemelerin pirolizinde biyoyağ verimi yüksek olmaktadır [67]. Genel olarak polimerlerin bitümlü bağlayıcıların ve karışımların özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir. Biyokütlenin önemli bir oranının doğal polimerlerden oluşması, uygun termokimyasal işlemlerden sonra bu malzemelerin bitümlü bağlayıcılar ve karışımlarla birlikte kullanılabilirliğini göstermektedir.

Genel olarak biyoyağlar oksijen miktarı yüksek, viskoz özellik gösteren, kimyasal açıdan karmaşık ve kararsız yapıya sahiptir. Biyokütle bazlı pirolitik yağ üretimi sırasında %15-30 arasında su açığa çıkmaktadır. Pirolitik yağ içerisinde bulunan su ayrıştırıldıktan sonra ekonomik değeri yüksek olan gerçek yağ elde edilebilmektedir. Biyokütle bazlı pirolitik yağların bünyesindeki orijinal nem ve reaksiyon sırasında açığa çıkan su ayrıldıktan sonra geriye kalan biyoyağ; %99,7 oranında karbon, hidrojen ve oksijen atomlarından oluşmaktadır. Pirolitik yağlar genel olarak ısınma, enerji ve yakıt elde etme amacıyla kullanılmaktadır [4]. Şekil 4.8.'de biyoyağ elde etme yöntemi ve çeşitli biyoyağ örnekleri görülmektedir.



Şekil 4.8. Piroliz ile biyoyağ elde edilmesi ve çeşitli distile biyoyağ örnekleri [68-70]

Bazı tarımsal atıkların pirolizinden elde edilen ve önemli ölçüde karbon içeren biyoçar ürünleri Şekil 4.9.'da görülmektedir. Biyoçarın özellikleri; piroliz yöntemi, işlem sıcaklığı ve reaksiyon süresi ile değişebilmektedir. Kullanılan hammaddeye bağlı olarak piroliz sonucunda değişik özelliklerde kül ve karbon karışımı olan biyoçar elde edilmektedir. Biyokütleyle bağlı olarak biyoçarın içerdiği nem, uçucu madde, sabit karbon ve kül içeriği değişebilmektedir [69]. Biyoçarın içerisinde karbon bulunduğundan toprakta gübre olarak kullanılabilirdiği gibi sera

gazlarını tutma özelliğiyle de havadaki emisyonları azaltabilmektedir. Gübre ve tarımsal artıkların pirolizinden elde edilen biyoçar genellikle toprak ıslahı ve gübre takviyesi olarak kullanım alanına sahiptir [71].



Şekil 4.9. Bazı tarımsal artıklardan elde edilen biyoçar ürünleri [72-74].

Farklı biyokütlelerden elde edilen ürünlerin bitümlü bağlayıcıların veya bitümlü sıcak karışımların mühendislik özelliklerine etkisi ile ilgili literatür özeti aşağıda verilmiştir;

Petrol rezervinin azalması ve petrol fiyatlarının artması üzerine kaygılar bitümlü bağlayıcıları da kapsamakta olup bitümlü bağlayıcılarla birlikte veya bitüm katkı maddesi olarak kullanılabilecek alternatif malzemeler ile ilgili yeni arayışlar her geçen gün artmaktadır. Alternatif bağlayıcı veya katkı maddelerinde aranan özellikler; çevreyle dost olması, yeşil teknoloji denilen zararsız ve sürdürülebilir olmasıdır. Karayolu endüstrisi tarafından hem sürdürülebilir hem de ekolojik olan bu alternatif bağlayıcılar biyo-asfalt olarak adlandırılmaktadır. Bazı Avrupa ülkelerinde ve özellikle A.B.D’de kurulan çeşitli araştırma endüstrileri, biyokütle ve biyoatıklardan biyo-asfalt üretmek için çalışmalar yapmaktadır [75-79]. Bunun yanı sıra tarımsal ve doğal artıkların pirolizinden elde edilen biyoçar ve biyoyağların bitümlü bağlayıcıların yerine veya bitüm katkı malzemesi olarak kullanımı üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu yönde yapılan çalışmalar yeni ve güncel olup özellikle 2000’li yıllardan sonra uluslararası literatürde görülmeye başlanmıştır. Biyomalzemelerin bitümlü bağlayıcılarla kullanımı üç şekilde olmaktadır. Bunlar; bitümün tamamı yerine (%100), bitümlü bağlayıcının bir kısmı yerine (>%10) ve bitüm katkı malzemesi olarak ($\leq$ %10) kullanılması şeklindedir [76].

Atık odun ve ağaç artıklarının pirolizi sonucu elde edilen ana ürünlerinden biyoyağ ve biyoçarların kullanım amaçlarını ve avantajlarını ortaya koymak için yapılan çalışmalarda biyoçarın asfalt yüzeyini ultraviyole ışığın etkisinden koruyabildiğini böylelikle asfaltın foto oksidasyon yoluyla yaşlanmasını önleyebildiğini ve asfaltın yüksek sıcaklık stabilitesini artırdığını ortaya koyulmuştur [80-82].

Seidel ve Haddock (2012) soya bitkisini çalışmalarında kullanmışlardır. Soya bitkisinden elde ettikleri yağ asitlerini farklı orijinal ve geri dönüştürülmüş asfalt malzemesinden (RAP) elde edilen bağlayıcıya %1 ve %3 oranlarında ilave etmiş ve hazırlanan modifiye bağlayıcılara viskozite ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri uygulamışlardır. Soya yağı asidi kullanımı ile bağlayıcıların viskozitelerinin, karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarının ve kompleks kayma modüllerinin (G^*) azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, bağlayıcıların soya yağ asitleriyle modifikasyonu sonucu rijitliklerinin azaldığını ve daha fazla işlenebilirlik kazandığını ortaya koymuştur [83].

Peralta vd. (2012) yaptıkları çalışmada, bitümün yerine bağlayıcı olarak %10-15 oranlarında öğütülmüş araç lastiği ve %85-90 oranlarında kızıl meşe ağacı artığından hızlı piroliz yöntemiyle elde edilen biyoyağın kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bağlayıcı deneyleri ve kimyasal deneyler sonucunda öğütülmüş araç lastiğinin normal bitümlü bağlayıcı ile 185°C’de karıştırılmasına rağmen biyoyağ ile 125°C’de başarılı bir şekilde karıştırılabildiği görülmüştür. Bu durum bitümlü sıcak karışımların üretimi sırasında gereken enerjiyi azaltmaktadır ve özellikle son yıllarda yaygınlaşmaya başlayan ılık asfalt üretimi açısından da önem arz etmektedir. Yapılan çalışmada öğütülmüş araç lastiği ile biyoyağın karışımından elde edilen biyobağlayıcıların performans seviyesinin PG 64-22 olduğu, bu bağlayıcıların ham petrolden elde edilen geleneksel bağlayıcıların yerine kullanılabileceği belirlenmiştir [84].

Williams vd. (2008) üç farklı biyokütle kaynağından (meşe ağacı artığı, dallı darı bitkisi ve tarladaki mısır bitkisi artığı) piroliz yöntemiyle elde ettikleri biyoyağları %3, %5 ve %9 oranlarında bitümlü bağlayıcıyla karıştırarak modifiye bitümler elde etmişlerdir. Kimyasal yapı bakımından biyoyağ içeren bitümlü bağlayıcılarla konvansiyonel bitümlü bağlayıcıların benzer olduğu belirlenmiştir. Biyoyağlarla modifiye edilen bağlayıcıların reolojik özelliklerini tespit etmek için dinamik kayma reometresi (DSR) ve kırılgan eğme reometresi (BBR) deneyleri uygulanmıştır. DSR deney sonuçlarından biyoyağ katkısı arttıkça tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. BBR deney sonuçları ise biyoyağ katkısının bağlayıcının düşük sıcaklık performansını düşürdüğünü ortaya koymuştur [85]. Aynı ekip tarafından bir önceki çalışmanın devamı niteliğindeki yayında aynı biyoyağlar saf bağlayıcının yanında polimer modifiyeli bağlayıcılarla birlikte kullanılmıştır. DSR deneyleri sonucunda biyoyağların polimer modifiyeli bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans derecesini 6°C (1 seviye) arttırdığı tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca %9 oranına kadar biyoyağların bitümlü bağlayıcılarla birlikte kullanılabileceği belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda deney sonuçlarının geçerliliğinin ispatlanması için daha detaylı çalışmaların ve özellikle karışım deneylerinin yapılması gerektiği belirtilmiştir [86].

Hill (2012), bahçe artıklarından elde ettiği biyoyağın bitümlü bağlayıcılarda katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla çeşitli ağaçlardan elde ettiği yaprak ve dalları

kuruttuktan sonra yavaş pirolize tabi tutarak biyoyağ ve biyoçar elde etmiştir. Elde edilen yağlar üzerinde oksijen ihtiyacı, pH ölçümü, iletkenlik ve kimyasal içerik deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarından özellikle biyoyağ içerisindeki suyun giderilmesi ile viskozitenin önemli oranda artacağı ayrıca daha kararlı özelliklere sahip bir malzeme elde edileceği ve bu malzemenin bitümlü bağlayıcılarla birlikte kullanılabileceği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca daha detaylı bağlayıcı deneylerinin yapılmasının gerekliliği vurgulanmıştır [70].

Andersen vd. (2008), bitkisel yağdan elde edilen malzemeler kullanarak Norveç'te iki farklı deneme yolu yapmışlardır. Öncelikle normal ve bitkisel yağdan elde edilen bağlayıcılar üzerinde laboratuvarla çeşitli deneyler uygulanmıştır. Laboratuvar deneyleri sonucunda bitkisel yağdan elde edilen bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin daha düşük olduğu, düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımlarının daha iyi olduğu, bütün bağlayıcı şartname gereksinimlerini karşıladığı, referans bağlayıcı ile diğer performans özellikleri açısından benzer özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Arazi uygulamaları sonucunda bitkisel yağdan elde edilen bağlayıcı kullanılarak hazırlanan karışımların en az normal bağlayıcı ile hazırlanan karışımlar kadar performans sergilediği belirtilmiştir. Bunun yanı sıra koku ve çevreye salınan gaz açısından bitkisel yağdan elde edilen bağlayıcılarla hazırlanan karışımların daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir [87].

Fini vd. (2012) hayvansal artık olarak domuz gübresini kullandıkları çalışmada elde ettikleri biyoyağı, performans derecesi PG 64-22 olan saf bağlayıcıya ağırlıkça %2, %5 ve %10 oranlarında karıştırarak modifiye bitümler elde etmişlerdir. Elde edilen modifiye bitümler üzerinde yapılan deneyler sonucunda; kullanılan biyoyağ yüzdesi arttıkça saf bağlayıcıya göre viskozitenin düştüğü, $G^*/\sin\delta$ değerlerinin azaldığı, düşük sıcaklık performansının iyileştiği tespit edilmiştir. Biyobağlayıcılar saf bağlayıcının viskozitesini düşürmüş bu da karışımın işlenebilirliğini artırmış ve daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı gerektirmiştir. Daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının elde edilmesi bağlayıcıların yaşlanmasını azaltma yönünde katkı sağlamıştır. Bunun yanında bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklık performansını ve yorulma çatlağı oluşumuna karşı direncini iyileştirmiştir [77].

Yang vd. (2013) yapmış oldukları çalışmada ağaç artıklarının pirolizinden elde edilen biyoyağların bitümlü bağlayıcılarla birlikte kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Ağaç artıklarından elde edilen biyoyağ, %5 ve %10 oranlarında saf bitüme ilave edilmiş, biyomodifiyeli bağlayıcılar üzerinde dönel viskozimetre, RTFOT, PAV, DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarından ağaç artıklarından elde edilen biyoyağ kullanımının bitümlü bağlayıcıların viskozitesini düşürdüğü, yüksek sıcaklık performansını iyileştirdiği, düşük sıcaklık dayanımını olumsuz etkilediği ve yaşlanmasını arttırdığı tespit edilmiştir. Bu durum ağaç artıklarının pirolizinden elde edilen biyoyağların bitümlü bağlayıcılarla birlikte kullanılması durumunda işlenebilirlik, plentte harcanan enerji ve tekerlek izine karşı dayanım bakımından olumlu sonuçlar elde edileceğini göstermektedir [88].

Walters vd. (2014) performans derecesi PG 64-22 olan saf bitüm ile nanokil ve domuz gübresinden elde edilen biyoçarların ayrı ayrı ve birlikte katkı malzemesi olarak kullanılmasıyla 9 farklı modifiye bitüm elde etmişlerdir. Bu bağlayıcılar üzerinde yapılan deneyler; nanokille modifiye edilen bitümün viskozitesinin arttığını, biyoçar ve nanokil katkılarının saf bitümün sıcaklık hassasiyetini azalttığını, nanokil ve biyoçarın birlikte katkı malzemesi olarak kullanıldığı bağlayıcının viskozitesinin sadece biyoçar içeren modifiye bitümünkinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca biyoçar katkısının bitümde meydana gelen yaşlanmayı azaltıcı bir etki sağladığı belirlenmiştir [89].

Robertson vd. (2006), Dizhbite vd. (2004), Ouyang vd. (2006) yaptıkları çalışmalar sonucunda, bitkisel ve organik artıkların pirolizi sonucu elde edilen biyoçarların yapısında bulunan ligninin bir biyopolimer gibi kullanılabildiğini ve asfalt kaplamaların yaşlanmasında geciktirici etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir [90-91]. Bağlayıcı ağırlığınca %7 oranında lignin içeriğine sahip biyoçar kullanılması bitümlü bağlayıcının yaşlanmasını önemli oranda azaltmıştır [92].

McCready ve Williams (2007) mısır ligninini %3, %6, %9 ve %12 oranlarında bitümlü bağlayıcılara ilave ederek 52 farklı bağlayıcı elde etmişlerdir. Deney sonuçlarından lignin kullanımı ile yaşlanmanın azaldığı, tekerlek izi dayanımının arttığı ve düşük sıcaklık dayanımının değişmediği belirlenmiştir. Bu durum lignin kullanımının asfalt kaplamalarda termal ve yorulma çatlakları gibi yaşlanma ve oksidasyonla ilgili bozulmaları azaltarak kaplamanın daha uzun süre hizmet vermesini sağlayacağını göstermiştir [93].

Chen vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada odun talaşı hızlı pirolize tabi tutulmuş ve elde edilen biyoyağlar penetrasyonu 70 olan asfalt bağlayıcıya %10 ve %20 oranlarında ilave edilerek modifikasyon sonucunda biyoasfaltlar üretilmiştir. Üretilen biyoasfaltlar %5 ve %10 oranlarında öğütülmüş araç lastiğiyle (CR) modifiye edilmiş ve bir grubu RTFO testi ile yaşlandırma işlemine tabi tutularak toplamda 10 kombinasyonlu bağlayıcılar elde edilmiştir. Orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerine reolojik özelliklerini tespit etmek amacıyla dinamik kayma reometrisi (DSR) ve çoklu gerilme sünme-elastik geri dönme (MSCR) testleri uygulanmıştır. CR modifiyeli biyoasfaltın, orijinal ve modifiye edilmemiş biyoasfaltlara göre daha yüksek tekerlek izi ($G^*/\sin\delta$) değerine, daha düşük faz açısına, daha düşük geri kazanılamayan sünme uyumuna (J_{nr}), ve daha yüksek yüzde geri dönme (R) değerlerine sahip oldukları görülmüştür [94].

Zhao vd. (2013) yaptıkları çalışma ile farklı üretim parametreleriyle hazırlanan biyoçar ile modifiye edilen asfalt bağlayıcıda biyoçar kullanımının sıcaklık hassasiyetini ve bağlayıcının uzun dönem yaşlanmasını azalttığını, yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi direncini önemli ölçüde arttırdığını bunun yanında azda olsa daha iyi yorulma direnci gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Ayrıca en etkili biyoçarın küçük partikül büyüklüğüne sahip olan ve nispeten daha düşük sıcaklık ve ısıtma hızında elde edilen biyoçar olduğunu belirtmişlerdir [95] .

Zhao vd. (2014) çalışmalarında PG 64-22 performans dereceli saf bitüm ile katkı maddesi olarak dallı darı bitkisinin yavaş ve hızlı pirolizi sonucunda elde edilen biyoçar (%5, %10, %15 ve %20 oranlarında) ve ticari bir ürün olan aktif karbonu (%10 oranında) kullanılmış ve modifiye bağlayıcıların performans özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda genel olarak biyoçar kullanımının viskoziteyi artırması sebebiyle asfalt bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini azalttığı, bağlayıcının uzun dönem yaşlanmasında olumlu etki gösterdiği, tekerlek izi direnci açısından fayda sağladığı belirlenmiştir. Aktif karbon modifiyeli bağlayıcılarda yorulma direncinde artış görülürken biyoçar katkılı bağlayıcılarda herhangi bir değişiklik olmadığı, genel olarak biyoçar ile modifiye edilen bağlayıcıların ticari bir ürün olan aktif karbon modifiyeli bağlayıcılardan çok daha etkili olduğu tespit edilmiştir [96].

Zhao vd. (2014) yavaş piroliz yöntemiyle elde edilen pirolitik biyoçar, ticari ürün olan karbon siyahı ve mikroölçekli karbon fiberle modifiye ettikleri bitümlü sıcak karışımların performansını değerlendirmek amacıyla yaptıkları çalışmada, her bir katkı malzemesinden PG 64-22 saf bağlayıcıda ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında kullanarak 6 farklı kombinasyon elde etmişlerdir. Elde ettikleri modifiye bağlayıcıları reolojik özellikleri, karışımları ise tekerlek izi direnci, nem hassasiyeti ve çatlak performansı yönünden karşılaştırmışlardır. Yapılan deneyler biyoçarın sıcaklık hassasiyetini azaltma konusunda karbon siyahı ve karbon fiberden daha etkin olduğunu, yine biyoçarın karışımların nem hassasiyetine karşı direncini iyileştirme açısından daha iyi performans gösterdiğini, tekerlek izi direncini diğer katkılara göre daha fazla arttırdığını göstermiştir. Karışımların çatlak ilerleyişine karşı performanslarını değerlendirmek amacıyla yapılan yarım daire deneyi ise karbon siyahının çatlak ilerleyişi açısından olumsuz sonuç verdiğini, karbon fiber ilavesinin çatlak performansı açısından pozitif etki gösterdiğini, biyoçar kullanımının performans açısından olumsuz sonuç verdiğini göstermiştir [97].

Zhao vd. (2014) tarafından yapılan benzer bir çalışmada dallı darı bitkisinden hızlı piroliz yöntemiyle elde edilen biyoçar, bitümlü bağlayıcıda ve karışımda modifiye amaçlı kullanılmıştır. Elde edilen modifiye bağlayıcıların reolojik karakteristikleri ve hazırlanan karışımların tekerlek izi direnci ve yorulma performansları değerlendirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda biyoçar modifiyesinin bitümlü bağlayıcının tekerlek izi oluşumuna karşı direncini önemli oranda iyileştirdiği fakat yorulma çatlağı direncini çok az miktarda arttırdığı sonucu ortaya çıkmıştır. Modifiye bitümle hazırlanan sıcak karışımda tekerlek izi, nem hasarı ve çatlak ilerleyişinde daha iyi sonuç görüldüğü ortaya çıkmıştır [98].

Bostancıoğlu (2012) yapmış olduğu çalışmada fındık kabuğu artıklarından kimyasal aktivasyon yöntemi ile elde edilen aktif karbonun ve bitkisel atıkların asidik hidrolizi ile elde edilen furfuraldan üretilmiş furan reçinesinin bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliğini

araştırmıştır. Laboratuvar ortamında farklı aktivasyon koşullarında üretilen aktif karbon Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve taramalı elektron mikroskobu (TEM) yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Farklı boyut, oran ve karıştırma koşullarında aktif karbon ve furan reçinesi ile modifiye edilen bağlayıcılara konvansiyonel ve Superpave bağlayıcı deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları hem aktif karbon hem de furan reçinesinin bitümün sertliğini artırdığını, sıcaklık hassasiyetini düşürdüğünü ve reolojik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Modifiye edilen bağlayıcılar ile hazırlanan karışımlara ait mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla Marshall stabilite, dolaylı çekme mukavemeti (ITS), nem hasarı (Modifiye Lottman), indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) ve Nicholson soyulma deneyleri uygulanmıştır. Karışım deneylerinden elde edilen sonuçlara göre her iki katkı malzemesinin de karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı direncini arttırdığı ve tekrarlı yükler altında yorulma dayanımını geliştirdiği belirlenmiştir [99].

Atasağun (2009) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında çörekotu küspesinin pirolizinden elde edilen biyoyağı bitüm katkı maddesi olarak kullanmıştır. Çörekotu küspesi biyoyağı bitüme %3 ve %6 oranlarında ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan çörekotu küspesi biyoyağı kullanımının bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası ve $G^*/\sin\delta$ gibi yüksek sıcaklık parametrelerini olumsuz yönde etkilerken düşük sıcaklık parametrelerini (rijitlik ve m-değeri) iyileştirdiği belirlenmiştir. Bu çalışmada karışım numuneleri hazırlanmamış sadece bağlayıcı deneyleri yapılmıştır. Bağlayıcı deneyleri, katkıların bitümlü bağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklık performanslarına etkileri ile ilgili yeterli bilgi vermelerine rağmen özellikle bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımları üzerindeki etkilerinin değerlendirilebilmesi için karışım numunelerinde de kullanılması gerektiği belirtilmiştir [100].

Çelik vd. (2012) yapmış olduğu çalışmalarda işlenmiş bir malzeme olan atık lastiğin pirolizinden elde edilen biyoyağın bitümlü bağlayıcı ve karışımların performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir [101-102].

Alataş vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada iki farklı boyutta (No.40 elek üstü ve altı) öğütülmüş araç lastiği (CR) ve öğütülmüş araç lastiğinin pirolizinden elde edilen karbon siyahı bitüm modifikasyonunda %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılmıştır. Elde edilen saf ve modifiye bitümler üzerine dönel viskozite (RV), yumuşama noktası, penetrasyon ve DSR deneyleri uygulanmıştır. Bağlayıcıların ısı hassasiyetini belirlemek amacıyla penetrasyon indeksi (PI) değerleri hesaplanmıştır. Yumuşama noktası, penetrasyon ve RV deneyleri sonucunda CR modifiyeli bağlayıcılarda katkı miktarı arttıkça penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin ise düzenli olarak arttığı görülmüştür. Bu sonuç CR modifikasyonunun bitümün rijitliğini arttırdığını göstermiştir. CR'ın farklı elek boyutlarında kullanılmasının deney sonuçlarına önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. No.40 elekten geçen CR ile modifiye edilen bağlayıcılardan %5 içerikli olan haricinde diğerlerinin PI

değerlerinin saf bağlayıcıdan daha düşük olduğu görülmüştür. CR içeriği arttıkça bağlayıcıların tekerlek izine karşı dayanım parametrelerinin ve elastikiyetlerinin arttığı DSR deneyi sonucunda belirlenmiştir. CR'nin pirolizi sonucunda elde edilen karbon siyahının, bitüm modifikasyonunda CR'nin etkinliğini azalttığı görülmüş ve bunun yanında No.40'dan geçen CR'nin karbon siyahının saf bitümün özelliklerini iyileştirmede sonucuna varılmıştır [103].

Kumar vd. (2018) 450°C'de yapılan piroliz yoluyla biyoyakıt üretmek için kullanılan gül kestanesi (*Mesua Ferrea*) tohumunun atık kabuğundan oluşan biyoçarların asfalt bağlayıcıların modifiyesi için kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Piroliz sonucunda oluşan biyoçarlar öncelikle 150 µm'lik elekten elenerek elde edilmişlerdir. Biyoçarların fiziksel ve kimyasal karakterizasyonunu belirlemek için SEM, FTIR ve X-ray kullanılmıştır. Biyoçarlar modifiye amacıyla bağlayıcıya %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ilave edilmişlerdir. Modifiye bağlayıcıların tekerlek izi ve yorulma dirençleri ile yaşlanmaya karşı hassasiyetleri belirlenerek orijinal bağlayıcıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma DSR ve MSCR testleriyle biyoçar kullanımının bağlayıcıların tekerlek izi direncini iyileştirdiğini göstermiştir. Bunun yanı sıra bağlayıcıların reolojik yaşlanma indeksleri değerlendirildiğinde, bağlayıcıların modifiye edilmesinde biyoçar kullanımının yaşlanmaya karşı direnci artırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca biyoçarların SEM görüntülerine dayanarak sahip oldukları pürüzlü ve gözenekli yapılarının modifikasyona olumlu etkisinin olduğunu belirtilmiştir [104].

Zhang vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada bitümlü bağlayıcının performansını artırmak amacıyla katkı maddesi olarak 2 farklı partikül boyutunda (75 µm-150 µm arası ve 75 µm altı) ve 3 farklı katkı oranlarında (%2, %4 ve %8) biyoçar ve 75 µm altı boyutunda ince grafit tozu kullanılarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü, biyoçarın gözenekli ve pürüzlü bir yapıya sahip olduğunu pul grafitin ise yoğun ve pürüzsüz yüzey yapısına sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmada modifiye bağlayıcıların özelliklerini değerlendirmek için dönel viskozite (RV), dinamik kayma reometresi (DSR), dönel ince film halinde ısıtma (RTFO), basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ve kırılgan eğme reometresi (BBR) testleri yapılmıştır. Biyoçarın gözenekli ve pürüzlü yapısı bitümlü bağlayıcıda pürüzsüz yapıda olan grafitten adezyon açısından daha iyi yapışma etkileşimi gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda özellikle daha küçük partikül boyutu ve daha yüksek biyoçar katkı içeriğine sahip bağlayıcıların grafit modifiyeli bağlayıcılardan yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi ve yaşlanmaya karşı direnç açısından çok daha üstün olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra diğer modifiye bağlayıcılarla karşılaştırıldığında 75 µm altı boyutunda %4 biyoçar katkı içeriğine sahip olan bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklıkta çatlak direnci açısından daha iyi bir performans sergilediği tespit edilmiştir. Bu nedenle bu tip biyoçarlar bitümlü bağlayıcılarda uygun katkı maddeleri olarak tavsiye edilmiştir [105].

Zhou ve Adhikari (2019) farklı yaşlanma koşullarında farklı biyoçar içerikleriyle modifiye edilmiş biyo-asfaltın akışa bağlı kristalleşmesini değerlendirmek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Biyoçarla modifiye edilen asfaltın reolojik özelliklerini DSR testiyle, morfolojik özelliklerini ise optik mikroskop kullanarak değerlendirmişlerdir. Biyoçar ve biyoyağ atık ağaçların 500 °C’de piroliz edilmesiyle elde edilmişlerdir. Biyo-asfalt, biyoyağın PG 58-28 sınıfı bitüme %10 oranında ilavesiyle 2000 rpm de 120°C de 30 dk karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen biyo-asfalta %2, %4, %6 oranlarında biyoçar ilave edilerek biyoçar modifiyeli biyo-asfalt üretilmiştir. Ultraviyole, PAV ve RTFOT yöntemiyle yapılan yaşlandırma işlemleri sonucunda, biyoçarla modifiye edilen biyo-asfaltın kristalleşme durumunu büyük ölçüde etkilediğini ve kristal oluşumunu desteklediğini göstermiştir. Sonuçlar, biyoçar ilavesinin akış kaynaklı kristalleşmeyi iyileştirebileceğini ve biyo-asfaltın yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirebileceğini göstermiştir [106].

5. MATERYAL VE METOT

5.1. Malzeme Temini, Piroliz Sistemi ve Piroliz İşleminin Gerçekleştirilmesi

Tez çalışması kapsamında öncelikle biyokütleler (öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğu, öğütülmüş ceviz kabuğu ve talaş) ve ana bağlayıcı olarak TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen B 160/220 sınıfı saf bağlayıcı temin edilmiştir.

Çalışmada biyokütle kaynağı olarak kullanılan öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğu Malatya ilinde bulunan Tersun Kayısı Çekirdeği İşleme Sanayi firmasından, öğütülmüş ceviz kabuğu Sakarya ilinde bulunan Alesta Naturel Mühendislik ve Orman Ürünleri San. ve Tic. Ltd. Şti firmasından, talaş ise Elazığ ili organize sanayi bölgesinde yer alan Samet Ahşap Mobilya San. Tic. Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. Temin edilen biyokütleleri aynı granül boyutunda kullanmak amacıyla No. 50 elekten geçen malzemeler bu çalışmada kullanılmıştır. Böylece biyokütlenin boyutunun deney sonuçlarına etki etmemesi amaçlanmıştır.

Çalışmada kullanılan öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğu, öğütülmüş ceviz kabuğu ve talaş'ın No. 50 elekten elendikten sonra kullanılacak malzemeler Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğu (a), ceviz kabuğu (b) ve talaş (c) biyokütlelerinin elendikten sonraki kısmı

Biyokütlelerin piroliz işleminin gerçekleştirilmesi amacıyla tez çalışmasında kullanılmak üzere özel yavaş piroliz cihazı tasarlanarak ÖYP desteğiyle yaptırılmıştır. Laboratuvar yavaş piroliz deney düzeneği; biyokütlenin konulacağı iç çapı 150 mm ve yüksekliği 240 mm boyutlarındaki yüksek sıcaklığa dayanıklı silindirik kap, deney sıcaklığının ayarlanabildiği programlama cihaz kutusu, su soğutma sistemi ve biyogazın soğuduktan sonra yoğunlaşarak yağa dönüştürülerek biriktirildiği hazneden oluşmaktadır. Yavaş piroliz deney düzeneğini oluşturan bölümler Şekil 5.2'de, cihazın genel görünümü ise Şekil 5.3'de görülmektedir.



Şekil 5.2. Yavaş piroliz deney düzeneğini oluşturan bölümler



Şekil 5.3. Laboratuvar yavaş piroliz deney düzeneğinin genel görünümü

Piroliz işlemine başlamadan önce biyokütlenin miktarının yapılacak karbonizasyona etkisini ortadan kaldırmak amacıyla cihazın haznesine her seferinde 1000 gram biyokütle konularak deney yapılmıştır. Piroliz işleminin doğru şekilde gerçekleştirilmesi ve tam karbonize olmuş biyoçarların elde edilmesi için deneyin oksijensiz ortamda yapılması gerekmektedir. Biyokütlelerin konulduğu kabın ağzı piroliz işlemine başlanmadan önce dışarıdan hava almaması amacıyla sıkıca kapatılarak işlemin oksijensiz ortamda yapılması sağlanmıştır. Daha sonra cihazın soğutma sistemi ve buz dolu kaba daldırılan yağ haznesi birleştirilerek cihaz piroliz işlemine hazır hale getirilmiştir. Cihazın programlama düzeneği istenilen piroliz sıcaklığına ayarlanarak deney başlatılmıştır. Sistemden gaz çıkışının başlaması ile pirolizin başladığı anlaşılmış ve gaz çıkışı sona erinceye kadar cihazın çalışması devam ettirilmiştir. Gaz çıkışı sona erdiğinde piroliz işlemi sonlandırılmış ve piroliz kabı sıcaklığı ortam sıcaklığına düştüğünde kapak açılarak karbonize olmuş biyoçar kaptan çıkarılmıştır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Biyokütlenin piroliz cihazına doldurulması ve deney sonrası elde edilen biyoçarın görünüşü

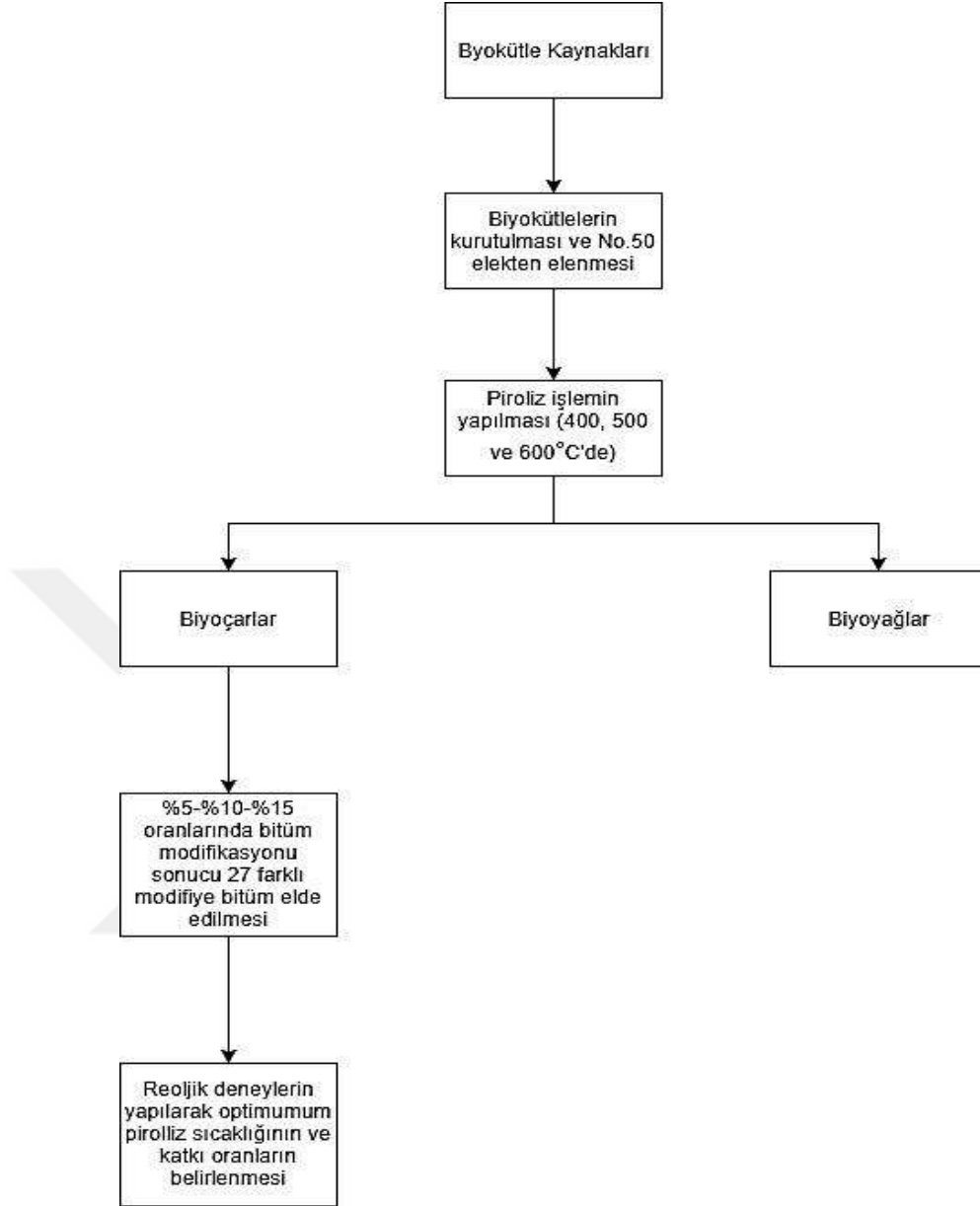
Piroliz sonrası katı ürün olarak biyoçarların yanısıra sıvı ürün olarak da biyoyağlar elde edilmiştir. Piroliz işlemi sonucu elde edilen biyoyağ örnekleri Şekil 5.5’de görülmektedir.



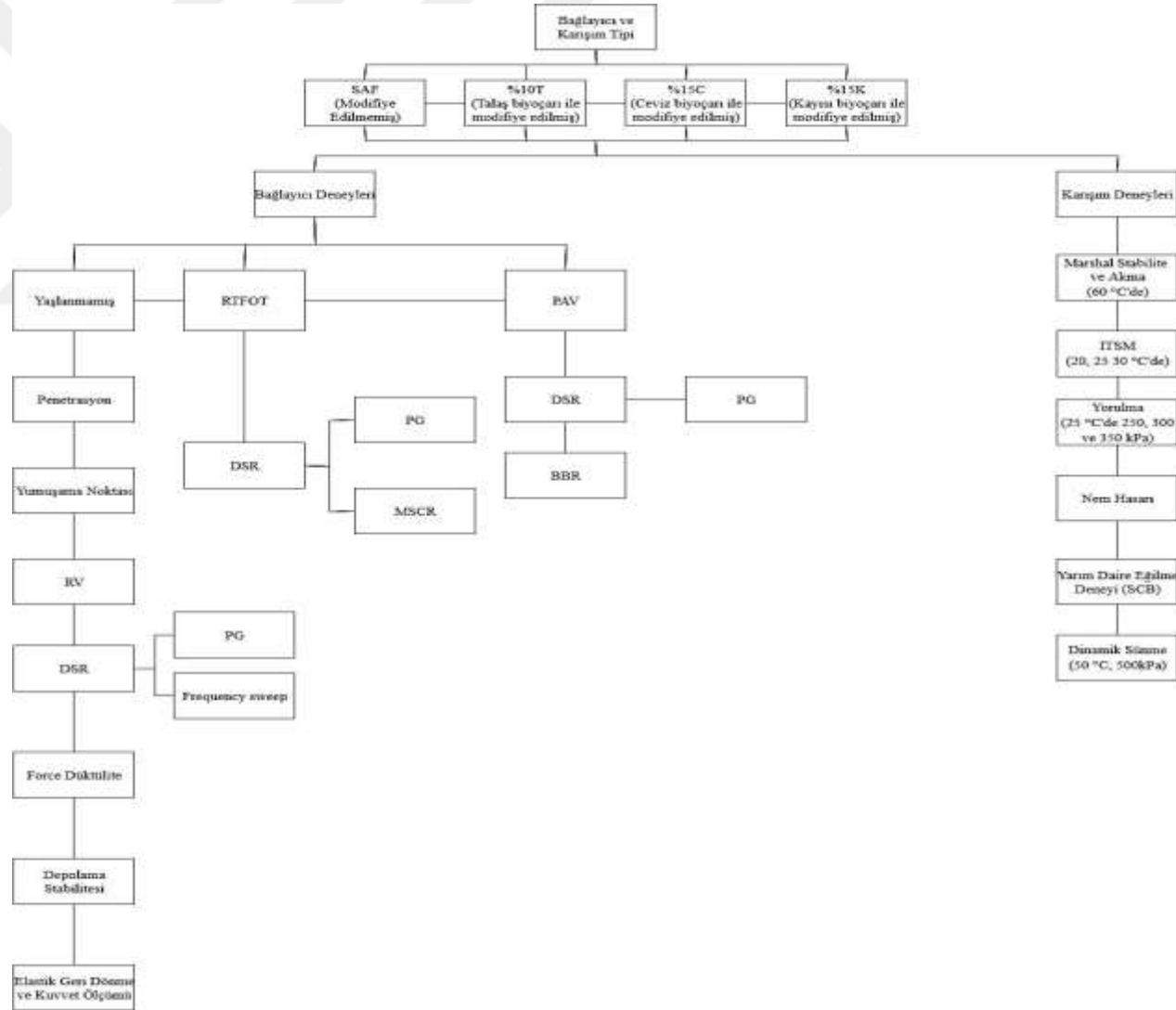
Şekil 5.5. Piroliz sonrası sıvı ürün olarak elde edilen biyoyağ örnekleri

Elde edilen biyoçarlar kaplara konulmuş, nemden korumak ve hava ile temasını önlemek için kapağı kapatılmış ve modifikasyon işlemine kadar oda sıcaklığında ve güneş ışığından uzak bir ortamda tutulmuştur.

Optimum piroliz sıcaklığının ve biyoçar oranlarının belirlenmesi ve çalışmanın deneysel planı Şekil 5.6 ve 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.6. Optimum piroliz sıcaklığının ve biyoçar oranlarının belirlenmesi için deneysel plan



Şekil 5.7. Deneysel plan

5.2. Çalışmada Kullanılan Ana Bağlayıcının Özellikleri ve SHRP Yöntemine Göre Uygun Bağlayıcı Sınıfı Seçilmesi

Deneyssel çalışmada ana bağlayıcı olarak TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen B 160/220 sınıfı bitüm kullanılmıştır. Saf bağlayıcıya uygulanan deneyler ve sonuçları ile EN 12591 [107] standardına göre şartname limitleri Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Saf bağlayıcı deney sonuçları

Özellikler	Standart	Sonuç	Şartname limiti
Yaşlandırılmamış			
Penetrasyon (0,1 mm, 100 g, 5 s)	EN 1426 [108]	168	160–220
Yumuşama Noktası (°C)	EN 1427 [109]	42,4	35 – 43
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	0,1879	-
Fraas Kırılma Noktası, (°C)	EN 12593 [110]	-19,2	< - 10
Düktilite, (cm)	EN 13589 [111]	> 100	> 100
RTFOT Sonrası			
Kütle Değişimi, en fazla, (%)	EN 12607-1 [112]	0,97	1,0
Penetrasyon, (25°C, 0,1mm)	EN 12607-1	73	-
Kalıcı Penetrasyon, en az, (%)	EN 12607-1	43,3	37
Yumuşama Noktası, en az, (°C)	EN 1427	53,2	37
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	0,5502	-
Yumuşama Noktasındaki Artış, en fazla, (°C)	EN 1427	10,8	11

Çalışmada tasarımın yapılacağı uygulama bölgesi olarak Elazığ ili seçilmiştir. Konum olarak 38°17' ile 39°11' enlemleri arasında bulunan Elazığ ilinin, Meteoroloji 9.Bölge Müdürlüğü'nden son 32 yıla ait olan her yılın ardışık en yüksek 7 günlük ve en düşük 1 günlük hava sıcaklık değerleri temin edilmiş olup bu değerler Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo'daki değerlerden 2011 yılına ait olan yüksek sıcaklık verileri Meteoroloji Bölge Müdürlüğündeki cihazlardan kaynaklı arızadan dolayı kaydedilemediğinden dolayı o yıla ait sıcaklık değerleri hava sıcaklık tahminlerine dayanarak belirlenmiştir.

Bu değerlerden yola çıkılarak son 33 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük sıcaklık periyotlarının aritmetik ortalamaları (231 değer), yüksek hava sıcaklığı ve 1 günlük en düşük sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalamaları (33 değer) alınıp düşük hava sıcaklık değerleri ortalamaları belirlenmiştir. Hesaplanan her iki sıcaklık değerlerinin ortalamaları ve bu değerlere ait standart sapmaları bulunarak Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

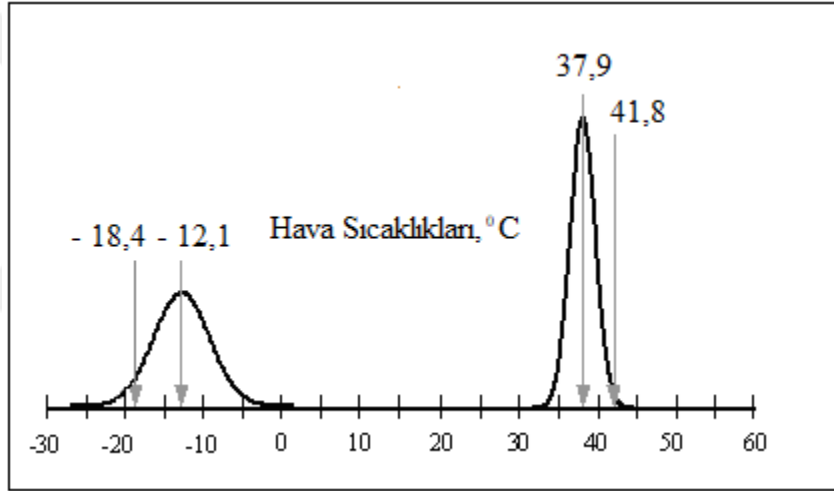
Tablo 5.2. Elazığ'ın 33 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri

Tarih	Yüksek Sıcaklık (°C)							Tarih	Düşük Sıcaklık (°C)
	1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün		
03.08.1987– 09.08. 1987	36,0	35,5	37,6	38,1	40,1	40,0	39,0	27.01.1987	-10,8
21.08.1988–27.08. 1988	35,0	36,3	36,3	35,5	36,5	36,6	34,7	22.01.1988	-8,7
25.07.1989–31.07. 1989	35,0	35,4	36,0	36,7	37,5	38,0	36,2	04.01.1989	-11,2
16.07.1990–22.07. 1990	37,7	35,0	37,2	37,6	40,4	40,4	36,0	11.01.1990	-15,8
30.07.1991–05.08.1991	38,2	38,0	36,0	36,4	39,8	39,0	39,2	07.02.1991	-14,6
11.08.1992–17.08. 1992	33,0	34,2	34,2	36,8	37,0	35,2	34,4	10.02.1992	-19,1
18.07.1994–24.07. 1993	34,5	36,8	39,4	40,2	40,2	40,0	38,0	16.02.1993	-18,6
10.07.1994–16.07. 1994	37,0	37,4	37,8	38,8	38,4	37,4	35,4	06.12.1994	-15,3
01.08.1995–07.08. 1995	36,0	36,2	37,0	37,6	37,0	35,4	35,6	23.01.1995	-10,4
10.07.1996–16.07. 1996	37,0	37,8	37,8	38,4	38,8	37,4	36,2	03.02.1996	-10,4
29.07.1997–04.08.1997	35,0	33,2	36,0	35,8	35,4	36,6	36,6	06.02.1997	-13,0
15.07.1998–22.07. 1998	39,0	39,6	39,8	37,9	38,5	40,1	39,7	19.01.1998	-10,3
30.07.1999–05.08.1999	35,0	35,2	35,8	37,3	38,8	38,8	37,3	21.02.1999	-8,0
26.07.2000–01.08.2000	38,3	39,4	39,8	40,7	42,2	41,8	40,0	22.01.2000	-16,5
25.07.2001–31.07. 2001	40,0	41,4	40,5	39,6	39,3	38,0	40,1	22.02.2001	-11,4
28.07.2002–03.08.2002	35,4	36,0	36,2	36,3	36,5	36,8	35,2	26.12.2002	-17,7
05.08.2003–11.08. 2003	35,5	33,2	35,0	39,2	35,6	37,0	37,2	23.02.2003	-14,4
27.07.2004–02.08.2004	36,0	36,0	36,6	37,3	38,3	39,0	38,5	09.01.2004	-12,4
25.07.2005–31.07. 2005	37,6	37,3	37,3	39,6	38,6	38,8	37,8	27.01.2005	-10,0
11.08.2006–17.08. 2006	39,2	40,6	41,2	40,6	40,2	40,2	38,7	22.01.2006	-13,0
25.07.2007–31.07. 2007	39,6	39,2	37,2	37,7	37,4	38,0	37,8	01.02.2007	-11,6
20.07.2008–26.07. 2008	38,8	39,0	38,4	39,2	40,0	39,4	37,6	03.02.2008	-13,2
14.08.2009–20.08. 2009	33,4	34,2	35,4	37,0	37,2	35,6	33,8	02.01.2009	-10,6
27.07.2010–02.08. 2010	39,0	40,0	39,4	39,6	40,0	39,6	39,8	27.01.2010	-9,0
27.07.2011–02.08. 2011	38,0	38,0	40,0	39,0	39,0	39,0	40,0	13.02.2011	-7,3
23.07.2012–29.07. 2012	40,5	41,1	40,3	39,6	40,1	39,9	39,3	03.02.2012	-12,3
07.07.2013–13.07.2013	36,5	37,4	37,2	37,0	35,9	35,5	35,7	11.01.2013	-10,7
13.08.2014–19.08.2014	38,8	39,8	41,4	40,4	39,9	37,9	38,0	04.02.2014	-9,6
09.08.2015–15.08.2015	38,3	39,3	39,3	38,5	39,8	40,1	38,8	10.01.2015	-10,0
20.08.2016–26.08.2016	40,4	40,2	39,4	38,5	38,8	38,5	38,3	27.01.2016	-15,4
08.08.2017–14.08.2017	39,0	40,4	41,3	39,5	38,4	37,3	38,4	30.01.2017	-10,8
08.07.2018–14.07.2018	36,4	37,1	39,5	40,1	39,7	39,6	37,2	29.12.2018	-7,9
09.08.2019–15.08.2019	37,6	36,7	35,8	37,9	40,7	42,2	40,2	10.01.2019	-8,8

Tablo 5.3. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları

Hesaplamalar	Yüksek Sıcaklık	Düşük Sıcaklık
Ortalama Sıcaklık (°C)	37,9	-12,1
Standart Sapma (°C)	1,9	3,1

Son 33 yıla ait ardışık 7 günlük maksimum sıcaklık değerlerinin ortalaması ve en düşük 1 günlük sıcaklık değerlerinin ortalamalarından %50 güvenilirlikte sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Standart sapma değerleri (s) kullanılarak %98 güvenilirlikte sıcaklık değerleri (ortalama+2s) hesaplanmıştır. Uygulama bölgesine ait Tablo 5.3'deki düşük ve yüksek hava sıcaklık değerlerinden yola çıkılarak temsili bir frekans dağılım eğrisi Şekil 5.8'deki gibi ifade edilmiştir.



Şekil 5.8. Elazığ iline ait en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının frekans dağılım eğrisi

Bu hesaplamalara göre ardışık 7 günlük en yüksek hava sıcaklığı ortalaması 37,9 °C standart sapması 1,9°C olarak bulunan Elazığ ili için güvenilirlik seviyesinin %98 olması için, hesaplanan ortalama sıcaklığa standart sapmanın 2 katının ilave edilmesiyle bulunan 41,8°C'lik sıcaklığa çok sıcak geçen bir yaz mevsiminde ulaşılma ihtimalinin %2 olarak kabul edilir.

En düşük sıcaklık ortalaması -12,1°C ve hesaplanan standart sapması 3,1°C olan Elazığ ilinde çok soğuk geçen bir kış mevsiminde ulaşılacak düşük sıcaklık standart sapmanın 2 katının düşük sıcaklık ortalamasına eklenmesiyle -18,4°C olarak bulunmuştur. Böylece bu sıcaklığa ulaşılabilme ihtimali %2 ye çekilerek güvenilirlik derecesi %98 olmuştur.

Superpave tasarım metoduna göre uygulama bölgesine uygun olarak seçilecek bağlayıcı sınıfı için tasarım sıcaklığı olarak kaplama sıcaklığı kullanılacağından ardışık 7 günlük en yüksek hava sıcaklığı esas alınmıştır. Kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki yüksek tasarım sıcaklığı

ve en düşük 1 günlük sıcaklık ortalaması esas alınarak kaplama yüzeyine göre düşük tasarım sıcaklığı SHRP yöntemine göre %50 güvenilirlik seviyesinde olması için aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{20mm} = (T_{havamaks} - 0,00618E^2 + 0,2289E + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 \quad (5.1)$$

$$T_{20mm} = (37,9 - 0,00618 \times 38,44^2 + 0,2289 \times 38,44 + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 = 58,4 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_{min} = T_{havamin} = -12,1 \text{ } ^\circ\text{C' dir.}$$

SHRP yöntemine göre %50 güvenilirlik derecesinde hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıklarının %98 güvenilirlik seviyesine göre hesaplanması aşağıdaki denkleme göre bulunmuştur.

$$T_{20mm\%98} = T_{20mm\%50} + 2S_{maks} = 58,4 + 2 \times 1,9 = 62,2 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5.2)$$

$$T_{min\%98} = T_{min\%50} + 2S_{min} = -12,1 + 2 \times (-3,1) = -18,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Uygulama bölgesi olarak seçilerek hava sıcaklık verilerine göre hesaplanan Elazığ iline ait tasarım sıcaklıklarının %50 ve %98 güvenilirlik seviyeleri için değerleri Tablo 5.4’de gösterilmiştir.

Tablo 5.4. %50 ve %98 güvenilirlik seviyeleri için hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları

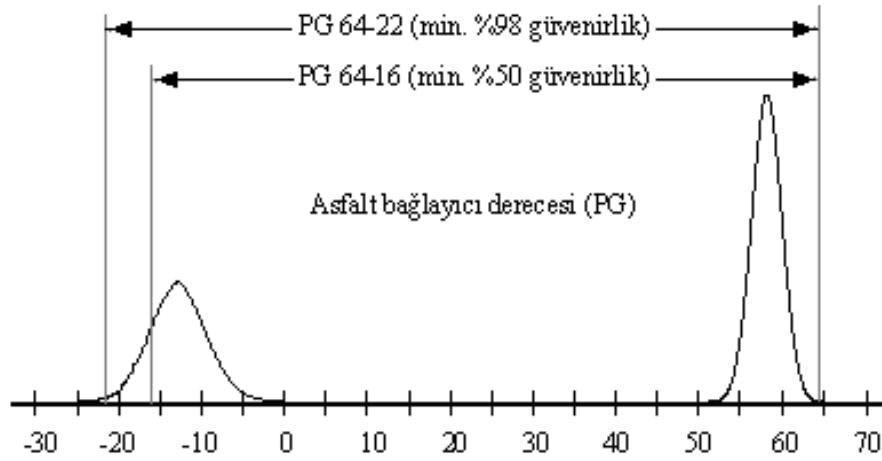
Yöntem	% 50 Güvenirlik (°C)				% 98 Güvenirlik (°C)			
	T _{havamaks}	T _{20mm}	T _{havamin}	T _{min}	T _{havamaks}	T _{20mm}	T _{havamin}	T _{min}
SHRP	37,9	58,4	-12,1	-12,1	41,8	62,2	-18,3	-18,3

SHRP yöntemine göre, uygulama bölgesi olarak seçilen Elazığ ili için %50 güvenilirlik seviyesindeki yüksek sıcaklık değeri 58,4°C, düşük sıcaklık değeri -12,1°C olarak bulunmuştur.

Bu güvenilirlik seviyeleri için seçilecek uygun bağlayıcı sınıfı PG 64–16 olacağı belirlenmiştir.

Bu yöneme göre %98 güvenilirlik seviyesi için hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 62,2°C, düşük sıcaklık değeri -18,3°C olarak bulunduğuundan uygulama bölgesi için uygun bağlayıcı sınıfı PG 64–22 olarak seçilmiştir.

Elazığ ili için seçilen uygun bağlayıcı sınıfına ait güvenilirlik derecesine göre sıcaklık dağılım grafiği Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Elazığ için uygun bağlayıcı sınıfı seçimi

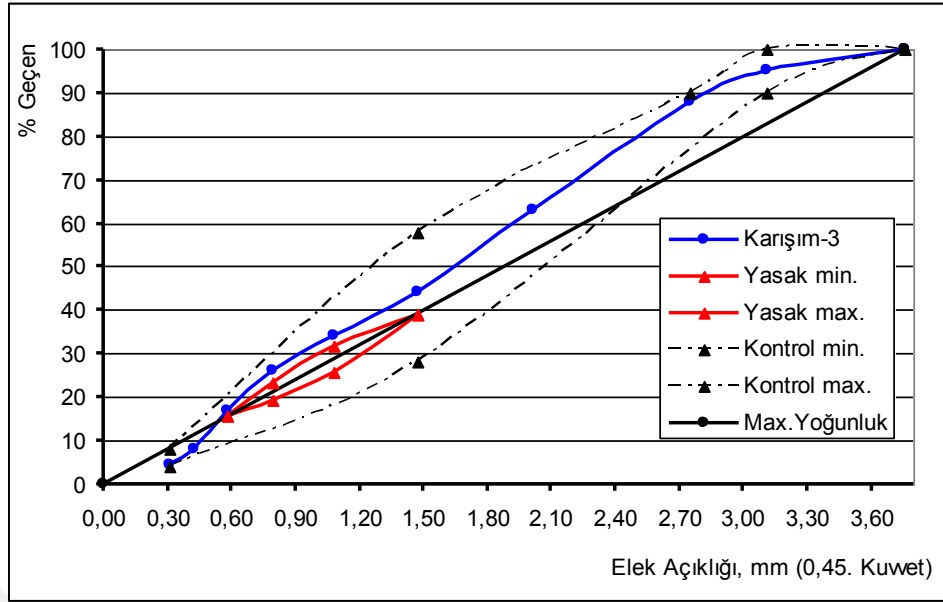
Uygulama bölgesi olan Elazığ ili için 20 yıllık hizmet süresine göre tasarım trafik tahminin 3 – 10 milyon eşdeğer standart tek dingil yükü aralığında olduğu ve normal trafik hızında olduğu kabul edilmiştir. Superpave tasarım yöntemine göre Elazığ ili için seçilen tasarım kriterindeki bağlayıcı sınıfı PG 64-22 olarak seçilmiştir.

5.3. Çalışmada Kullanılan Agregalar ve Özellikleri

Deneyisel çalışmada bitümlü sıcak karışımlarda kullanmak için agrega malzemesi olarak kırmataş kalker kullanılmıştır. Çalışmada kullanılacak agregalar Elazığ'ın Karayazı Bölgesi'nde faaliyet gösteren Elkisan Şirketine ait taş ocağından temin edilmiştir. Kullanılan agrega özellikleri ve uygulanan deneyler Tablo 5.5.'de verilmiştir. Karışımda kullanmak üzere seçilen agrega gradasyonu ise Şekil 5.10.'da verilmiştir.

Tablo 5.5. Kırmataş kalker agregasının özellikleri ve uygulanan deneyler [113]

Özellikler	Mineral Agregalar			Şartname Sınırı
	Kaba	İnce	Filler	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), (%) (TS EN 1097-2) [114]	29,2	-	-	Maks. 30
Aşınma Direnci (Mikro-Deval), (%) (TS EN 1097-1) [115]	17,4	-	-	Maks. 25
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (MgSO ₄ ile kayıp), (%) (TS EN 1367-4) [116]	16,7	-	-	Maks. 18
Metilen Mavisi (gr/kg) (TS EN 933-9) [117]	-	0,5	-	Maks. 1,5



Şekil 5.10. Çalışmada kullanılmak üzere seçilen agrega gradasyonu

5.4. Superpave Bağlayıcı Deneyleri

Superpave yönteminde bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlanmasını temsil etmesi amacıyla Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) ve uzun dönem yaşlanmayı temsil etmesi amacıyla Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) deneyleri kullanılmaktadır. Bağlayıcıların işlenebilirlik özelliklerini belirlemek amacıyla Dönel Viskozimetre (RV), düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve Direkt Çekme Deneyi (DTT) ve yüksek sıcaklık dayanımlarını belirlemek amacıyla Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi uygulanmaktadır.

5.4.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)

Karıştırma süresince bağlayıcının yaşlanması, laboratuarda Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) ile simüle edilmektedir. Bu deneyde asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın birleşik etkisini değerlendirmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimi tespit etmek amacıyla gerekli malzeme elde edilebilmektedir. TS EN 12607-1’de belirtilen bu deney, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi

Deneyde, her bir şişeye 35 gram bitüm doldurulup düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişeleri tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır.

Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek amacıyla, geri kalan altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Kütle kaybı aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmektedir. Denklemden M_1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M_2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir.

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (5.3)$$

5.4.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)

Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), kaplamanın servis ömrü boyunca bağlayıcılarda meydana gelen uzun dönemli sertleşme özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. PAV deneyi, RTFO deneyinden elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. AASHTO PP1 [118] standardına uygun olarak her bir numune kabına 50 gram RTFO deneyinden elde edilen bağlayıcı konulmaktadır. PAV deneyinde bağlayıcı sınıfına göre değişen (90–100 ve 110°C) belirli bir sıcaklıkta numunelere 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmaktadır [119]. Bağlayıcı sınıfına göre değişen deney sıcaklıkları Tablo 5.6'da verilmiştir. Deney aleti ise Şekil 5.12'de görülmektedir.

Tablo 5.6. Bağlayıcı sınıfına bağlı olarak PAV deney sıcaklıkları [119]

Bağlayıcı Sınıfları	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 5.12. PAV deney aleti

RTFOT ve PAV deneyinden elde edilen numuneler Superpave deneylerinde kullanılmakta ve yaşlandırılmış bağlayıcıların performansları ve şartname kriterlerine uygunlukları tespit edilmektedir.

5.4.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

Dönel vizkozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçla AASHTO T316 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır (Şekil 5.13). Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Genellikle orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C’deki viskozite değeri 3 Pa.s’yi (3000 cP) aşmamalıdır [120]. Deney için bağlayıcıdan yaklaşık olarak 30 gr. malzeme alınarak sıcaklığı 150°C’den daha düşük olan etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilir. Malzemeden yaklaşık olarak 11 gr. numune bölmesine doldurulur. Numune bölmesi, sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilir ve 15 dakika

sabit sıcaklıkta bekletilerek deney yapılır. Deneyde bir motor yardımıyla iğnenin düzenli olarak 20 rpm. hızla dönmesi sağlanmaktadır. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten itibaren üç adet okuma yapılır ve bu üç değerın ortalamasından bağlayıcının viskozitesi elde edilir. BSK'ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir [119]. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. Bu amaçla 135 ve 165°C sıcaklıkta yapılan dönel viskozimetre deneylerinden elde edilen değerler sıcaklık-viskozite grafiğinde yerine konularak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları elde edilmektedir.



Şekil 5.13. Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi

5.4.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi

Dinamik Kayma Reometresi deneyi, bağlayıcıların yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla işlem görmemiş ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken, bağlayıcıların yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla PAV yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm. çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını tespit etmek için ise 8 mm. çapında ve 2000 mikron yükseklikte, deneylerde kullanılan DSR deney aleti Şekil 5.14'de görülmektedir.



Şekil 5.14. Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi

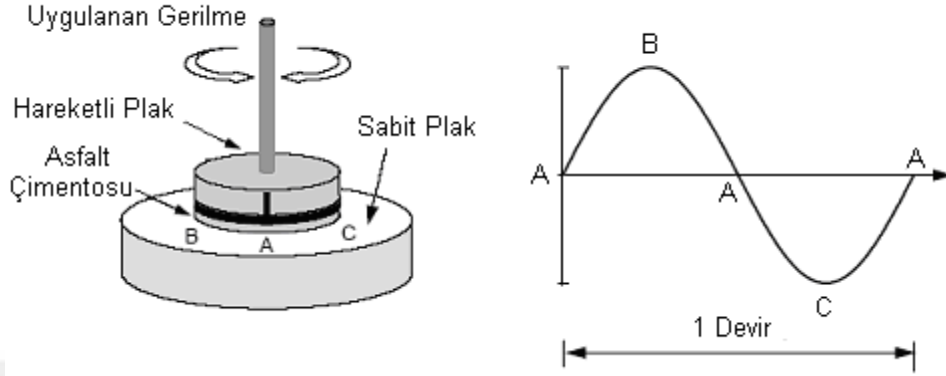
Deneyde bitümlü bağlayıcı doğrudan plaklar üzerine dökülebildiği gibi silikon kalıplar yardımıyla da numune hazırlanabilmektedir. Silikon kalıplarla numune hazırlanışı ve numunenin deney aletine yerleştirilişi Şekil 5.15’te görülmektedir.



(a) (b)
Şekil 5.15. Numunenin silikon kalıba doldurulması (a) ve üst plağa yerleştirilmesi (b)

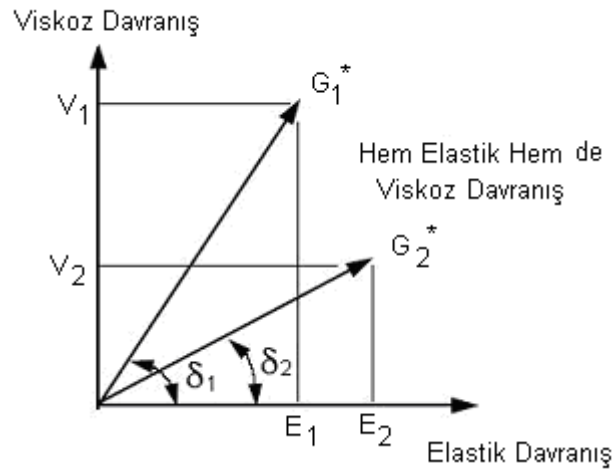
Deneyde, Şekil 5.16’da görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına bağlayıcı numunesi yerleştirilmektedir. Hareketli üst plak A noktasından B noktasına gitmekte geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır. Deneyde

dönme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir/saniye’ dir. Deneyde ortam şartlarını yansıtmaması amacıyla 10 devir ön koşullandırma yapılır. Daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır [119].



Şekil 5.16. DSR deneyinde numunelere uygulanan deformasyon yönleri [119].

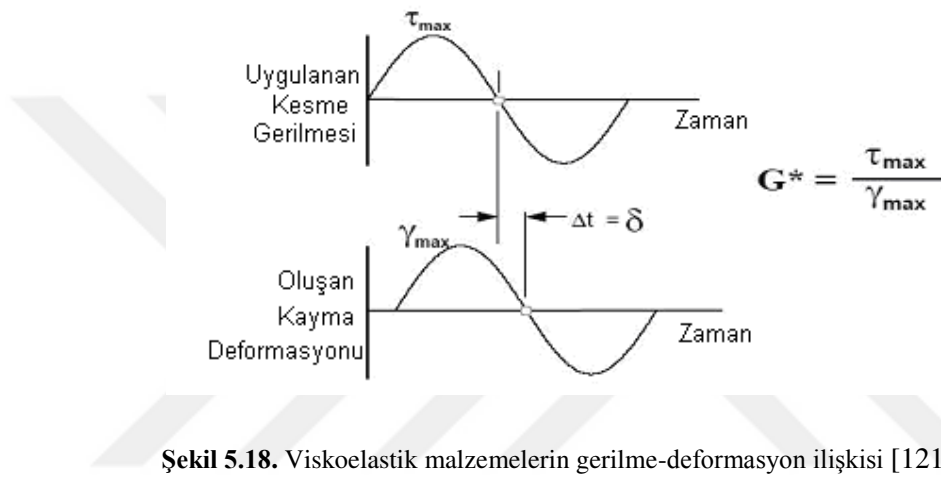
Dinamik kayma reometresi deneyi, bitümlü bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir. G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı asfalt çimentosunun gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem G^* hem de δ değerleri bitümlü bağlayıcının sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir (Şekil 5.17) [121].



Şekil 5.17. Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özelliği [121]

Viskoelastik davranışı ifade eden Şekil 5.17’de görüldüğü gibi yatay eksen elastik davranışı (yükleme hızı yüksek ve sıcaklık düşük) ifade ederken düşey eksen ise viskoz davranışı

(yükleme hızı düşük ve sıcaklık yüksek) ifade etmektedir. Ancak normal kaplama ısısı ve normal yükleme durumlarında bitümlü bağlayıcılar hem elastik hem de viskoz davranış sergilemektedir. Bağlayıcıların viskoelastik özelliğe sahip olması ve her bir bağlayıcının birbirinden farklı olması nedeniyle 1 ve 2 numaralı asfaltların yük altındaki viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklı olmaktadır. Şekilden görülebileceği gibi viskoelastik özellik hem G^* 'a hem de δ 'a bağlıdır. Bu nedenle bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özelliği, G^* ve δ birlikte göz önüne alınarak belirlenmelidir. Faz açısı (δ), uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır. Faz açısı Şekil 5.18'de gösterilmiştir [121].



Şekil 5.18. Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi [121].

AASHTO TP-5 standardına uygun olarak yapılan bu deneyde yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım şartname limitleri Tablo 5.7'de verilmiştir [121].

Tablo 5.7. DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri [121].

Bağlayıcı Türü	Deney Amacı	Şartname Limitleri
Orijinal	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Minimum 1,00 kPa
RTFOT Kalıntısı	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Minimum 2,2 kPa.
PAV Kalıntısı	Yorulmaya karşı dayanım	Maksimum 5000 kPa

5.4.5. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

Termoplastik özelliğinden dolayı bitüm, düşük sıcaklıklarda rijit (katı) özellik göstermektedir. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyinin amacı, düşük sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcıların rijitlik ve mukavemet özellikleri arasındaki ilişkinin tam olarak belirlenememesinden dolayı belirli bir sıcaklıkta sabit yük altında bağlayıcının ne kadar defleksiyon yapacağını tespit etmektir [119]. Bu deney için PAV deneyinden elde edilen yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. BBR deney aleti Şekil 5.19'da görülmektedir.



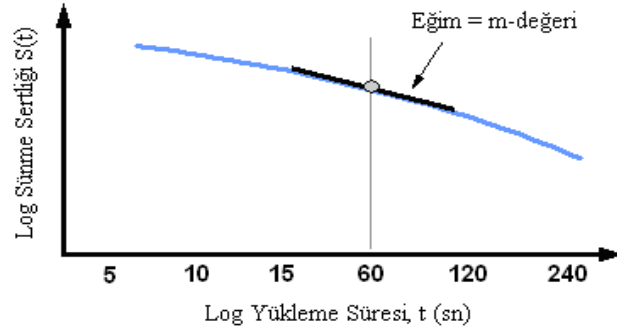
Şekil 5.19. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti

Deney boyunca bitüm kiriş numunesi bağlayıcı sınıfına göre sabit düşük sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Deney için 6,35x127x12,7 mm. boyutlarındaki kalıplar kullanılmaktadır. AASHTO T313 standardına uygun olarak yapılan kiriş eğme reometresi deneyinde bitüm kirişin orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN'luk yük etki ettirilmektedir. BBR deneyi için numune hazırlanması ve kalıptan çıkartılan numuneler Şekil 5.20'de görülmektedir.



Şekil 5.20. BBR deneyi için numune hazırlanması ve kalıptan çıkartılan numuneler

Deney sonunda yük ve defleksiyon, bağlayıcının sünme sertliğini ve sünme oranını (m-değeri) tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Sünme sertliği, numunelerin sabit sünme yüklerine karşı dayanımının bir göstergesiyken sünme oranı (m-değeri) ise sünme sertliğindeki değişiklikler ile yükleme süresi arasındaki oranı ifade etmektedir. Yüke ve defleksiyona bağlı olarak sünme sertliği değeri belirlendikten sonra sünme sertlik değerlerinin zamanla değişimini gösteren bir grafik çizilir (Şekil 5.21). Bu grafikte eğriye teğet olan doğrunun 60. saniyedeki eğimi sünme oranını (m-değeri) vermektedir. AASHTO T313 standardına göre sünme sertlik değerinin maksimum 300 Mpa ve sünme oranı değerinin ise minimum 0,300 olması gerekmektedir.



Şekil 5.21. Sünme oranının belirlenmesi

5.4.6. Depolama Stabilitesi Deneyi

Bitüm çeşitli katkıları ile modifiye edilebilmektedir. Modifikasyon işleminde katkı türüne göre bitüm ile katkı arasında kimyasal veya fiziksel bağ oluşabilmektedir. Karışım sonrasında homojen bir yapı elde edilebilmesine rağmen özellikle fiziksel bağ oluşturan katkılarda modifiye bitümün depolanması durumunda bitüm-katkı fazında ayrışmalar meydana gelebilmektedir. Bitümlü bağlayıcıların depolamaya karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla EN 13399, 2011 standartına göre depolama stabilitesi deneyi uygulanmaktadır [122].

Deneyde homojen şekilde hazırlanmış modifiye bitüm 3 gün boyunca 180°C sıcaklıkta dikey bir tüpte muhafaza edilmektedir. Numune soğuduktan sonra üç eşit parçaya kesilmektedir. Numunenin faz ayrışmasından meydana gelen farklılıklarını daha iyi değerlendirebilmek amacıyla tüpün üst ve alt kısımları analiz edilmektedir. Deneyde kullanılacak tüpler cilasız alüminyumdan yapılmış olmalıdır. Boyları minimum 160 mm, çapları 30-40 mm arasında olmalı ve tek taraftan kapalı olmalıdır. Bu tüpler tipik diş macunu tüpleridir. Tüplerin yerleştirileceği etüv üst üste 3 gün boyunca 180±5°C sıcaklığı muhafaza edebilmelidir. Isıtılan ve homojen şekilde karıştırılan numune, tüpün içine 100-120 mm yüksekliğinde doldurulmaktadır. Doldurma işlemi sırasında hava kabarcığı kalmasından kaçınılmalıdır. Numune tüplere doldurulduktan sonra numunenin yüksek sıcaklıktaki depolama sürecinde havayla herhangi bir reaksiyona girmemesi için tüpün ağzı sıkıca kapatılmalıdır. Termal genişleme olasılığından dolayı tüp hafifçe sıkıştırılmalıdır. Tüpler doldurulduktan sonra, önceden ısıtılmış etüve dik pozisyonda yerleştirilmekte ve 72±1 saat boyunca 180±5°C sıcaklığındaki etüvde dik pozisyonda muhafaza edilmektedir (Şekil 5.22).



Şekil 5.22. Numune doldurularak ağzı kapatılmış tüplerin dik şekilde etüve yerleştirilmesi

Tüpler etüvden çıkarıldıktan sonra aynı dik pozisyonda ve oda sıcaklığında soğutulmaktadır. Daha sonra alüminyum tüp modifiye bitüm numunesini elde etmek için çıkarılmaktadır. Tüpten çıkarılan silindirik numune yatay olarak temiz bir yüzeye yerleştirilmekte ve ısıtılmış bir kesici ile 3 eşit parçaya bölünmektedir (Şekil 5.23). Üst ve alt parçalar işaretlenerek ayrı kaplarda saklanırken ortadaki parça ise kullanılmamaktadır. Elde edilen numuneler üzerinde bağlayıcı deneyleri uygulanarak katkı maddelerinin depolanabilme özelliği değerlendirilmektedir.



Şekil 5.23. Etüvden çıkarılan tüplerin kesilmesi sonrası alt ve üst parçalarının görünümü

5.4.7. Elastik Geri Dönme ve Kuvvet Ölçümü Düktilite Deneyi

Elastik geri dönme, saf veya modifiye bağlayıcıların elastomerik özelliklerini değerlendirmek amacıyla uygulanan bir deney yöntemidir.

Deney için hazırlanan numune dolu kalıplar 25 °C sıcaklıkta 90 dk bekletildikten sonra taban plakaları ve yan kalıplar çıkartılarak bitüm numuneleri çekme plakalarına yerleştirilir. Daha sonra numuneler 25 ± 0.5 °C sıcaklıkta ve 50.0 ± 2.5 mm/dk hızda, 200 ± 1 mm uzunluğuna gelene kadar çekilir. Uzayan numuneler tam orta noktasından kesilerek 30 dk bitüm numunelerinin geri

dönmesi için beklenir (Şekil 5.24). Birbirinden uzaklaşan bitüm numuneleri arasındaki mesafe bir cetvel yardımıyla ölçülerek kaydedilir. Bu deney EN 13398 [123] standardına uygun olarak yapılmaktadır. Elastik geri dönme yüzdesi aşağıdaki Denklem 5.4 yardımıyla bulunur.

$$R_E = d/L * 100 \quad (5.4)$$

R_E :Elastik geri dönme (%)

d : Bitüm numuneleri arasındaki mesafe (mm)

L :Toplam uzama miktarı (200 ± 1 mm)



Şekil 5.24. Elastik geri dönme testinde uzayan numunelerin kesilmesi [5]

Kohezyon malzemenin moleküllerini bir arada tutan kuvvet olarak, düktilite deneyi ise bu molekülleri birbirinden ayırmaya neden olan kuvveti ölçen deney olarak tanımlanmaktadır. Düktilite, bitümlü bağlayıcının belirli bir çekme hızında kopmadan uzayabilme yeteneğidir. Deney 5°C sıcaklıkta 50 mm/min $\pm$ 2,5 mm/min çekme hızında EN 13589 standardına uygun olarak yapılmıştır [111]. Şekil 5.25’de kuvvet ölçümlü düktilite cihazı ve deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 5.25. Kuvvet ölçümlü düktilite cihazı ve deney numuneleri

5.4.8. Çoklu Gerilme Uygulaması Sonrası Sünme-Elastik Geri Dönme (MSCR) Deneyi

Çoklu gerilme sonrası sünme-elastik geri dönme (MSCR) testi, özellikle modifiye bağlayıcıların AASHTO M320 standardına göre performans seviyesinin belirlenmesindeki sınırlamaların üstesinden gelmek amacıyla geliştirilmiştir ve AASHTO tarafından kabul edilmiştir [124]. Yeni standart (AASHTO M332), yüksek sıcaklıklarda bağlayıcıların davranışını karakterize etmek için MSCR testini kullanmaktadır. Bu testin mevcut M320 standardına göre, özellikle modifiye edilmiş bağlayıcıların tekerlek izi direncini daha iyi yansıttığı belirtilmiştir.

AASHTO M332, çevresel faktörlere (PG 64-22 veya PG 70-22 gibi) ve tasarım trafik hacimlerine (standart, ağır, çok ağır ve aşırı) dayanan bağlayıcı sınıfları ve şartname sınırlarını belirlemektedir. Tablo 5.8’de MSCR testi için trafik hızına ve seviyesine göre bağlayıcı seçimi verilmiştir.

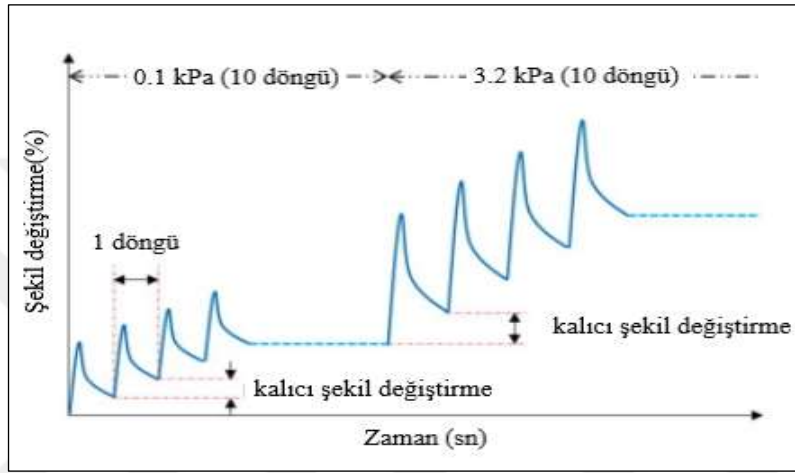
Tablo 5.8. MSCR testi için trafik hızına ve seviyesine göre bağlayıcı seçimi

Tasarım Eşdeğer Dingil Yükü (ESALs)(Milyon) ^a	Trafik yükü oranı		
	Sabit (Standing) ^b	Yavaş ^c	Standart ^d
<0.3	V	H	S
0.3-3	V	H	S
3-10	V	H	S
10-30	V	H	H
≥30	E	V	V

^a Kabul edilen 20 yıllık trafik seviyesi
^b 20 km/sa’ten düşük taşıt hızı
^c 20-70 km/sa trafik hızı
^d 70 km/sa’ten büyük trafik hızı
NOT: S, H, V ve E, AASHTO M 332 standardı altında Standart, Yüksek, Çok Yüksek ve Son derece yüksek dereceli performans seviyesini ifade etmektedir.

MSCR testi, tekrarlı sünme geri dönme (RCR) testinin geliştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu deney, AASHTO T350 [125] standardına uygun olarak T315 [126] standardına göre

hazırlanmış saf ve modifiye bağlayıcılar 25 mm plak kullanılarak 52, 58, 64°C sıcaklıklarda RTFOT kalıntısı üzerine yapılmaktadır. Test, 20 döngü 0,1 kPa, 10 döngü 3,2 kPa gerilme uygulanarak farklı sıcaklıklarda yapılmaktadır. Her bir döngü 1sn kayma gerilmesinin uygulanmasının ardından 9 sn geri dönmeye bırakılmaktadır. 0,1 kPa kayma gerilmesi lineer viskoelastik bölgedeki bir bağlayıcının davranışını karakterize ederken, 3,2 kPa gerilme seviyesi modifiye ve saf bağlayıcılar için lineer olmayan viskoelastik bölgedeki davranışı yansıtmaktadır. Şekil 5.26’da MSCR testinin örnek gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.26. 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyesinde 10 döngü için tipik MSCR test sonucu [127]

MSCR testi ile AASHTO M332’ye göre iki parametre elde edilmektedir. Bunlar, yüzde geri dönme (R) ve kalıcı sünme uyumu (Jnr) değerleridir. Bitümlü bağlayıcılar için ortalama yüzde geri dönme (R) değerleri sırasıyla, 0.1($R_{0.1}$) ve 3.2($R_{3.2}$) kPa kayma gerilmeleri seviyesinde Denklem 5.5 ve 5.6’ya göre hesaplanmaktadır [128].

$$R_{0.1} = \frac{\sum_{N=11}^{20} [\varepsilon_r(0.1, N)]}{10} \quad (5.5)$$

$$R_{3.2} = \frac{\sum_{N=21}^{30} [\varepsilon_r(3.2, N)]}{10} \quad (5.6)$$

Burada $\varepsilon_r(0.1, N)$ ve $\varepsilon_r(3.2, N)$, N döngü sayısında sırasıyla 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyesindeki yüzde geri dönmeyi, N ise her bir gerilme seviyesindeki döngü sayısını ifade etmektedir.

AASHTO M332 standardında yüzde geri dönme (R) parametresinin şu anda bir derecelendirme parametresi olarak kullanılmadığı belirtilmektedir [129]. Ancak bu parametre modifiye bağlayıcıdaki katkının varlığının bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Diğer taraftan Jnr parametresinin Superpave PG kriterine göre tekerlek izi direnci ile daha iyi bir kolerasyon sağladığı belirlenmiştir [130][131]. AASHTO M 332 standardına göre bağlayıcı sınıflandırma metodolojisine göre; (a) belirli bir trafik seviyesi için 3.2 kPa’da kalıcı sünme uyumu değerinin ortalaması, (b) maksimum değeri %75 olan 0.1 kPa ile 3.2 kPa gerilmesindeki kalıcı sünme uyumu arasındaki fark (Jnr_{diff}) olarak tanımlanmaktadır. Standartta dikkate alınan farklı trafik yük oranı kategorileri, standart (S), ağır (H), çok ağır (V) ve aşırı ağır (E) olarak verilmiştir. 0.1 kPa ($Jnr_{0.1}$) ve 3.2 kPa ($Jnr_{3.2}$) için kalıcı sünme uyumu değerlerinin hesaplanması Denklem 5.7 ve 5.8’de, Jnr_{diff} değerinin hesaplanması ise Denklem 5.9’da verilmiştir.

$$Jnr_{0.1} = \frac{\sum_{N=11}^{20} [Jnr(0.1, N)]}{10} \quad (5.7)$$

$$Jnr_{3.2} = \frac{\sum_{N=21}^{30} [Jnr(3.2, N)]}{10} \quad (5.8)$$

$$Jnr_{diff} = \frac{(Jnr_{3.2} - Jnr_{0.1})}{Jnr_{0.1}} * 100 \quad (5.9)$$

Tablo 5.9’da MSCR standardına ait bitümlü bağlayıcı performans seviyesi sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 5.9. Asfalt bağlayıcı performans seviyesi sınıflandırması [128]

PERFORMANS SINIFI	PG 52						PG 58					
	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	< 52						< 58					
Minimum KaplamaTasarım Sıcaklığı, °C	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
ORJİNAL BAĞLAYICI												
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C							230					
Viskozite, AASHTO T316 [132]; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135											
Dinamik Kayma, AASHTO T315 [126], G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C	52						58					
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI (AASHTO T 240) [133]												
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00											
MSCR, AASHTO T350: Standart Trafik “S” J _{nr3.2} , maksimum 4.5 kPa ⁻¹ J _{nrdiff} , maksimum %75 Test sıcaklığı, °C	52						58					
MSCR, AASHTO T350: Standart Trafik “H” J _{nr3.2} , maksimum 2.0 kPa ⁻¹ J _{nrdiff} , maksimum %75 Test sıcaklığı, °C	52						58					

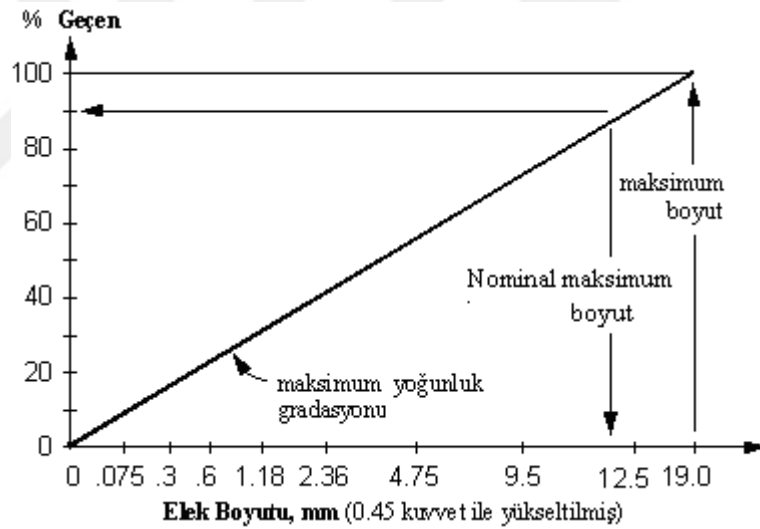
Tablo 5.9. Asfalt bağlayıcı performans seviyesi sınıflandırması (Devamı) [128]

MSCR, AASHTO T350: Standart Trafik “V” $J_{nr3.2}$, maksimum 1.0 kPa ⁻¹ J_{nrdiff} , maksimum %75 Test sıcaklığı, °C	52							58				
MSCR, AASHTO T350: Standart Trafik “E” $J_{nr3.2}$, maksimum 0.5 kPa ⁻¹ J_{nrdiff} , maksimum %75 Test sıcaklığı, °C	52							58				
	BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI (AASHTO R28) [118]											
PAV Deney Sıcaklığı, °C	90							100				
Dinamik Kayma, AASHTO T315, “S” $G^*sin\delta$, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13
Dinamik Kayma, AASHTO T315, “H, V, E” $G^*sin\delta$, maksimum, 6000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13
Sünme Sertliği, AASHTO T313 [134] S, maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı @ 60s, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30
Direkt Çekme, AASHTO T314, Kırılma şekil değiştirme, minimum %1.0 Test sıcaklığı @ 1.00 mm/min, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30

5.5. Superpave Karışım Tasarımı

5.5.1. Tasarım Agrega Gradasyonu Seçimi

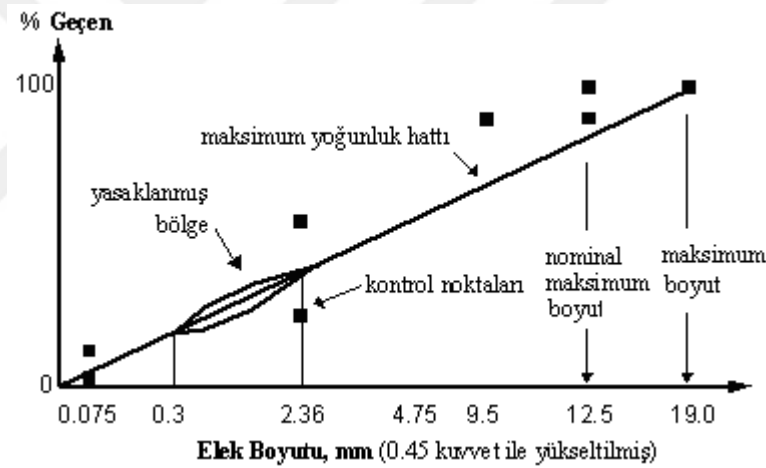
Geleneksel yöntemlerde agrega gradasyon limitleri verilirken yatay eksenle logaritmik ölçekte elek boyutu, dikey eksenle ise aritmetik ölçekte % geçen değeri verilerek kümülatif dane dağılımı belirlenmektedir. Superpave yönteminde farklı olarak 0,45 kuvvet grafiği kullanılmaktadır. Bu yöntemde dikey eksenle aritmetik olarak % geçen değeri verilirken yatay eksenle elek açıklığının 0,45. kuvveti alınarak değerler işaretlenmektedir. Burada, 0,45 üstel kuvvet eğrisinin en önemli özelliği, maksimum yoğunluktaki gradasyonu elde etmek içindir (Şekil 5.27). Bu yoğunluk ise, grafiğin orijininin yani 0,0 noktasından maksimum agrega boyutunun %100 geçtiğini gösteren noktaya çizilen doğru ile elde edilmektedir [135]. Maksimum yoğunluk hattına yakın veya paralel geçen malzemelerin içerisinde yeteri kalınlıkta bitüm film tabakasının oluşmasına izin vermeyecek kadar az boşluğa sahip olması sebebiyle, bu tür gradasyona sahip agrega karışımlarının kullanılmasından kaçınılmalıdır.



Şekil 5.27. 19 mm maksimum boyut için maksimum yoğunluk gradasyonu [135]

Superpave yönteminde ayrıca maksimum boyut, nominal maksimum boyut, yasaklanmış bölge ve kontrol noktaları ifadeleri yer almaktadır. Nominal maksimum boyut, agrega malzemesinin %10'dan fazlasının üstte kaldığı (veya %90'ının geçtiği) ilk eleğin bir üst elek boyutudur. Maksimum boyut, nominal maksimum boyuttan bir büyük elek boyutudur. Kontrol noktaları, gradasyon eğrisinin geçmek zorunda olduğu sınırları belirlemektedir. Bu sınır noktaları nominal maksimum elek, orta elek (2,36 mm) ve en küçük boyutlu (0,075 mm) eleklerin bulunduğu yerlerde belirlenmiştir. Yasaklanmış bölge ise, band şeklindeki bir bölgeyi temsil eder ve gradasyon eğrisinin geçmemesi gereken bir bölge olarak tanımlanır. Yasaklanmış bölge,

maksimum yoğunluk hattı üzerinde ve maksimum boyuta bağlı olarak 4,75 mm veya 2,36 mm ile 0,3 mm elekler arasında bir band şeklindeki bölgedir (Şekil 5.28). Bu tip gradasyon, bünyesinde çok fazla kum veya ince malzeme ihtiva ettiğinden yapım sırasında sıkıştırma zorluğuna ve sonrasında kalıcı deformasyonlara sebep olmaktadır. Yasaklanmış bölge, ince agrega boyutunda gradasyon eğrisinin maksimum yoğunluk hattına yakın ve paralel geçmesini engeller ve bu hattın uzaklaşmayı gerektirir. Çünkü maksimum yoğunluk gradasyonu, genellikle yetersiz agregalar arasındaki boşluk yüzdesi (VMA) sağladığından ve bu boşluklar içerisine yetersiz miktarda bitümlü bağlayıcı gireceğinden karışımın durabilitesi azalacaktır. Ayrıca bu tip gradasyonlar bitüm içeriğine çok duyarlı olup bitüm içeriğindeki çok küçük değişimlerde bile kolayca plastik özellik gösterebilmektedir. Superpave yöntemi, agrega gradasyonunun yasaklanmış bölgenin altından geçmesini önermekle birlikte herhangi bir mecburiyet getirmemektedir. Ancak, karışımın iyi bir performans göstermesi için gradasyonun özellikle yasaklanmış bölgenin altından geçmesi tavsiye edilmektedir [135].



Şekil 5.28. 19 mm maksimum boyut için Superpave gradasyon limitleri [135]

Superpave yönteminde, Tablo 5.10’da görüldüğü gibi nominal maksimum agrega boyutuna göre tanımlanan beş çeşit agrega karışımı kullanılmaktadır. Ayrıca, bu beş Superpave karışımı için kullanılan sayısal gradasyon limitleri Tablo 5.11’de görülmektedir.

Tablo 5.10. Superpave karışım gradasyonları [135]

Nominal Maksimum Boyut, mm	Maksimum Boyut, mm
37,5	50
25	37,5
19	25
12,5	19
9,5	12,5

Tablo 5.11. Superpave karışım gradasyon limitleri [135]

Standart Elek (mm)	Yüzde Geçen Kriteri (Kontrol Noktaları)				
	Nominal Maksimum Elek Boyutu				
	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm
50,0					100
37,5				100	90–100
25,0			100	90–100	
19,0		100	90–100		
12,5	100	90–100			
9,5	90–100				
2,36	32–67	28–58	23–49	19–45	15–41
0,075	2,0–10,0	2,0–10,0	2,0–8,0	1,0–7,0	0,0–6,0
Elek	Tavsiye Edilen Yasaklanmış Bölge				
4,75				39,5	34,7
2,36	47,2	39,1	34,6	26,8–30,8	23,3–27,3
1,18	31,6–37,6	25,6–31,6	22,3–28,3	18,1–24,1	15,5–21,5
0,6	23,5–27,5	19,1–23,1	16,7–20,7	13,6–17,6	11,7–15,7
0,3	18,7	15,5	13,7	11,4	10,0

5.5.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Tasarım Bitüm İçeriklerinin Tespit Edilmesi

Hazırlanan deneme agregası karışımlarından tasarım agregası gradasyonu seçildikten sonra, tahmini bitüm içeriğinde, tahmini bitüm içeriğinin %0,5 ve %1,0 üstündeki yüzdelere ayrıca tahmini bitüm içeriğinin %0,5 altında olmak üzere en az dört ayrı bitüm içeriğinde, her bitüm içeriği için en az iki numune olmak üzere toplam 8 bitümlü sıcak karışım numunesi hazırlanmaktadır. Bu dört bitüm içeriği, Superpave karışım tasarımı yöntemi için minimum gereksinimdir. Hazırlanan BSK numuneleri kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulduktan sonra önceden belirtilen şekilde sıkıştırma sıcaklıklarında yoğurmalı pres ile tasarım yoğurma sayısında (Ndes) sıkıştırılmaktadır. Yukarıda belirtilen şekilde hava boşluğu yüzdesi (Va), agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), bitümle dolu boşluk yüzdesi (VFA), filler oranı (DP), %Gmm@Nini., %Gmm@Ndes. değerleri belirlenmekte ve bu değerler ile bitüm içeriği grafikleri çizilmektedir. Hava boşluğu yüzdesi (Va)-Bitüm içeriği grafiğinden %4 boşluğa tekabül eden bitüm içeriği tasarım bitüm içeriği olarak seçilmektedir. Diğer grafiklerde bu bitüm içeriğine karşı gelen değerler alınarak şartname kriterleri ile karşılaştırılmakta ve uygunluğu tespit edilmektedir.

Ayrıca son olarak, tespit edilen tasarım bittüm içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılmakta ve yoğunluk değerleri şartname kriterleri ile karşılaştırılmaktadır.

5.5.3. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Tez çalışmasında BSK numunelere uygulanan Marshall stabilite ve akma deneyi EN 12697-34 [136] standardına göre yapılmıştır. Standartta stabilite; deformasyona karşı maksimum dayanım olarak, akma ise maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede meydana gelen deformasyon olarak tanımlanmaktadır [137]. Standartta göre öncelikle sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçülerek kaydedilmektedir. Daha sonra numuneler $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 40 ile 60 dakika arasında bekletilmektedir. Kırma çenesi ise $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki suda 30 dakika veya $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 1 saat bekletilmelidir. Bu sürenin sonunda numune sudan çıkarılarak kırma çenesine ortalananak biçimde yerleştirilmektedir. Numunenin çenenin alt ve üst parçalarına tam olarak temas ettiği kontrol edilmelidir. İçinde numune bulunan kırma çenesi Marshall stabilite aletine yerleştirilmekte ve numuneye 50 ± 2 mm/dakika hızla yükleme yapılmaktadır. Marshall deney düzeneği Şekil 5.27’de görülmektedir.



Şekil 5.29. Marshall stabilite ve akma aleti

Deneyde, maksimum yük ve maksimum yük sırasındaki deformasyon değerleri kaydedilmektedir. Numunenin sudan çıkmasından itibaren 40 sn içerisinde deney bitirilmelidir. Deneyde standart numune yüksekliğinin 63,5 mm. olduğu kabul edilmektedir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları aşağıdaki bağıntı yardımıyla tespit edilmektedir.

$$c = 5,24 \times e^{(-0,0258 \times h)} \quad (5.10)$$

Burada c, düzeltme katsayısı, h ise mm olarak numune yüksekliğidir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Bu sayede stabilite ve akma değerleri belirlenmektedir. Stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine sahip olan numuneler ve akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip numuneler değerlendirmeden çıkarılmaktadır. Daha sonra geri kalan numunelerin ortalaması alınarak numunelerin stabilite ve akma değerlerinin ortalamadan sapma miktarları belirlenmektedir. Eğer aynı oranda sapma (stabilite için %15, akma için %20) olan numuneler varsa numune serisi iptal edilmekte ve yeni bir seri numune üzerinde deney tekrarlanmaktadır.

Marshall stabilitesi değerinin akma değerine bölünmesi ile Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve asfalt betonunun deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir [138-141].

5.5.4. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi (AASHTO T 283)

Bitüm ile agrega arasındaki adezyon, uzun vadede kaplamanın performansının yüksek olmasını sağlayan en önemli parametrelerden biridir. Bitüm ile agrega arasına giren su adezyonun azalmasına dolayısıyla BSK kaplamalarda erken bozulmalara neden olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımına agrega özellikleri, bitüm özellikleri, çevresel etkenler, trafik, drenaj ve yapım aşamasındaki özen gibi birçok parametre etki etmektedir.

Superpave yönteminde bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla AASHTO T 283 [142] standardında yer alan prosedür uygulanmaktadır. Bu deney bir performans deneyi olmamakla birlikte karışımın nem hasarına karşı dayanımını belirlemede ayrıca kullanılan katkının etkisini incelemeye kullanılmaktadır. Bu deney prosedüründe $\%7 \pm 0,5$ hava boşluğuna sahip olacak şekilde en az 6 adet numune yoğurmalı pres ile sıkıştırılmaktadır. Standart Superpave numune hazırlama yöntemine göre tek fark kısa dönem yaşlandırma sırasında numunelerin 16 saat süresince 60°C sıcaklıkta ardından 2 saat süresince karıştırma sıcaklığına sahip etüvde bekletilmesidir. Hazırlanan numuneler eşit hava boşluğuna sahip olacak şekilde iki gruba ayrılmakta, birinci grupta bulunan numuneler koşullandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Koşullandırma işlemi uygulanacak numuneler saf su içeren piknometre içerisine konularak 10-26 in.Hg (13-67 kPa) vakum uygulanmaktadır. Vakum işlemi numunelerdeki hava boşluklarının %70-80'i su ile doluncaya kadar devam etmektedir. Yaklaşık 5 dakikalık vakum işleminden sonra boşlukların su ile dolma oranı %70'ten az olması durumunda vakum işlemine devam edilmeli, %80'den fazla olması durumunda ise tahribat olması nedeniyle bu numuneler deneylerde kullanılmamalıdır [142]. Piknometre ve vakum aleti Şekil 5.30'da görülmektedir.



Şekil 5.30. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması

Numunelerin doygunluk derecesi aşağıdaki denklem ler yardımıyla belirlenmektedir.

$$J = B' - B \quad (5.11)$$

J: Absorbe su hacmi (cm^3)

B' : Vakum işleminden sonra numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı (gr)

B : Vakum işleminden önce numunenin kuru ağırlığı (gr)

$$S' = J / I * 100 \quad (5.12)$$

$$I = V_a * V / 100 \quad (5.13)$$

S' : Doygunluk derecesi (%)

I : Hava boşluğu hacmi (cm^3)

V_a : Hava boşluğu yüzdesi

V : Numune hacmi (cm^3)

Vakum işleminden sonra numuneler plastik film (streç film) ile kaplanmakta ve ağzı kapanabilen ve uygun hacimdeki plastik torbalara (buzdolabı poşeti gibi) konularak torbanın içine 10 ml su konularak torbanın ağzı kapatılmaktadır (Şekil 5.30). Standarda göre numunelerin öncelikle -18°C sıcaklıkta 16 saat ardından 60°C suda 24 saat bekletilmesi gerekmektedir. Bu sürenin ardından numuneler poşet ve plastik filmden çıkarılmaktadır. Hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış numuneler 25°C 'deki suda 2 saat bekletilmekte ve 50 ± 2 mm/dakika hızla çapsal düzlemde yükleme yapılarak kırılmaktadır (Şekil 5.31).



Şekil 5.31. Çekme dayanımı deney düzeneği

Deneyden elde edilen maksimum yük değerleri kullanılarak çekme dayanımı değerleri aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenmiştir. Denklemden TS çekme dayanımı (kPa), P_{mak} kırılmaya neden olan maksimum yük (kN), t ortalama numune yüksekliği (m), d numune çapını (m) ifade etmektedir. Çekme dayanımı oranı (TSR) ise koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerlerinin ($TS_{yaş}$) koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerlerine (TS_{kuru}) oranlanması ile belirlenmektedir. Superpave şartnamesine göre bu değer minimum %80 olması istenmektedir.

$$TS = \left(\frac{2P_{mak}}{\pi dt} \right) \quad (5.14)$$

$$TSR = \left(\frac{TS_{yaş}}{TS_{kuru}} \right) * 100 \quad (5.15)$$

5.5.5. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

BSK'ların rijitlik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direk basınç, indirekt çekme ve burulma deneyleri uygulanabilmektedir. Bütün deney metotları, viskoelastik bir malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığı kabulüne dayanmaktadır. Deney yöntemleri periyodik olarak uygulanan yükü ve bu esnada oluşan ani deformasyonları içermektedir. Rijitlik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Diametral (çap doğrultusunda yük uygulanan) deneyler, direk basınç deneylerine göre karışımdaki bağlayıcının etkisine karşı daha hassas olduğundan daha yaygın olarak kullanılmaktadır [143]. Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden biridir [138]. BS DD 213 [144] standardı ile

tanımlanmış hasarsız ve deformasyon kontrollü bir deney olan indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi UMATTA (Universal Material Testing Apparatus) deney aleti kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 5.32).



Şekil 5.32. UMATTA aleti ve ITSM deney düzeneği

Deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 20°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. 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. Daha sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler ayarlanmaktadır. Deneyde, önce numunelere ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay eksende hedef deformasyonu meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye ön yükleme ile belirlenen yükte uygulanan 5 darbe sonucu aşağıdaki bağıntı kullanılarak ITSM değerleri belirlenmektedir.

$$S_m = \frac{F(R+0,27)}{LH} \quad (5.16)$$

Burada S_m , indirekt çekme rijitlik modülü (MPa), F maksimum dikey yük (N), H 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm), L ortalama numune yüksekliği (mm), R ise poisson oranıdır (0,35).

Deney sonrasında numuneler 90° döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. İki değer arasında %10'dan fazla sapma olması durumunda numune bir kez daha 90° döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. Aralarında %10'dan az sapma olan iki değer ortalama alınarak numunenin ITSM değeri belirlenmektedir.

5.5.6. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

Karayollarında kullanılan bitümlü malzemeler, her bir taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler, malzemenin rijitliğinin azalmasına neden olan mikro hasarlara yol açmaktadır. Bu mikro hasarlar uzun dönemde yorulma çatlakları olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına neden olmaktadır [145]. Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en fazla görülen ve yükten kaynaklanan bozulma türüdür. Yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artmaktadır [143]. Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma belirli bir oranda kaplamanın yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

Laboratuvar ortamında bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımlarını tespit edebilmek amacıyla geliştirilmiş birçok deney bulunmaktadır. Bu deneyler, gerilme ve deformasyon kontrollü olarak yapılabilir. Deney türüne göre yükleme şekli, numune geometrisi ve numunede oluşan gerilme artışı farklılık gösterdiğinden yapılan bu deneylerde yorulma ömürleri farklılık gösterebilmektedir. Yorulma ömrü üzerine yapılan çalışmalar sonucunda deformasyon kontrollü deneylerden elde edilen yorulma ömürlerinin gerilme kontrollü deneylere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca laboratuvar ortamında belirlenen yorulma ömrünün arazide tespit edilen yorulma ömründen çok daha kısa olduğu gözlenmiştir. Bu durum, yorulma ömrünün gerilme dağılımının ve kaplamanın sınır şartlarının bir fonksiyonu olmasından kaynaklanmaktadır [146]. Buna rağmen yorulma deneyleri, farklı karışımların yorulma performanslarını karşılaştırmak için imkan sağlamaktadır.

İndirekt çekme yorulma deneyinde (İÇYD), numune kırılıncaya kadar etki eden yük tekerrür sayısı olarak tanımlanan yorulma ömrü belirlenmektedir. Her bir numune türü değişik gerilme seviyelerinde yorulma deneyine tabi tutularak farklı gerilme seviyelerindeki kırılmaya neden olan yük tekerrür sayıları belirlenmektedir (N_f). Böylece N_f ile gerilme (σ) arasındaki klasik yorulma ilişkisi logaritmik ölçekte çizilen grafikten veya aşağıdaki Wöhler denkleminde yararlanılarak belirlenmektedir.

$$N_f = k_1 * \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (5.17)$$

Burada; N_f , yorulma ömrünü ifade eden yük tekrür sayısını, k_1 ve k_2 malzeme karakteristiklerini, σ uygulanan gerilmeyi (kPa) ifade etmektedir [147]. Yorulma denklemlerinden elde edilen k_1 ve k_2 katsayıları, karışımların yorulma karakteristikleri üzerinde katkı maddelerinin etkilerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Üssel katsayı olan k_2 'nin büyük olması yorulma çizgisi eğiminin daha yatık olduğunu göstermektedir. Karşılaştırılan iki karışımın k_1 değerlerinin aynı olması durumunda k_2 katsayısı yüksek olan karışımın yorulma ömrü daha uzun olmaktadır. Diğer taraftan k_2 değerlerinin eşit olması, karışımların yorulma ömrü eğrilerinin birbirine paralel olduğunu göstermekte olup daha düşük k_1 değerine sahip karışımın yorulma ömrü daha düşük olacaktır [148]. Asfalt karışımlarda diğer birçok malzemede olduğu gibi gerilme veya birim deformasyon azaldıkça yorulma ömrü düzenli olarak artmaktadır. Çekme deformasyonlarının azalması malzemenin tamamen elastik davranış göstermesine (çok düşük sıcaklıklarda veya çok hızlı yüklemelerde) dolayısıyla yorulma çatlaklarının oluşmamasına neden olmaktadır. Genellikle yorulma limitinin altındaki gerilmeler sadece elastik deformasyonlara neden olmaktadır. İndirekt çekme yorulma deneyinde, plastik şekil değiştirmeler yorulma deformasyonuna ve buna bağlı olarak yorulma çatlaklarına neden olmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımını belirlemek amacıyla yapılan deneyler eğilme deneyleri, direkt veya indirekt çekme deneyleri şeklinde uygulanabilmektedir. Bu deneylerde değişik geometrilere sahip numunelere sinüsoidal ve haversine gibi farklı kontrollü yükleme çeşitleri uygulanabilmektedir. EN 12697-24 standardında yer alan ve numune geometrisi, yükleme şekli ve test aparatına göre değişen yorulma deneyleri; trapez geometrilili numuneler üzerinde uygulanan iki nokta eğilme deneyi, prizmatik numuneler üzerinde uygulanan iki nokta eğilme deneyi, prizmatik numuneler üzerinde uygulanan üç nokta eğilme deneyi, prizmatik numuneler üzerinde uygulanan dört nokta eğilme deneyi ve silindirik numuneler üzerinde uygulanan indirek çekme deneyidir (EN 12697-24, 2018) [149]. Deneyler deformasyon kontrollü olarak uygulanabildiği gibi yük kontrollü olarak yapılabilir. Yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneyleri arasındaki farklar Tablo 5.12'de verilmiştir [145].

Tablo 5.12. Yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneylerinin karşılaştırılması [145]

	Yük kontrollü deney	Deformasyon kontrollü deney
Deney süresince değişme	Deplasmanın artması	Yükün azalması
Genel kırılma kriteri	Numunenin kırılması	Başlangıç rijitliğinin yarısının azalması
Sonuçlarının dağılımı	Düşük	Yüksek
Sıcaklığın artması ($> 0^{\circ}\text{C}$)	Yorulma ömrünün azalması	Yorulma ömrünün artması
Rijitlik modülünün artması	Yorulma ömrünün artması	Yorulma ömrünün azalması
Bekleme süresinin (resting time) etkisi	Fazla	Az
Çatlak gelişiminin süresi	Kısa	Uzun
Deney frekansının artması	Artma	Azalma
Hasarın gelişimi	Hızlı	Orta

İndirekt çekme yorulma deneyinin basit olması ayrıca geometrisi nedeniyle numunelerin laboratuvar ortamı yada araziden rahatlıkla temin edilebilmesi bu deney yöntemini en fazla tercih edilen deneylerden biri haline getirmiştir. İndirekt çekme yorulma deneyi, gerilme veya deformasyon kontrollü olarak tekrarlı yükleme altında bitümlü karışımların yorulma dayanımını karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Silindir şeklindeki deney numunelerine düşey çapsal düzlemde haversine biçiminde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik, yatay çapsal doğrultuda nispeten üniform çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan çekme gerilmeleri, numunenin düşey doğrultuda numunenin orta kısmında yarıma meydana gelmesine neden olmaktadır.

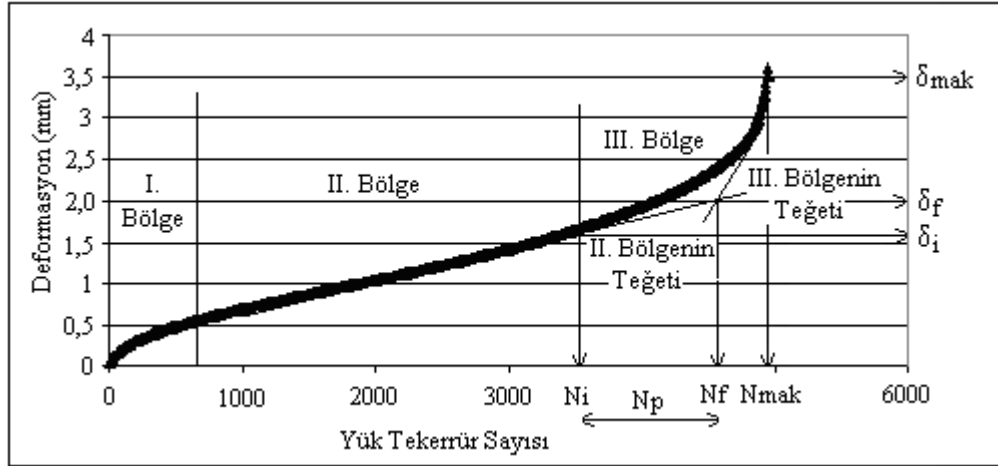
Gerilme kontrollü İndirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD), UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 5.33’de deney düzeneği görülmektedir. ITSM deneyinde olduğu gibi deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 25°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilir. Deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (LVDT) ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmektedir.



Şekil 5.33. Yorulma deney düzeneği

Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonucunda Şekil 5.34’de temsili olarak görüldüğü gibi yük tekerrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü,

bazı araştırmacılar tarafından deformasyon - yük tekerrür sayısı grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. kısım ve III. kısımlara çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır [150-151].



Şekil 5.34. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı ilişkisi

I. bölgede numunedeki boşluklardan dolayı önce aşırı deformasyon değişimi meydana gelmekte ardından aksel deformasyon oranı azalmaktadır. II. bölgede sabit oranda deformasyon söz konusu olup yaklaşık olarak lineer değişim meydana gelmektedir. III. Bölgede çatlak oluşumu başlamıştır. Bu bölgede deformasyon değişimi artmaktadır [146]. Çatlak ilerleme oranı (r_p), çatlak oluşuktan itibaren yorulma ömrünün sonuna kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranı ile ilgili denklem aşağıda verilmiştir [150].

$$r_p = \frac{N_p}{\delta_f - \delta_i} \quad (5.18)$$

Burada;

r_p : Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı/mm)

N_p : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı

δ_f : Bozulma anında toplam deformasyon (mm)

δ_i : Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu (mm) ifade etmektedir.

Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir.

5.5.7. Dinamik Sünme Deneyi

Tekerlek izi oluşumu, tekrarlı trafik yükleri altında üstyapıdaki tabakaların her birinde kalıcı deformasyonun kademeli olarak artması olarak tanımlanmaktadır [152]. Kalıcı deformasyon açısından en önemli tabaka ise trafik yüklerine direk maruz kalan kaplama tabakasıdır [153]. Kalıcı deformasyonlar, kaplamanın servis ömrünün farklı dönemlerinde oluşabilmektedir. Temel olarak kalıcı deformasyon için iki farklı oluşum mekanizması söz konusudur. Birincisi kaplama servis ömrünün ilk yıllarında meydana gelen kalıcı deformasyondur. Bu tür bozulmalar genellikle kaplamanın yapımı esnasında yeterli sıkışmanın sağlanamaması sonucu oluşan konsolidasyondan kaynaklanmaktadır. Diğer tür kalıcı deformasyonlar ise ikincil veya kayma kalıcı deformasyonu olarak adlandırılmaktadır. Arazide görülen kalıcı deformasyonların genellikle ikincil olduğu belirlenmiştir. Birinci tür bozulmalarda deforme olan kısım kaplamanın ilk kotundan daha düşük bir kota inerken ikinci tür bozulmalarda deforme olmuş yüzey tekerleğin geçmiş olduğu alanın yan tarafından yükselmektedir [154].

Bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımını belirlemek amacıyla en sık kullanılan deneylerden biri dinamik sünme deneyidir. Bu deney 1970'lerin ortalarından beri kaplama malzemelerinin kalıcı deformasyona karşı dayanımlarını karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu deneyin diğer deneylere göre başlıca tercih edilme nedenleri kolay olması ve kalıcı deformasyon oluşumu ile tutarlı bir ilişkiye sahip olmasıdır [154]. Bu deneyde sabit bir değerdeki yük, laboratuarda üretilen yada araziden alınan silindirik numunenin yüzeyine belirli periyot ile tekrarlı olarak uygulanmaktadır (Şekil 5.35). Numunenin yüzeyine konulan metal plak üzerine dik olarak yerleştirilen LVDT'ler yardımıyla her bir yük tekrarı sonucu oluşan plastik ve elastik deformasyonlar belirlenebilmektedir. Deney, farklı sıcaklık ve yüklemelerde yapılabilmektedir. Aşağıdaki denklemler yardımıyla sünme ve esneklik modülleri belirlenebilmektedir.

$$\varepsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (5.19)$$

$$\varepsilon_r = (L2_n - L3_n) / (G - (L3_n - L1)) \quad (5.20)$$

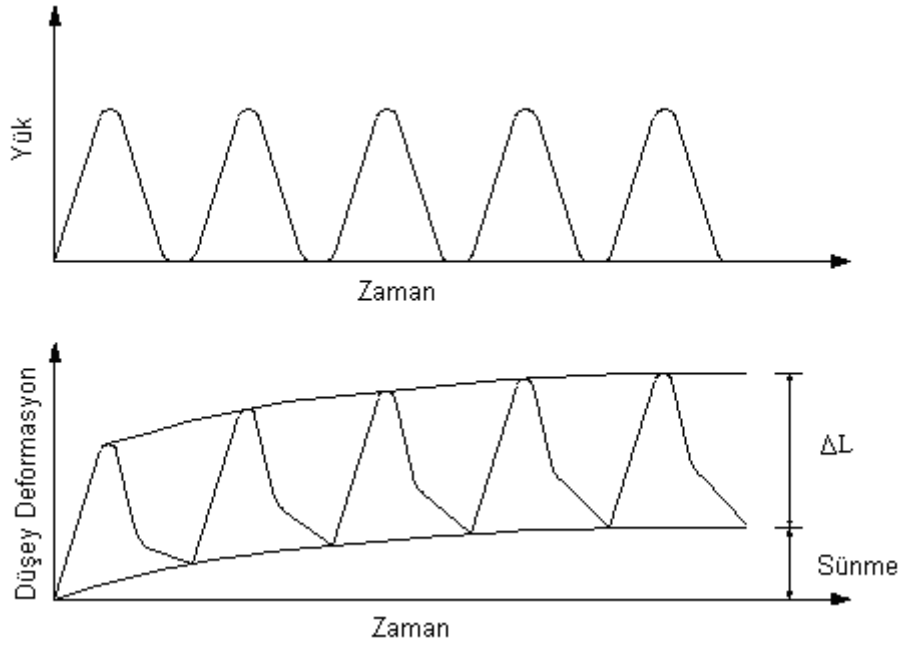
$$\sigma = F / A \quad (5.21)$$

$$E_c = \sigma / \varepsilon_c \quad (5.22)$$

$$E_r = \sigma / \varepsilon_r \quad (5.23)$$

Burada; ε_c , toplam plastik (kalıcı) eksenel birim şekil değiştirme, ε_r , toplam elastik eksenel birim şekil değiştirme, E_c , sünme modülü (sertliği), E_r , esneklik (rezilyans) modülü (sertliği), G , numunenin başlangıç yüksekliği (mm), $L1$, LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı (mm), $L2_n$,

n darbe sayısındaki maksimum deplasman (mm) (elastik + plastik), $L3n$, (n+1). darbe uygulanmadan önceki deplasman (mm) (plastik), σ , maksimum düşey gerilme (kPa), F, maksimum düşey yük (N), A, numunenin kesit alanıdır (cm^2). Denklem 5.22 ve 5.23'te görüldüğü üzere plastik ve elastik birim şekil değiştirme ile sünme ve esneklik modülü değerleri ters orantılıdır. Plastik birim şekil değiştirmenin yüksek olması durumunda sünme modülü düşük, elastik birim şekil değiştirmenin yüksek olması durumunda da esneklik modülü düşük olacaktır. Dolayısıyla yüksek sünme modülü değerleri bitümlü sıcak karışım numunesinin kalıcı deformasyona karşı dayanımının yüksek olacağını göstermektedir. Yüksek esneklik modülü değerleri ise bitümlü sıcak karışımın daha az elastik davranış sergileyeceğini göstermektedir.



Şekil 5.35. Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi

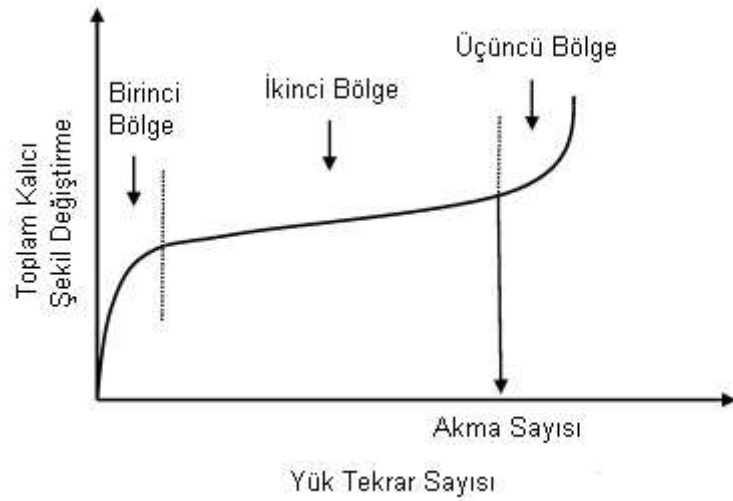
Dinamik sünme deneyi, UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır Şekil 5.36'da deney düzeneği görülmektedir. ITSM ve indirekt çekme yorulma deneylerinde olduğu gibi deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 40°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesinde sıcaklığın numune bünyesine tam olarak nüfus etmesini sağlamak için numuneler en az 4 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme, ön yükleme süresi, ön yükleme gerilmesi, yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmakta ve deneye

başlanmaktadır. Deneyde öncelikle girilen süre ve gerilme değerinde ön yükleme uygulanarak birincil oturmanın oluşması amaçlanmaktadır. Ön yükleme süresinin sonunda normal gerilme seviyesinde tekrarlı yük uygulanarak numuneler kırılıncaya kadar deney devam etmektedir.



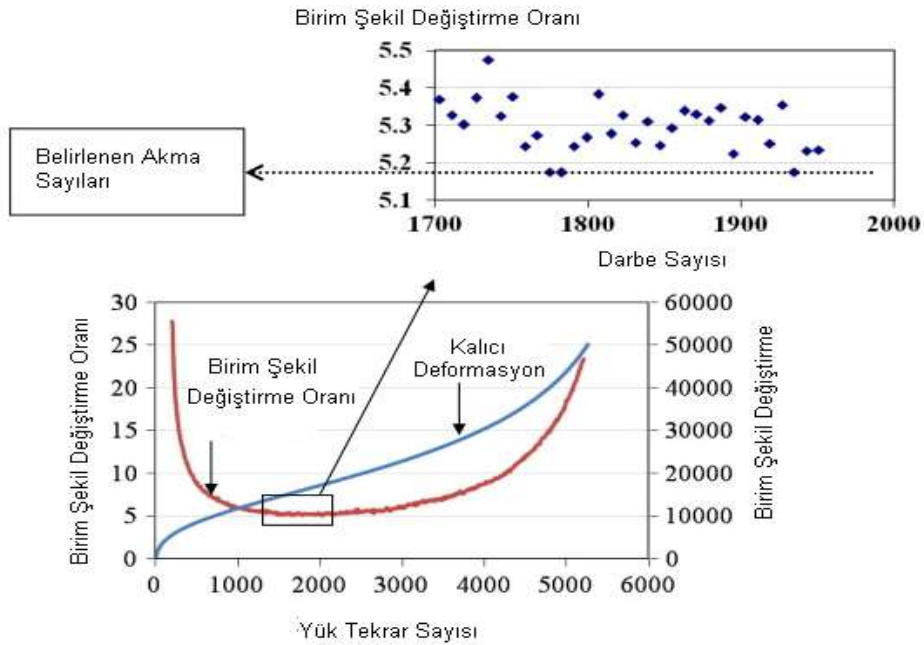
Şekil 5.36. Dinamik sünme deney düzeneği

Numunede bozulma meydana gelinceye kadar devam eden deney sonucunda Şekil 5.37’de görüldüğü gibi yük tekrar sayısına bağlı olarak deformasyonlar meydana gelmektedir. Şekil 5.37’de görüldüğü üzere eğri üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölgede, numunenin sahip olduğu boşluklardan dolayı konsolidasyon meydana gelerek bu bölgede karışımın hacmi azalmakta ve şekil değiştirme başlangıçta önemli oranda artmakta daha sonra azalmaktadır. İkinci bölgede uygulanan tekrarlı yük sonucu toplam şekil değiştirmede lineere yakın bir değişim gözlenmektedir. Üçüncü bölge ise ikinci tür kalıcı deformasyonun olduğu bölge olup bu bölgede kayma deformasyonları oluşmakta ve şekil değiştirme miktarı tekrar yükselişe geçmektedir. Yorulma deneyinde de görüldüğü üzere üç aşamalı kalıcı deformasyon davranışı bitümlü karışımların temel özelliğidir. Witczak’ın teorisine göre üçüncü bölgenin başladığı yük tekrar sayısı “akma sayısı” olarak isimlendirilmektedir. Yapılan çeşitli çalışmalar sonucunda kalıcı birim şekil değiştirme ve akma sayısı ile tekerlek izi oluşumu arasında bir bağlantı olduğu, akma sayısının kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımın bir göstergesi olduğu belirlenmiştir [155].



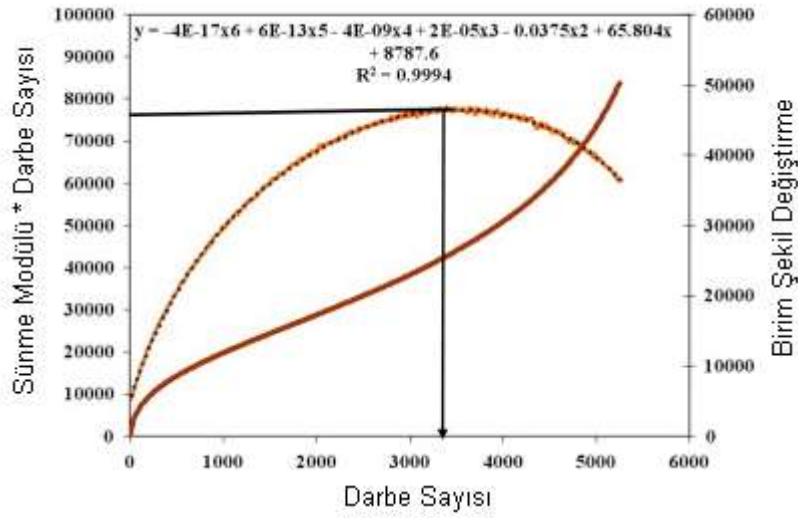
Şekil 5.37. Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi

Akma sayısı değeri, Şekil 5.37’de görülen plastik deformasyon – yük tekrar sayısı eğrisinde eğimin minimum olduğu nokta olarak alınmaktadır. Fakat bu yöntemde birçok minimum eğim değerini veren noktanın olması durumunda Şekil 5.38’de görüldüğü üzere akma sayısı değerini bulmak zorlaşmaktadır [156].



Şekil 5.38. Akma sayısının bulunmasında karşılaşılan zorluklar [156]

Akma sayısını bulmak için diğer bir yöntem Bausano ve Williams tarafından geliştirilmiştir [157]. Bu yöntemde yatay ekseninde darbe sayısı diğey ekseninde ise sünme modülü ile darbe sayısının çarpımı olacak şekilde grafik çizilmekte ve grafiğin pik noktası akma sayısı olarak bulunmaktadır (Şekil 5.39). Bausano ve Williams (2007), bu yöntemle bulunan akma sayısı değelerinin daha tekrarlanabilir olduğunu, eğim yardımıyla bulma yöntemine göre değışme oranının daha düşük olduğunu belirlemişlerdir [157].



Şekil 5.39. Akma sayısının bulunması [157]

5.5.8. Kırılma Mekanîği Yaklaşımlarıyla BSK'ların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi

Karayollarında oluşan çatlaklar nedeniyle kırılma mekanîği prensiplerinin bitümlü sıcak karışımlara uygulanması üzerine son dönemde birçok çalışma yapılmaktadır. Kırılma, malzemelerin gerilme altında birden fazla parçaya ayrılmasıdır. Kırılmanın türü malzemeden malzemeye değışir ve genellikle tatbik edilen gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma başlıca iki safhadan oluşur. Birinci safha “çatlak teşekkülü”, ikinci safha ise “çatlağın ilerlemesi”dir [158]. Makroskobik açıdan kırılma tipleri gevrek, sünek ve sürüntü kırılmasıdır. Gevrek kırılmalarda hiçbir plastik deformasyon meydana gelmeden kırılma oluşmaktadır. Sünek malzemelerde ise kırılmadan önce önemli oranda plastik deformasyon meydana geldikten sonra malzeme kırılmaktadır. Sürüntü kırılmasında ise yüksek sıcaklıklarda sabit gerilme veya sabit yük altında malzemelerin sürünme deformasyonu sonucunda kırılma meydana gelmektedir. Makroskopik açıdan bakıldığında, sürüntü kırılması malzemede plastik deformasyon sonucunda oluşur, bu sebeple sünek kırılmaya benzer. Mikroskopik açıdan ise; sürüntü kırılması, sünek kırılmadan farklıdır [158]. Taneleri kesip kesmemeye göre ise

intergranüler (taneler arası) kırılma ve transgranüler (taneleri keserek) kırılma olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

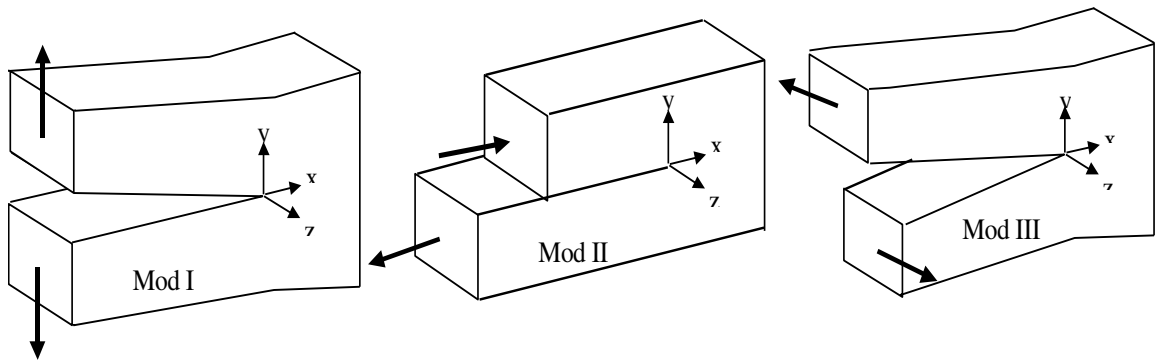
Kırılma mekaniği ise malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yığılmasını arttıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceleyen bir bilim dalıdır [159]. Kırılma mekaniğinin temelleri, 1920’li yıllarda malzemelerde oluşan çatlakların ilerleyişini açıklamak amacıyla Griffith tarafından atılmıştır. Griffith enerji dengesine dayalı olarak kırılan malzemeler için kırılma mekaniğini formüle etmiştir. Griffith, potansiyel enerjinin cismin yüzey enerjisinden büyük olması durumunda çatlak boyutunun artacağını ifade etmiştir. 1957’de Irwin kırılma mekaniğinde yeni bir dönem başlatmıştır. Griffith’in teorisi cam gibi tam gevrek malzemelerde çatlağın yayılması için gerekli gerilmeyi belirlemesine rağmen çatlağın yayılmadan önce veya sonrası için herhangi bir bilgi vermemektedir. Irwin, teoriyi plastik şekil değiştirme gösteren malzemeleri de içine alacak şekilde geliştirmiş, daha sonra sırasıyla çekme, kesme ve burulma durumlarına karşılık gelen üç yükleme durumu Mod I, Mod II ve Mod III genel kırılma modlarını (Şekil 5.40) ve K adı verilen gerilme şiddet çarpanını ortaya koymuştur [160].

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (5.24)$$

$$K_{II} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (5.25)$$

$$K_{III} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (5.26)$$

Denklemlerde σ , malzemeye uygulanan çekme gerilmesini, τ , kayma gerilmesini ve a yarı çatlak uzunluğunu ifade etmektedir.



Şekil 5.40. Kırılma modları

Gerilme şiddet çarpanı (K), geometriye ve yükleme durumuna bağlı bir sabittir. Yani her malzeme aynı geometriye ve yükleme durumuna maruz kalırsa bu değer sabit olacaktır.

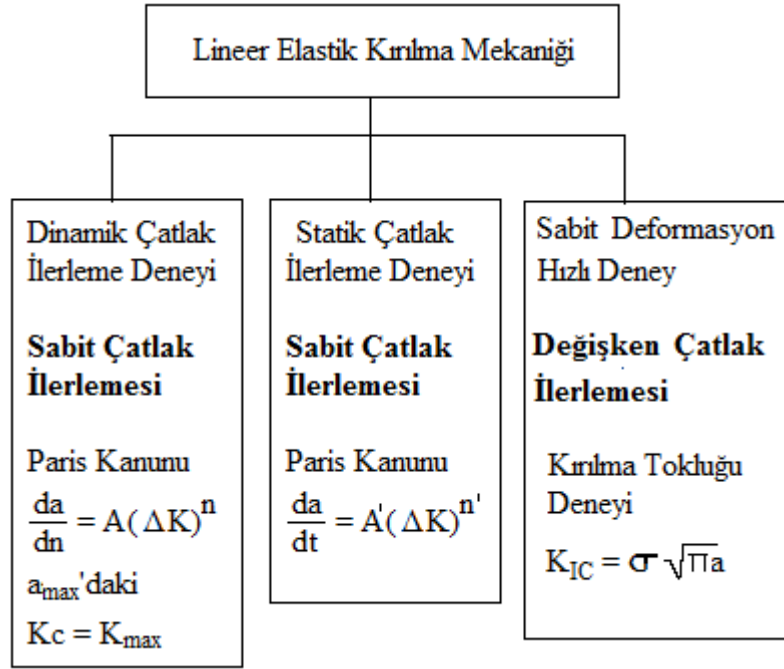
Dolayısıyla gerilme şiddet çarpanı bir malzeme sabiti değildir. K , belirli bir kritik değer olan K_c değerine ulaştığında kırılma tokluğu veya kritik gerilme şiddet çarpanı adını almakta ve bu değer her malzeme için farklı bir değer olmaktadır.

Şekil 5.40'da görülen Mod I kırılma, çatlak düzlemi boyunca uygulanan yükler sonucu oluşmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda trafik yükleri ve termal gerilmeler sonucunda bu tür kırılmalar meydana gelmektedir. Mod II kırılma aynı zamanda düşey yönde kesmeye dayanım modu olarak isimlendirilmekte olup gerilmenin kayma bileşeni, çatlakla x eksenine doğrultusunda etki etmektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda trafik yüklerinden ötürü bu tip kırılmalar oluşabilmektedir. Mod III kırılmada burulma etkisi söz konusu olup gerilmenin kayma bileşeni, çatlakla z eksenine doğrultusunda, çatlakın dip kenarına paralel olarak etki etmektedir. Bu tip kırılma bitümlü sıcak karışımlarda ihmal edilebilmektedir [161]. Mod I durumu için kritik gerilme şiddet çarpanı aşağıdaki denklemle belirlenebilmektedir.

$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (5.27)$$

Burada K_{IC} , kritik gerilme şiddet çarpanını σ , malzemeye uygulanan çekme gerilmesini a , yarı çatlak uzunluğunu ve $f\left(\frac{a}{w}\right)$ numune boyutları ile ilgili geometrik faktörü ifade etmektedir.

Irwin'in ortaya koyduğu çalışmalar lineer elastik kırılma mekaniğinin temelini oluşturmuştur. Bitümlü sıcak karışımlarda lineer elastik kırılma mekaniği çeşitli deney yöntemleriyle uygulanabilmektedir. Dinamik çatlak ilerleme deneyi, statik çatlak ilerleme deneyi ve sabit deformasyon hızlı deney ile bitümlü sıcak karışımlarda lineer elastik kırılma mekaniği uygulanabilmektedir (Şekil 5.41) [162].



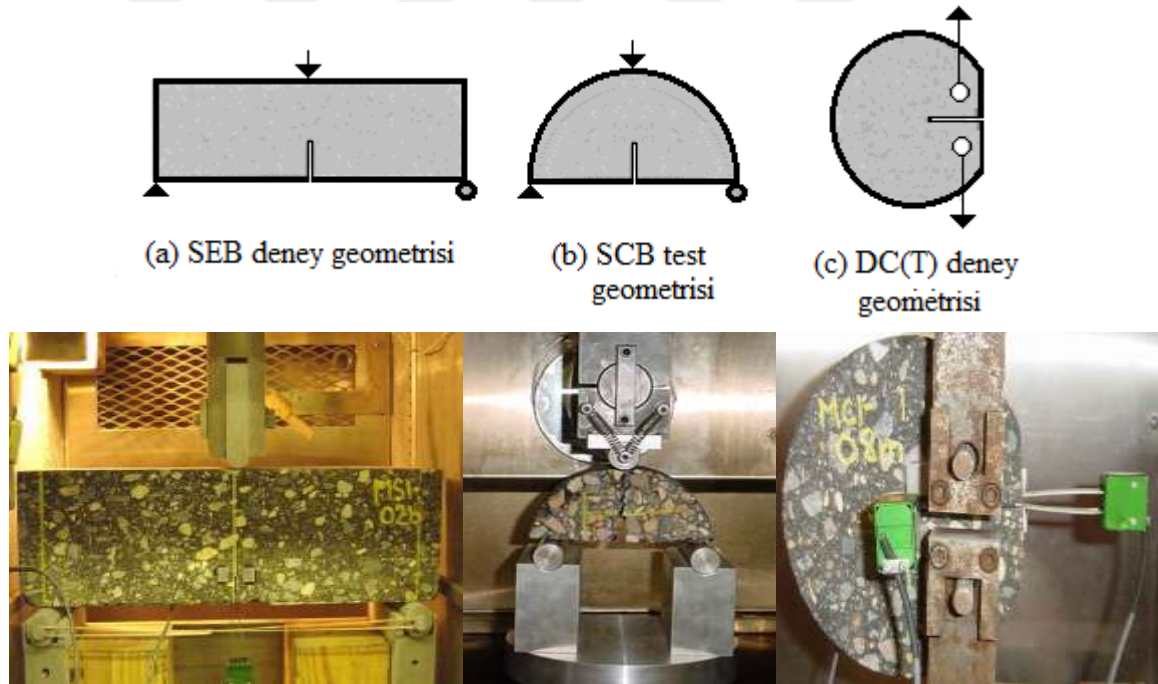
Şekil 5.41. BSK' lara uygulanan lineer elastik kırılma mekanığı deneyleri [162]

Dinamik çatlak ilerlemesi deneyinde önceden çentik açılmış numuneye periyodik olarak yük uygulanmaktadır. Sabit deformasyon hızlı deneyde adından da anlaşılacağı gibi sabit deformasyon hızında numuneye yük etki ettirilmektedir. Kırılma tokluğu deneyi ve çekme dayanımı deneyleri olmak üzere iki farklı sabit deformasyon hızlı deney bulunmaktadır. Kırılma tokluğunu belirlemek için uygulanan deneylerde numunelere çentik açılmakta, çekme deneylerinde ise numuneler çentik açılmadan doğrudan deneye tabi tutulmaktadır. Özel bir deney olan statik çatlak ilerleme deneyinde önceden oluşturulmuş çatlığa sahip olan numuneye sabit çatlak ilerlemesi sağlayacak şekilde yük uygulanmaktadır. Şekil 5.41'de görüldüğü üzere dinamik çatlak ilerleme deneyinde çatlak ilerlemesi karakterize edilirken sabit deformasyon hızlı deney ile kırılmaya karşı dayanım belirlenebilmektedir. Çatlak ilerlemesi deneyinde çatlaktaki ilerleme sabittir. Kırılma tokluğu deneyinde çatlaktaki açılma düzenli değildir. Dinamik çatlak ilerleme davranışı, Paris kanunu ile karakterize edilebilmektedir. Dinamik çatlak ilerleme deneyinde A ve n sabitler olup kritik gerilme şiddet çarpanı deney sırasındaki gerilme ve çatlak ilerleyişinden elde edilmektedir. Çatlak ilerleme deneyleri zor ve pahalı ekipmanlar gerektirdiğinden asfalt karışım dizaynı gibi rutin uygulamalar için uygun değildir. Paris kanununa uygun çatlak ilerleme deneyleri yerine kırılma tokluğu yönteminin kullanılması daha kolay ve etkin bir yöntemdir.

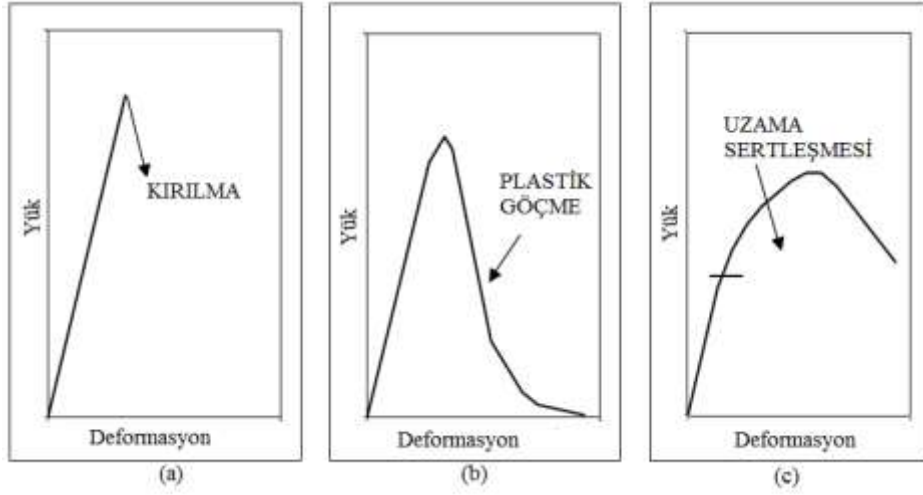
Sabit deformasyon hızlı deneyde farklı numune geometrileri kullanılabilir. Şekil 5.42'de en sık kullanılan numune geometrileri gösterilmiştir. Kiriş numuneler hazırlanması zor olması ve kiriş boyutları için herhangi bir standart bulunmaması gibi dezavantajlara sahiptir [163]. Disk şeklinde çekme deneyinde de numunenin kesilmesinde ve delik açılmasında zorluk

yaşanmaktadır. Yarım daire eğilme deneyinde numuneler hem arazide hem de laboratuarda kolayca elde edilebilmektedir. Ayrıca hazırlanma sırasında numunede meydana gelen homojenliğin azalması ihtimali numunenin ortadan ikiye bölünmesi ile azalmaktadır [164]. Numunedeki çentiğin açısına bağlı olarak Mod I ve Mod I ile Mod II türü kırılmanın birlikte olduğu durumlar için kritik gerilme şiddet çarpanı değerleri belirlenebilmektedir [165].

Bitümlü sıcak karışımlar sıcaklık ve yükleme hızına bağlı olarak elastik ve viskoz davranış gösterebilmektedirler. Normal şartlarda ise bitüm viskoelastik davranış göstermektedir. Yarım daire numunelerde sıcaklıkla yük-deformasyon eğrisinin değişimi Şekil 5.43’de verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu başlıca üç yük-deformasyon diyagram şekli olduğu belirlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda (1°C veya daha düşük) asfalt karışımlar tamamen elastığe yakın davranış sergilerler. Bu nedenle uygun yükleme hızlarında 1°C veya daha düşük sıcaklıklarda lineer elastik kırılma mekaniği bitümlü sıcak karışımlara uygulanabilmektedir.



Şekil 5.42. Kırılma deneylerinde en çok kullanılan deney geometrileri (a) Tek çentikli giriş eğilme deneyi (b) Yarım daire eğilme deneyi (c) Disk şeklinde numune çekme deneyi [163].



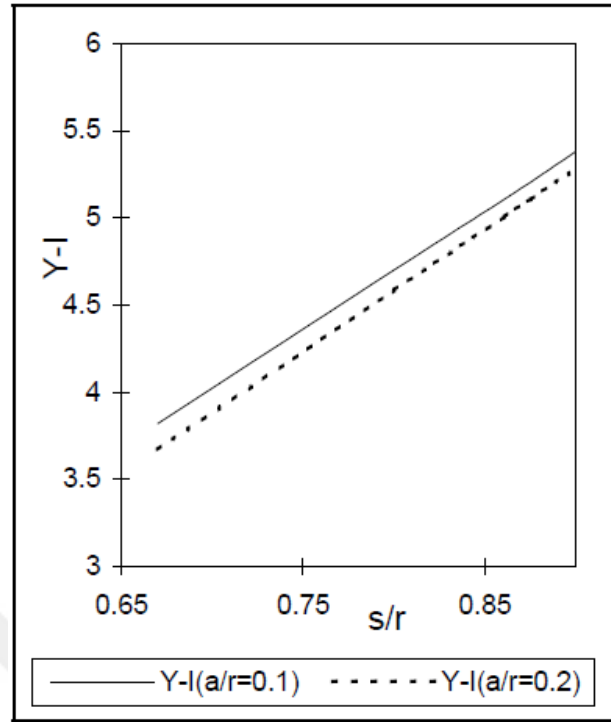
Şekil 5.43. SCB deneyinde asfalt karışımların elde edilen başlıca yük-deformasyon diyagram türleri (a) 10°C veya 1°C sıcaklıktaki elastik kırılma (b) 15°C sıcaklıktaki plastik göçme (uzama sertleşmesi yok) (c) 25°C veya daha yüksek sıcaklıkta oluşan uzama sertleşmesi [162].

Lim ve diğ. tarafından yarım daire numune şekline sahip bitümlü sıcak karışımlar üzerinde lineer elastik kırılma mekanizmasını (LEKM) uygulanmıştır [166]. Yapılan çalışma sonucunda Mod I kırılma için kritik gerilme şiddet çarpanının ($\text{N/mm}^{3/2}$) aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenebileceğini belirtmişlerdir.

$$K_{IC} = \sigma_0 \sqrt{\pi a} Y_I \quad (5.28)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{BD} \quad (5.29)$$

Burada P_0 , uygulanan maksimum yükü (N) B, numune yüksekliğini (mm) D, numune çapını (mm) ifade etmektedir. Y_I değeri Lim ve diğ. tarafından belirlenerek grafik halinde verilmiştir (Şekil 5.44). Şekilde 2S mesnetler arası yatay açıklığı, $2r$ numune çapını (mm), a çentik boyunu (mm) ifade etmektedir.



Şekil 5.44. YI değerinin belirlenmesi [166].

Hoffman ve ekibi, yapmış oldukları çalışmada deney sıcaklığı olarak $0 \pm 1^\circ\text{C}$ 'yi ve 5,1 mm/dak yükleme hızını kullanarak bitümlü sıcak karışımlar üzerinde yarım daire eğilme deneyini uygulamışlardır [167]. Aşağıdaki denklem yardımıyla kritik gerilme şiddet çarpanı (K_{IC}) değerlerini belirlemişlerdir.

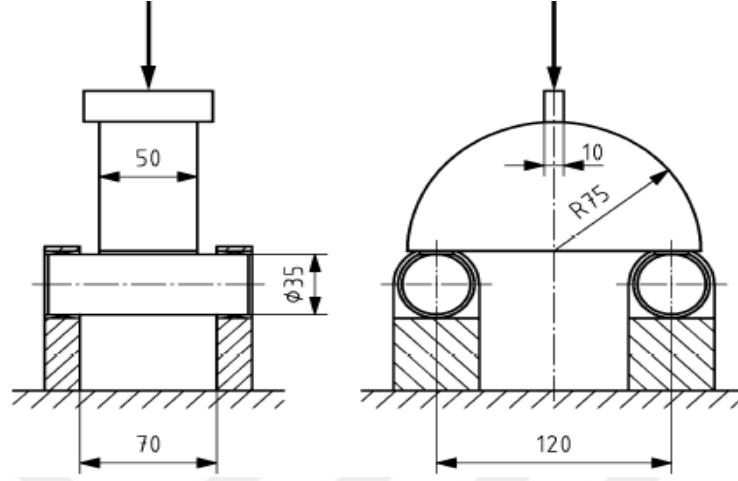
$$\sigma_{mak} = \frac{4,263 * F_{mak}}{D * t} \quad (5.30)$$

$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (5.31)$$

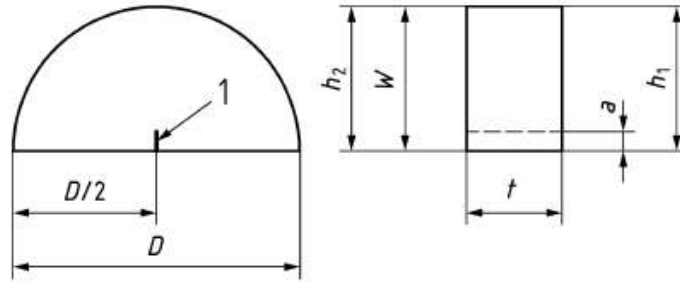
$$f\left(\frac{a}{w}\right) = -0,623 + 29,29 * \left(\frac{a}{w}\right) - 171,2 * \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 457,1 * \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 561,2 * \left(\frac{a}{w}\right)^4 + 265,54 * \left(\frac{a}{w}\right)^5 \quad (5.32)$$

Bitümlü sıcak karışımların Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği'ne göre değerlendirilmesiyle ilgili Bakker tarafından Hollanda'da yapılan çalışmalarda farklı bitümler içeren araziden alınan ve laboratuarda hazırlanan numuneler üzerinde yarım daire eğilme deneyleri uygulanmış ve bu deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak EN 12697-44 standardı hazırlanmıştır [168]. Deneyde yarım silindirik şeklindeki deney numunesinin alt yüzeyinin ortasına çentik açılmakta ve üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmaktadır. Deney süresince deformasyon 5 mm/dak sabit hızla artmaktadır. Standarda göre maksimum yük, malzemenin çatlak ilerleyişine karşı

dayanımıyla doğrudan ilişkilidir (EN 12697-44, 2019). Deney aparatları ve numune şekli ile ilgili örnek bir resim aşağıda verilmiştir (Şekil 5.45-5.46).



Şekil 5.45. Yarım daire eğilme deney düzeneği



Şekil 5.46. Numuneye çentik açılması

Bitümlü sıcak karışımlar düşük sıcaklıklarda elastik davranış göstermesine rağmen yüksek sıcaklıklarda viskoz davranış, normal şartlarda ise viskoelastik davranış sergilediklerinden bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen çatlak ve kırılmaları normal ve yüksek sıcaklıklarda lineer elastik kırılma mekaniği ile değerlendirmek uygun değildir.

Kırılma mekaniği yaklaşımlarına göre numunedeki çatlak ucunda, yükleme durumunda plastik deformasyona uğramış bir bölge bulunur. Plastik deformasyona uğramış bu bölge kırılma tokluğu deneyi sonuçlarını önemli ölçüde etkiler, çünkü kırılma tokluğu deneyi malzemenin çatlama direncinin bir ölçümüdür, plastik deformasyona uğramış malzemenin çatlama direncinin ölçümü değildir. Bu sebeple numunedeki plastik deformasyon bölgesi büyüdükçe deneyin anlamı, dolayısıyla deney sonuçlarının geçerliliği azalır. LEKM ile incelenemeyecek kadar büyük ölçüde çatlak ucu plastik deformasyona sahip malzemelerde ise elastik-plastik kırılma mekaniği kullanılmaktadır [158]. Elastik-plastik kırılma mekaniğine uygun olarak çeşitli yöntemlerle malzemelerin davranışları incelenebilmektedir. Elastik-plastik kırılma mekaniği yöntemlerinden

biri olan kritik çatlak ucu açılımı (COD) kullanılarak sünek malzemeler için kırılma parametresi belirlenmektedir. Çatlak ucunda büyük plastik bölge oluşması durumunda (COD)'un yerinin tayini büyük zorluklar gösterdiğinden COD'a alternatif olarak Rice tarafından 1968 yılında J integral yöntemi geliştirilmiştir. Fiziksel açıdan J, yüklenmiş bir yapıda çatlak uzunluğu “a” dan “a+da” olurken meydana gelen potansiyel enerji farkı olarak tanımlanabilmektedir [169]. Diğer bir deyişle çatlak uzunluğunun “da” kadar artması için gerekli olan enerjidir [170]. Bu yöntem kritik enerji salıverme hızı (kritik J-integral değeri veya J_c) olarak adlandırılan kırılma mekaniği kavramına dayanmaktadır. J_c değerinin büyük olması malzemenin kırılmaya karşı dayanımının büyük olacağını göstermektedir [171]. Deney süresince çentik içeren numunelere sabit bir hızla yük uygulanmakta ve yük-deformasyon değerleri sürekli kaydedilerek J_c değeri aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenmektedir.

$$J_c = -\left(\frac{1}{b}\right) \frac{dU}{da} \quad (5.33)$$

Burada b, numune kalınlığını (mm) a, çentik yüksekliğini (mm) U, maksimum yük-deformasyon eğrisi altında kalan alandan elde edilen kırılmaya neden olan toplam şekil değiştirme enerjisini ifade etmektedir. Bir bitümlü sıcak karışımın yarım daire eğilme deneyiyle kritik enerji salıverme hızını (J_c) belirlemek amacıyla en az iki farklı yükseklikte çentik içeren numuneler üzerinde deney prosedürünün uygulanması gerekmektedir. İki farklı çentik yüksekliği kullanılması durumunda aşağıdaki denklem den faydalanarak J_c değeri hesaplanmaktadır. Daha fazla çentik yüksekliği kullanılması durumunda ise çentik yüksekliği – J grafiği çizilerek noktalardan faydalanarak doğru geçirilmekte ve bu doğruların türevi J_c değeri olarak belirlenmektedir.

$$J_c = \left(\frac{U_1}{b_1} - \frac{U_2}{b_2}\right) * \frac{1}{a_2 - a_1} \quad (5.34)$$

Bitümlü sıcak karışımların viskoelastik sınırlar içerisinde J integral yöntemi ile kırılma parametrelerinin bulunmasında en çok yarım daire numune geometrisi kullanılmaktadır. Önceden yapılmış olan çalışmalarda kiriş numunelerle yapılan üç nokta eğilme deneylerinde kiriş numunelerin kendi ağırlığından dolayı çökmelerin meydana geldiği belirtilmiştir [172]. Yarım daire eğilme deneylerinde ise arazi verileriyle yüksek bir uyum sağlandığı, deney numunesi hazırlama veya elde etmenin kolay olduğu, deney süresince veri toplamanın kolay olduğu belirtilmiştir [173]. Bu deney geometrisinin en büyük dezavantajları ise elastik-plastik kırılma mekaniğiyle J-integral yöntemi kullanılarak bitümlü sıcak karışımların dayanım özelliklerinin belirlenmesinde standart bir numune boyutu ve deney prosedürünün bulunmamasıdır. Bitümlü

sıcak karışımlarda J-integral yöntemi ile kırılmaya karşı dayanımların yarım daire numuneler ile belirlenmesiyle ilgili birçok çalışma yapılmış ve çeşitli deney hızları, numune kalınlıkları ve çentik boyları kullanılmıştır. Genellikle 150 mm çapında numuneler kullanılmasına rağmen bazı çalışmalarda 100 mm çapında numuneler kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada 25 °C deney sıcaklığı, 0,5 mm/dak yükleme hızı, 50 mm numune kalınlığı, 75 mm numune yüksekliği ve 1-2 ve 3 cm çentik yüksekliği değerleri kullanılmıştır. Çentik yüksekliğinin 1-2 ve 3 cm seçilmesinin nedeni çentik ilerlemesi için daha fazla mesafenin kalması düşüncesidir.



6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Modifiye Bitümlerin Hazırlanması

Çalışmada kullanılacak modifiye bitümler aşağıda belirtildiği şekilde hazırlanmıştır;

- B 160/220 sınıfı saf bitüm öncelikle sıcaklığı 135°C olan bir etüv içerisinde bir saati geçmeyecek şekilde eriyinceye kadar bekletilmiştir.
- Yaklaşık 1000 gr saf bitüm yüksek kesmeli (high shear) karıştırıcının haznesine aktarılmış ve belirlenen orana (% bitüm ağırlığınca) göre hesaplanmış biyoçar bitüme ilave edilmiştir.
- Karıştırıcı haznesi hot-plate'e yerleştirilmiş ve yüksek kesmeli (high shear) karıştırıcı için gerekli ayarlamalar yapılarak karıştırma işlemine başlanmıştır.
- Karıştırma sıcaklığı olarak 180°C seçilmiştir. Saf bitüm ve biyoçar 2000 rpm dönme hızında 1 saat süresince karıştırılmıştır. Karıştırma işleminde Şekil 6.1'de görülen yüksek kesmeli (high shear) karıştırıcı kullanılmıştır.
- Karıştırma işlemi bittikten sonra elde edilen modifiye bitüm cam behere aktarılmıştır. Karıştırmada kullanılan prosedür her seferinde aynı şekilde uygulanmış böylece karıştırma prosedürünün deney sonuçlarına etki etmesi engellenmiştir.



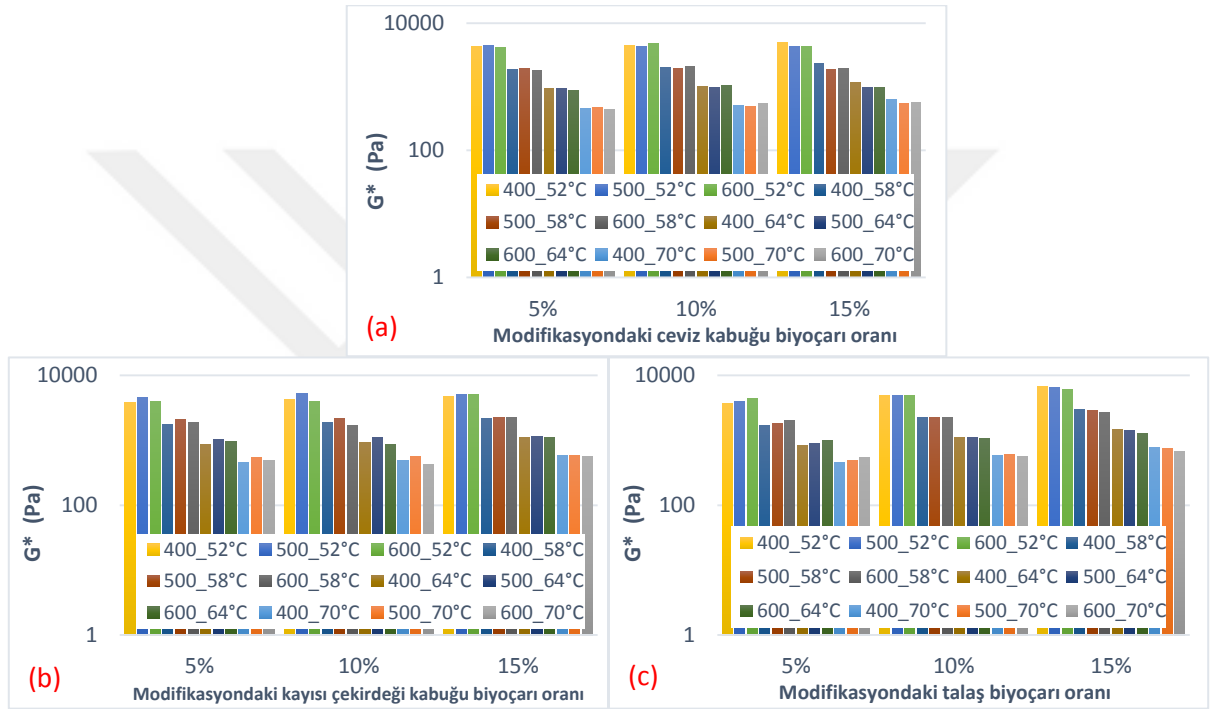
Şekil 6.1. Biyoçarın saf bitüme ilave edilmesi ve yüksek kesmeli (high shear) modifiye bitüm mikseri

6.2. Optimum Piroliz Sıcaklığının Belirlenmesi

Piroliz deney sıcaklığı, elde edilen ürünlerin (katı, sıvı ve gaz) miktar ve özelliklerini etkileyen parametrelerden biridir. Bu nedenle piroliz sonrası elde edilecek olan biyoçarların hangi sıcaklıkta karbonize edileceğine karar vermek gerekmektedir. Bu amaçla öncelikle çalışmada kullanılacak biyokütleler 3 farklı sıcaklıkta (400, 500 ve 600°C) piroliz işlemine tabi tutulmuştur. Ardından saf bitüm ve 3 farklı piroliz sıcaklığında üretilen biyoçarlar kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır.

Modifiye bitüm hazırlanmasında biyoçarlardan bitüm ağırlığınca 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) kullanılmıştır.

Bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerini değerlendirmede kullanılan en sağlıklı ve hassas deney dinamik kayma reometresi (DSR) deneyidir. Bu nedenle 3 farklı kaynaktan elde edilen biyokütlelerin 3 farklı sıcaklıkta piroliz edilmesi sonucu elde edilen biyoçarlardan 3 farklı oranda kullanılması sonucu elde edilen 27 farklı modifiye bitüm üzerinde dinamik kayma reometresi deneyi uygulanmıştır. DSR deneyleri sonucu elde edilen kompleks modül (G^*) değerlerinin değişimi Şekil 6.2’de görülmektedir.



Şekil 6.2. Farklı piroliz sıcaklıklarında elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin G^* değerleri

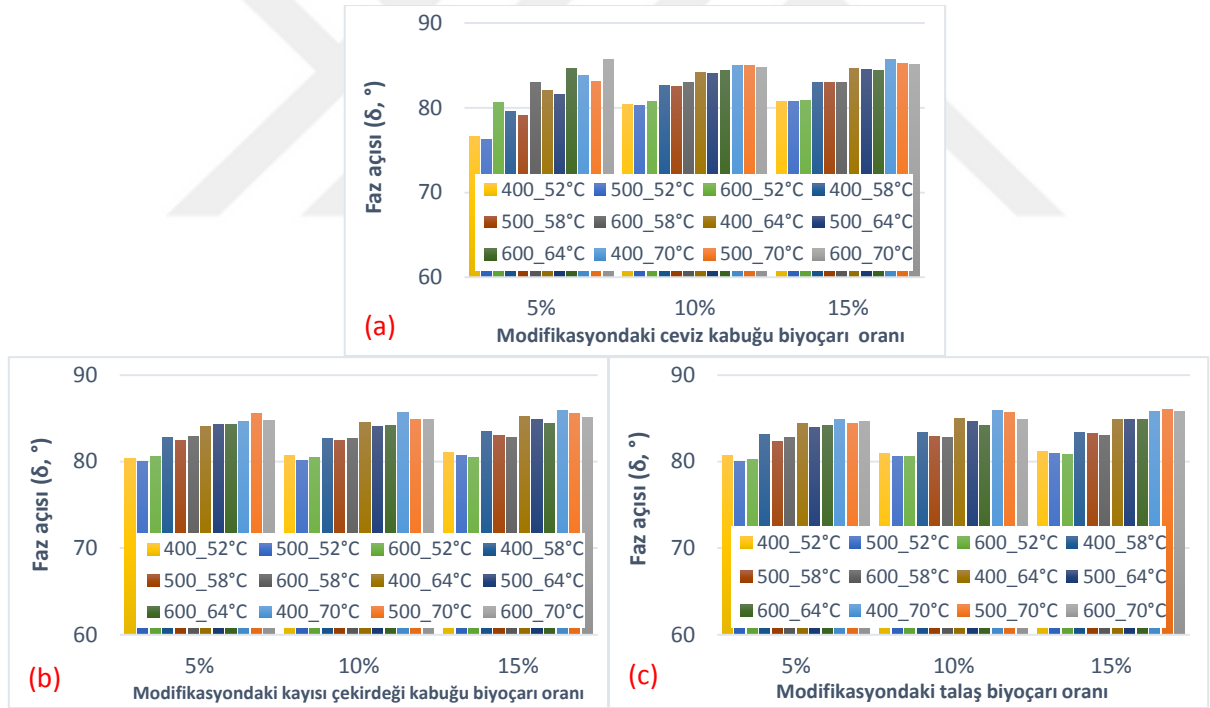
Şekil 6.2’de görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça G^* değerleri azalmıştır. Düşey eksen logaritmik verildiğinden ötürü net olarak görülmemesine rağmen katkı içeriği arttıkça G^* değerleri artmıştır. Çalışmada 3 farklı sıcaklıkta piroliz sonrası elde edilen biyoçar modifiyeli bitümlerin G^* değerlerinin aritmetik ortalaması alınmış ve standart sapmalar belirlenmiştir.

3 farklı sıcaklıkta piroliz sonrası elde edilen öğütülmüş ceviz kabuğu biyoçarından %5 oranında kullanılarak elde edilen modifiye bitümde, G^* değerlerinin aritmetik ortalamadan en fazla sapmanın 600°C sıcaklıkta piroliz ürünü kullanılan modifiye bağlayıcıda 58°C sıcaklıkta meydana geldiği görülmektedir (- %4,7 fark).

%10 öğütülmüş kayısı çekirdeği biyoçarı katkılı bağlayıcılarda, aritmetik ortalamadan sapma en fazla 600°C sıcaklıkta piroliz ürünü kullanılan modifiye bağlayıcıda 52°C sıcaklıkta meydana gelmiştir (+ %5,6 fark). %15 kayısı çekirdeği biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda ortalamadan

sapmanın en fazla 400°C sıcaklıkta piroliz ürünü kullanılan modifiye bağlayıcıda 58°C sıcaklıkta meydana gelmiştir (+ %12,4 fark). %5 ve %10 kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda, ortalamaya göre en fazla fark 500°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar ile hazırlanan modifiye bitümün 52°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana gelmiştir (+ %10,2 ve + %16,9 fark). %15 kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda, ortalamaya göre en fazla farkın 400°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiyeli bitümün 52°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana gelmiştir (- %3,1 fark).

%5 talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda, ortalamadan en fazla sapmanın 500°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitümün 52°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir (+ %9,0 fark). %10 talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda ortalamadan en fazla sapmanın 600°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitümün 64°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir (- %3,4 fark). %15 talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda en fazla fark 600°C’de elde edilen modifiye bitümden 70°C sıcaklıkta meydana gelmiştir (- %9,0 fark). Modifiye bitümlerin faz açısı (δ°) değerleri Şekil 6.3’de görülmektedir.



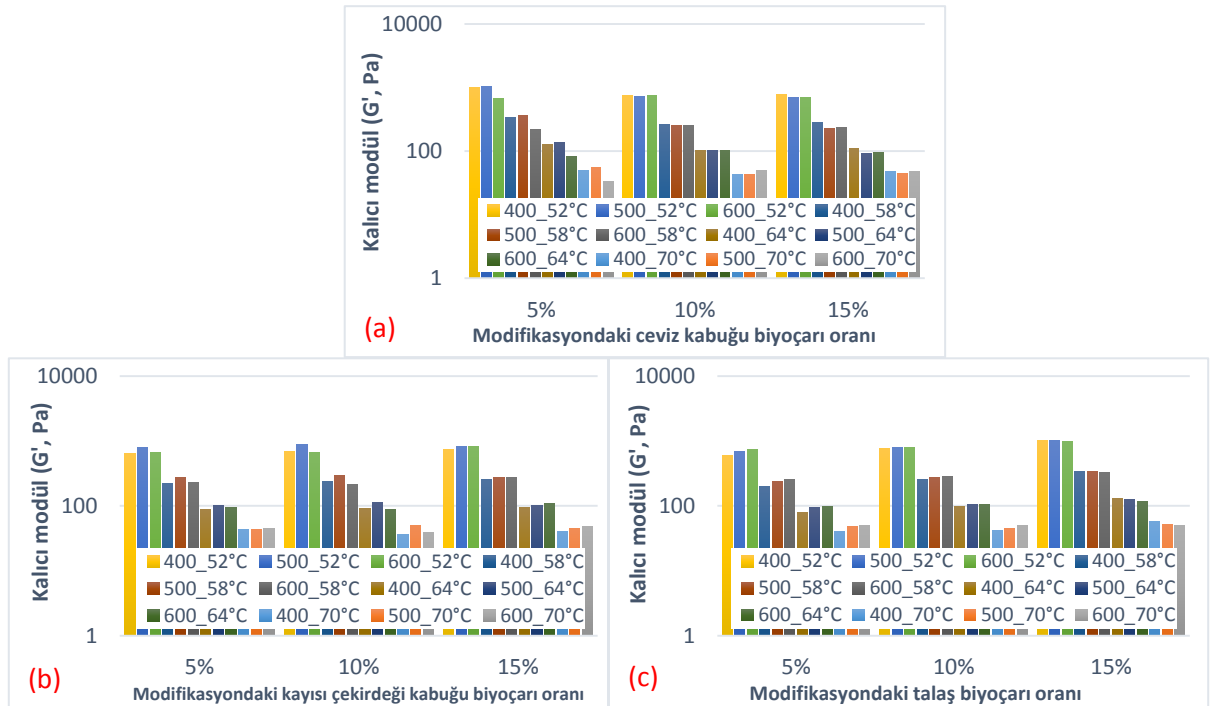
Şekil 6.3. Farklı piroliz sıcaklıklarında elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin faz açısı (δ°) değerleri

Şekil 6.3’de görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça bağlayıcıların elastikiyeti azalmış dolayısıyla δ° değerleri artmıştır. Ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümler dikkate alındığında %5 ve %10 kullanılması durumunda, δ° değerlerinde ortalamaya göre en fazla farkın 600°C sıcaklıkta elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bağlayıcılara 52°C sıcaklıkta uygulanan DSR deneylerinden elde edildiği belirlenmiştir (+%3,6 ve +%0,3 fark).

%15 oranında ceviz kabuğu biyoçarı kullanılması durumunda, ortalamadan en fazla sapmanın 400°C sıcaklıkta elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bağlayıcılara 70°C sıcaklıkta uygulanan DSR deneylerinden elde edildiği belirlenmiştir (+ %0,4 fark).

%5 kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların δ° değerlerinde ortalamaya göre en fazla fark 500°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitüm ile hazırlanan modifiye bitümün 70°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana gelirken (+ %0,6 fark), %10 kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların ortalamaya göre en fazla fark 400°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitüm ile hazırlanan modifiye bitümün 70°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana geldiği belirlenmiştir (+ %0,7 fark). %15 kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların ortalamaya göre en fazla farkın 600°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitüm ile hazırlanan modifiye bitümün 70°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana geldiği görülmüştür (- %0,7 fark).

%5 talaş biyoçarı modifiyeli bitümlerin faz açılarında ortalamadan en fazla sapmanın 400°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitümün 58°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir (+ %0,5 fark). %10 talaş biyoçarı modifiyeli bitümlerde ortalamadan en fazla sapmanın 600°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitümün 70°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir (- %0,8 fark). %15 talaş biyoçarı modifiyeli bitümlerde en fazla fark 400°C’de elde edilen modifiye bitümden 52°C sıcaklıkta meydana gelmiştir (- %0,3 fark). Modifiye bitümlerin kalıcı modül (G') değerleri Şekil 6.4’te görülmektedir.



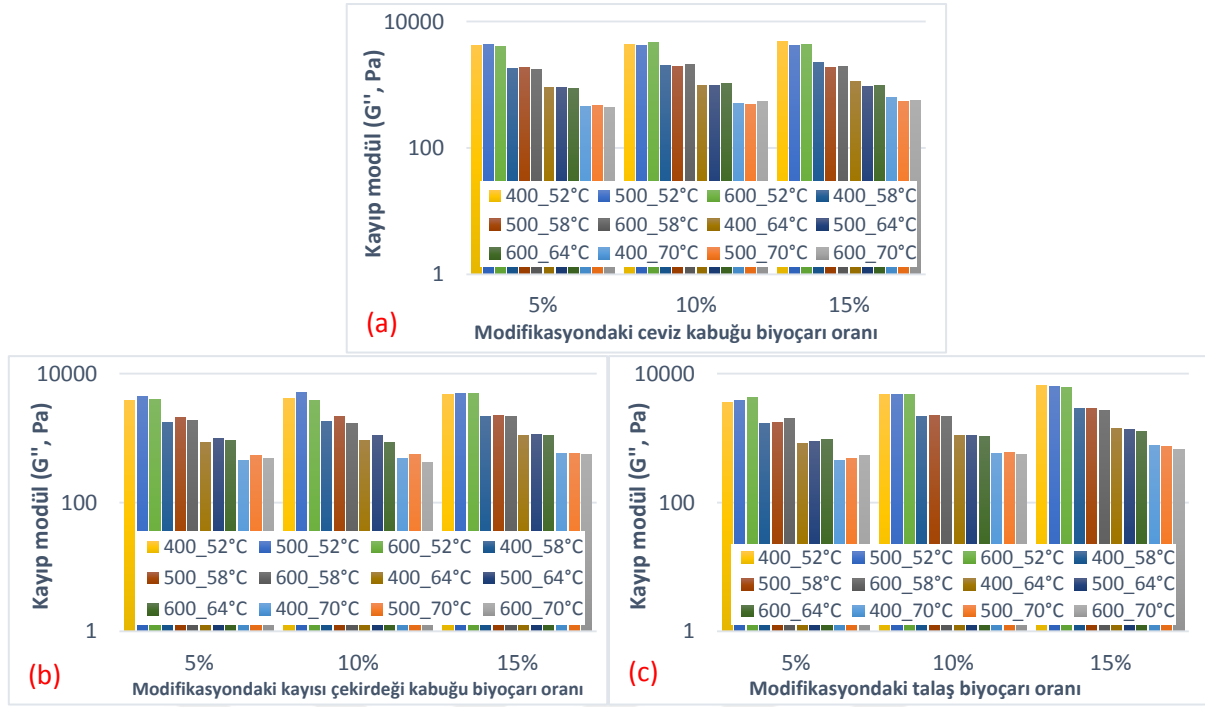
Şekil 6.4. Farklı sıcaklıklarda pirolizden elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin kalıcı modül (G') değerleri

Şekil 6.4'te görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça bağlayıcıların G' değerleri azalmış, katkı içeriği arttıkça bu değerler yükselmiştir. Ceviz kabuğu biyoçar modifiyeli bitümler dikkate alındığında %5 ve %10 kullanılması durumunda G' değerlerinde ortalama göre en fazla farkın, 600°C sıcaklıkta elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bağlayıcılara sırasıyla 58°C ve 70°C sıcaklıklarda uygulanan DSR deneylerinden elde edildiği belirlenmiştir (- %29,3 ve %8,7 fark).

%15 ceviz kabuğu biyoçarı kullanılması durumunda ortalama en fazla sapmanın 400°C sıcaklıkta elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bağlayıcılara 58°C sıcaklıkta uygulanan DSR deneylerinden elde edildiği belirlenmiştir (+ %13,3 fark). Kayısı çekirdeği biyoçarı modifiyeli bitümler dikkate alındığında %5 ve %10 kullanılması durumunda G' değerlerinde ortalama göre en fazla farkın 500°C sıcaklıkta elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bağlayıcılara sırasıyla 58°C ve 70°C sıcaklıklarda uygulanan DSR deneylerinden elde edildiği belirlenmiştir (+ %13,6 ve %21,3 fark).

%15 kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda ortalama göre en fazla farkın 400°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiyeli bitüm ile hazırlanan modifiye bitümün 70°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana gelmiştir (- %9,0 fark).

%5 talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların G' değerlerinde ortalama en fazla sapmanın 400°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitümün 58°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir (- %13,0 fark). %10 talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda ortalama en fazla sapmanın 600°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitümün 70°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir (+ %11,2 fark). %15 talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda en fazla fark 400°C'de elde edilen modifiye bitümden 70°C sıcaklıkta meydana gelmiştir (+ %7,8 fark). Modifiye bitümlerin kayıp modül (G'') değerleri Şekil 6.5'de görülmektedir.



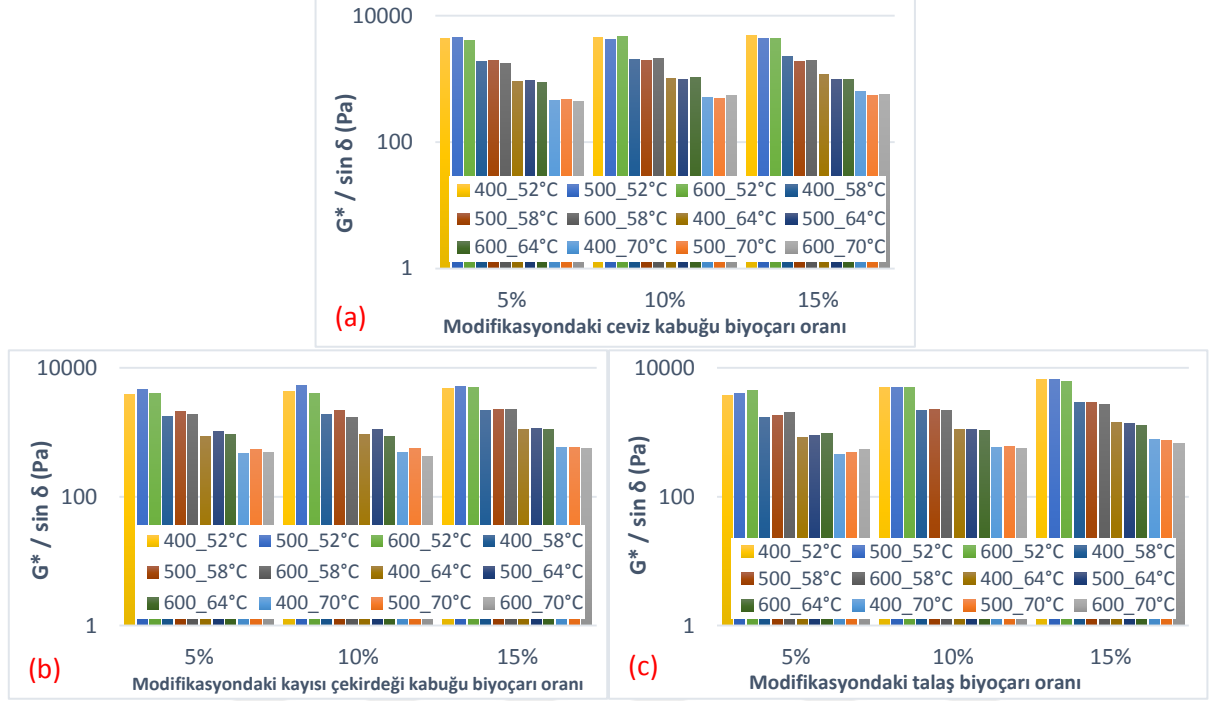
Şekil 6.5. Farklı sıcaklıklarda pirolizden elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin kayıp modül (G'') değerleri

Modifiye bitümlerin G'' değerleri incelendiğinde sıcaklığın artması ile bu değerlerin azaldığı, katkı kullanımı ile arttığı belirlenmiş, en yüksek değerlere talaş biyoçarı modifiyeli bitümlerin sahip olduğu tespit edilmiştir. Modifiye bitümlerin kıyasını yapabilmek için farklı sıcaklıklarda piroliz edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin kayıp modüllerinin aynı sıcaklıktaki değerlerinin ortalaması alınmış ve her bir sıcaklıktaki değerin bu ortalama değerden sapma miktarları tespit edilmiştir.

%5 ve %10 ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümlerden elde edilen değerler incelendiğinde en büyük farkların 600°C sıcaklıkta piroliz edilmiş biyoçar içeren modifiye bitümlerden sırasıyla 58°C ve 52°C sıcaklıkta elde edilen G'' değerlerinde olduğu tespit edilmiştir (- %4,0 ve + %5,7 fark). %15 ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümlerin deney sonuçları dikkate alındığında en büyük farkın 400°C sıcaklıkta piroliz edilmiş biyoçar içeren modifiye bitümlere 58°C sıcaklıkta uygulanan DSR deneyleri sonucunda elde edildiği belirlenmiştir (+ %12,4 fark).

Kayısı çekirdeği biyoçarı modifiyeli bitümler dikkate alındığında %5 ve %10 oranlarında kullanılması durumunda G'' değerlerinde ortalamaya göre en fazla farkın 500°C sıcaklıkta elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bağlayıcılara 52°C sıcaklıkta uygulanan DSR deneylerinden elde edildiği belirlenmiştir (+ %10,0 ve %16,8 fark). %15 kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda ortalamaya göre en fazla farkın 400°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitüm ile hazırlanan modifiye bitümün 52°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana gelmiştir (- %3,0 fark). Talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların G'' değerlerinde ortalamadan en fazla sapma her üç oranda da (%5, %10 ve %15) 600°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitümün 58°C, 64°C ve

70°C sıcaklıklarda deneye tabi tutulması sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir (sırasıyla + %9,9, - %3,5 ve -%9,0 fark). Modifiye bitümlerin tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) değerleri Şekil 6.6'da görülmektedir.



Şekil 6.6. Farklı sıcaklıklarda pirolizden elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin tekerlek izi parametreleri ($G^*/\sin \delta$)

Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımının bir göstergesi olan $G^*/\sin \delta$ değerleri incelendiğinde sıcaklıkla bu değer azaldığı ve katkı içeriğinin artması ile bu değer arttığı belirlenmiştir. En yüksek değerlere talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların sahip olduğu belirlenmiştir.

%5 ve %10 ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümlerden elde edilen değerler incelendiğinde en büyük farkların 600°C sıcaklıkta piroliz edilmiş biyoçar içeren modifiye bitümlerden 52°C sıcaklıkta elde edilen $G^*/\sin \delta$ parametreleri değerlerinde olduğu tespit edilmiştir (- %5,4 ve + %5,6 fark).

%15 ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümlerin deney sonuçları dikkate alındığında en büyük farka 400°C sıcaklıkta piroliz edilmiş bioçar içeren modifiye bitümlere 58°C sıcaklıkta uygulanan DSR deneyleri sonucunda elde edildiği belirlenmiştir (+ %12,4 fark).

Kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümler dikkate alındığında %5 ve %10 kullanılması durumunda $G^*/\sin \delta$ parametresi değerlerinde ortalamaya göre en fazla farkın 500°C sıcaklıkta elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bağlayıcılara 52°C sıcaklıkta uygulanan DSR deneylerinden elde edildiği belirlenmiştir (+ %10,3 ve %17,0 fark).

%15 kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda ortalamaya göre en fazla farkın 400°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitüm ile hazırlanan modifiye bitümün 52°C sıcaklıkta deneye tabi tutulması sonucu meydana gelmiştir (- %3,2 fark).

Talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların tekerlek izi parametreleri incelendiğinde ortalama en fazla sapma her üç oranda da (%5, %10 ve %15) 600°C sıcaklıkta elde edilen biyoçar modifiye bitümün 58°C, 64°C ve 70°C sıcaklıklarda deneye tabi tutulması sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir (sırasıyla + %9,9, - %3,4 ve -%9,0 fark).

Farklı (400, 500 ve 600°C) sıcaklıklarda piroliz işlemi sonucu elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin kompleks modül (G^*) değerleri değerlendirildiğinde piroliz sıcaklığının biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin G^* değerleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. 108 deney sonucu içerisinde %10'dan daha fazla sapmanın sadece 11 deney sonucunda meydana geldiği belirlenmiştir.

Faz açısı (δ°) değerleri değerlendirildiğinde piroliz sıcaklığının öneminin kompleks module göre daha azaldığı farklı sıcaklıkta elde edilen biyoçarlarla modifiye edilen bağlayıcıların δ° arasında en fazla %3,6'lık bir fark meydana geldiği tespit edilmiştir.

Kalıcı modül (G') değerleri dikkate alındığında %5 ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcılarda ortalama değerlere göre en fazla farkın olduğu belirlenmiştir. Diğer katkılarda ve katkı oranlarında sapma miktarının %10'dan düşük olduğu belirlenmiştir. Piroliz sıcaklığıyla düzenli bir değişme gözlenmemiş, %5 ceviz kabuğu biyoçarı dışında piroliz sıcaklığı modifiye bitümlerin G' değerlerine önemli oranda etki etmemiştir.

Kayıp modül (G'') değerleri incelendiğinde sadece 9 deney sonucunda %10'dan fazla bir şaşma olduğu, piroliz sıcaklığının G'' değerleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, meydana gelen değişimde piroliz sıcaklığına bağlı olarak düzenli olmadığı tespit edilmiştir.

Tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) değerlerinden katkı kullanımı ile bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarının artacağı, en etkin katkının ise talaşın pirolizinden elde edilen biyoçar olduğu tespit edilmiştir. Diğer parametrelerde olduğu gibi $G^*/\sin \delta$ parametresi üzerinde de biyoçarların piroliz sıcaklığının önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir.

Elde edilen bütün sonuçlar toplandığında bitüm katkı maddesi olarak öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğu, öğütülmüş ceviz kabuğu ve talaşın pirolizinden elde edilen biyoçarların kullanılmasının kaymaya karşı direnç ve kalıcı deformasyon dayanımı açısından fayda sağlayacağı özellikle talaşın pirolizinden elde edilen biyoçarın en etkin katkı maddesi olduğu söylenebilmektedir. Bunun yanı sıra modifikasyonda kullanılan biyoçarın elde edilmesinde piroliz sıcaklığı etkisi değerlendirildiğinde piroliz sıcaklığının modifiye bitümün kaymaya karşı direnç ve kalıcı deformasyon dayanım özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

Bu durumda yüksek piroliz sıcaklıkları daha fazla enerji gerektireceğinden daha düşük sıcaklıkta (400°C) pirolize tabi tutulmuş biyoçarların bitüm modifikasyonunda kullanılmasının özellikle enerji tasarrufu açısından daha uygun olacağı söylenebilmektedir.

6.3. Biyokütlelerin ve Piroliz Sonrası Elde Edilen Biyoçarların Malzeme Karakterizasyonu

Biyokütlelerden elde edilen biyoçarların malzeme karakterizasyonunu belirlemek amacıyla proximate ve elementel (ultimate) analizler yapılmaktadır. Malzemelerin yüzey özelliklerini ve dağılımlarını tespit etmek amacıyla ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüler analiz edilebilmektedir.

Proximate analizleri Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Biyomühendislik bölümünün laboratuvarlarında yapılmıştır. Deney laboratuvarında kül fırını ve krozeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneye başlanmadan önce kullanılacak olan krozeler sabit tartıma gelmesi amacıyla 900°C’de ısıtılan kül fırınında en az 3 saat bekletilmiştir. Daha sonra sabit tartıma getirilen krozelerin ağırlıkları hassas terazi yardımıyla belirlenip kaydedilmiş ve krozeler karışmaması için işaretlenmiştir (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Kül fırını ve krozelerin sabit tartıma getirilmesi

Bundan sonra krozelere analizi yapılacak biyokütleler veya biyoçarlar konularak hassas terazide tartılıp kaydedilmiştir. İçine malzeme koyulan krozelerin kapakları kapatılarak 900±50°C’deki kül fırınında 7 dk bekletilmiştir. Bu süre sonunda krozeler kül fırınından çıkartılarak desikatör soğutucuya koyulmuş ve soğuyan krozeler alınarak yine tartılmış kaydedilmiştir. Kül fırınına koyulmadan önceki boş kap ağırlığı, malzeme dolu ağırlık ve kül fırınından çıkartıldıktan sonraki ağırlık farklarından malzemenin uçucu madde yüzdesi belirlenmiştir. Daha sonra aynı malzeme dolu krozeler kül yüzdeleri tayin edilmek amacıyla 750°C’de ısıtılmış olan kül fırınına koyularak 4 saat bekletilmiştir. Bu süre sonunda çıkartılan numuneler yine hassas terazide tartılarak ilk ve son ağırlıkları yardımıyla kül yüzdeleri belirlenmiştir. Biyokütle ve biyoçarların nem tayini ise Schimadzu marka nem tayin cihazı yardımıyla bulunmuştur. Cihaza her seferinde 1 gr numune koyulmakta ve cihaz 105°C’de deneyi gerçekleştirmektedir. İçine konulan numunelerin nem yüzdesini otomatik olarak

belirleyip ekrana yazmaktadır (Şekil 6.8). Tüm bu işlemler sonucunda hem biyokütlelerin hem de piroliz sonrası elde edilen biyoçarların kül içerikleri (%), uçucu madde miktarları (%), nem (%) tayinleri yapılmış ve aşağıdaki basit formülle sabit karbon (%) içerikleri hesapla tespit edilmiştir (Denklem 6.1).

$$\text{Sabit Karbon(\%)} = 100 - [\text{UçucuMad.\%} + \text{Nem\%} + \text{Kül\%}] \quad (6.1)$$



Şekil 6.8. Nem tayini cihazı

Biyokütle ve biyoçarların elementel analizleri ise İnönü Üniversitesi akaryakıt ve petrol analiz laboratuvarlarında yaptırılmıştır. Elementel analiz sonucunda malzemelerin C, H, N, S yüzdeleri ve ısı değerleri belirlenmiştir. Oksijen yüzdesi ise basit formül yardımıyla hesapla bulunmuştur (Denklem 6.2).

$$\text{Oksijen (\%)} = 100 - [\text{C\%} + \text{H\%} + \text{N\%} + \text{S\%} + \text{Kül\%}] \quad (6.2.)$$

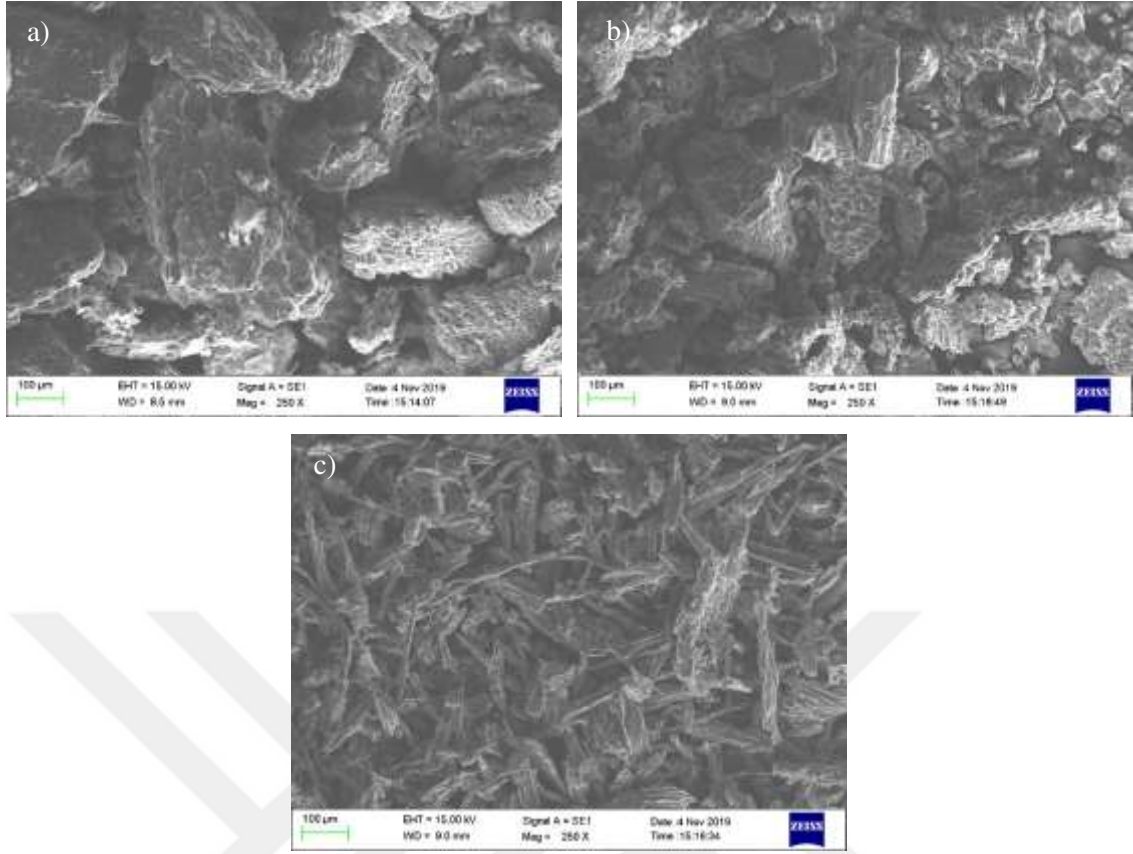
Biyokütle ve biyoçarların proximate ve elementel (ultimate) analizler sonrasında değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Biyokütle ve biyoçarların proximate ve elementel analiz sonuçları

Numune İsmi	Elementel Analiz					Kül (%)	Uçucu Madde (%)	Nem (%)	Sabit Karbon* (%)	Isıl Değer (cal/g)
	% C	% H	% N	% S	% O*					
Kayısı Çekirdeği Kabuğu	50,55	5,791	0,645	0,225	41,919	0,87	80,025	0,99	18,115	4875
Ceviz Kabuğu	50,22	5,558	0,567	0,098	41,397	2,16	72,098	0,59	25,152	4735
Talaş	46,11	6,299	3,149	0,084	42,578	1,78	79,768	2,20	16,252	4600
Kayısı Çekirdeği Çarı	76,78	3,613	1,095	0,332	13,68	4,50	27,5329	3,74	64,227	7420
Ceviz Kabuğu. Çarı	78,46	3,161	0,566	0,089	14,044	3,68	21,7830	5,40	69,137	7275
Talaş Çarı	74,03	3,545	3,400	0,110	14,195	4,72	22,3226	4,99	67,9674	6920

Biyokütlelerden elde edilen biyoçarların içerdikleri karbon itibariyle katkı malzemesi olarak kullanılacak olması biyoçarların içerdiği karbon miktarını önemli kılmaktadır. Tablo 6.1'deki analiz sonuçlarına bakıldığında tüm biyokütlelerin piroliz sonrası içerdiği karbon yüzdesinde artış meydana geldiği görülmektedir. Yani biyokütleler piroliz işlemi sonrası karbonca zenginleşerek biyoçarlara dönüşmüşlerdir. Piroliz öncesinde en yüksek karbon içeriğine kayısı çekirdeği kabuğunun, buna çok yakın olarak ceviz kabuğunun ve en düşük karbon içeriğine ise talaşın sahip olduğu görülmüştür. Piroliz sonrası karbon yüzdeleri karşılaştırıldığında ise en yüksek içeriğe ceviz kabuğu biyoçarının, buna çok yakın olarak kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarının ve yine en düşük karbon içeriğine talaş biyoçarının sahip olduğu belirlenmiştir. Piroliz sonrası karbonca zenginleşme oranlarına bakıldığında kayısı çekirdeği kabuğunun %51.88, ceviz kabuğunun %56.23 ve talaşın %60.55 oranlarında karbonca zenginleşmiş olduğu görülmektedir. Buna göre piroliz işlemi sonucunda en fazla karbonca zenginleşen biyokütlenin talaş olduğu belirlenmiştir.

Biyoçarların yüzey özelliklerini tespit etmek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntü analizi yapılmıştır (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Ceviz kabuğu (a), kayısı çekirdeği kabuğu (b) ve talaş (c) biyoçarlarının SEM görüntüleri

Bioçarların SEM fotoğrafları görsel olarak incelendiğinde ceviz kabuğu biyoçarının diğer biyoçarlara göre daha yoğun ve yüzey yapısı olarak daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu, kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarının ceviz kabuğu biyoçarına göre daha az yoğun ve pürüzlü bir yapısı olduğu, talaş biyoçarının ise yoğunluğunun ve yüzey pürüzlülüğünün en az olan biyoçar olduğu görülmüştür.

6.4. Bağlayıcı Deney Sonuçları

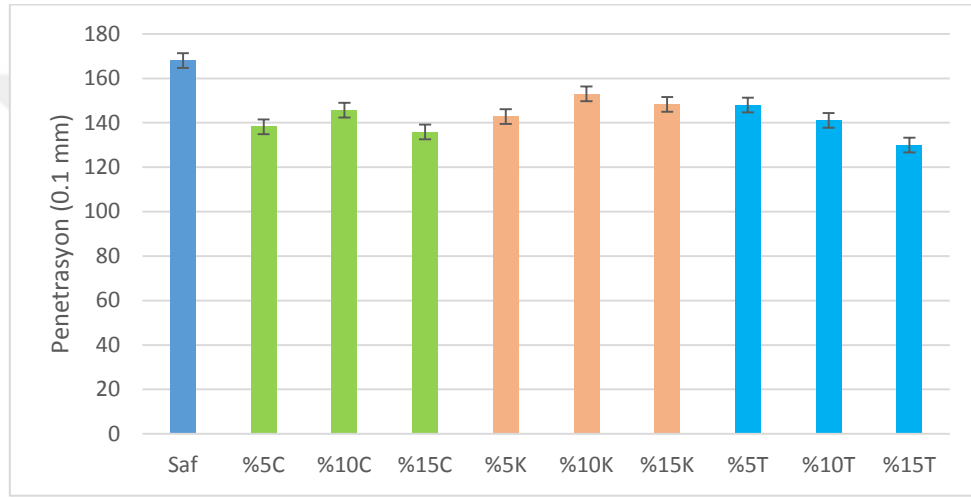
Tez çalışması kapsamında saf ve biyoçar modifiyeli bağlayıcılara geleneksel (penetrasyon, yumuşama noktası ve dönel viskozite) ve Superpave (dinamik kayma reometresi (DSR), kiriş eğme reometresi (BBR), dönel ince film halinde ısıtma (RTFO) ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV)) deneyleri uygulanmıştır.

Piroliz işlemi, laboratuvarında bulunan ve tez çalışması kapsamında tasarlanarak imal edilen yavaş piroliz cihazı kullanılarak yapılmıştır. Piroliz sırasında gaz çıkışı bir boru yardımıyla yapılmış, su soğutma sistemiyle çıkan gaz yoğunlaştırılarak biyoyağ elde edilmiştir. Gaz çıkışı sona erdiğinde cihaz soğumaya bırakılmış, ortam sıcaklığına ulaşıldığında kapak açılarak karbonize edilmiş ürün olan biyoçar elde edilmiştir. Aynı boyutta malzemeler, aynı sıcaklıkta piroliz işlemine tabi tutularak boyut ve sıcaklık etkisinin numune özelliklerine etki etmemesi sağlanmıştır. Elde edilen biyoçarlar kaplara

alınarak hava almayacak şekilde ağızları kapatılmış ve güneş görmeyen ortamda oda sıcaklığında modifikasyon işlemine kadar bekletilmiştir. Piroliz işleminin gerçekleştirilmesi bölüm 5.1’de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Her bir biyoçardan saf bitüm ağırlığınca %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Modifiye bitümlerin hazırlanma prosedürü bölüm 6.1’de anlatılmıştır.

6.4.1. Konvansiyonel Bağlayıcı Deney Sonuçları

EN 1426 standardına uygun olarak yapılan penetrasyon deney sonuçları Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.10. Saf ve modifiye bağlayıcıların penetrasyon değerleri

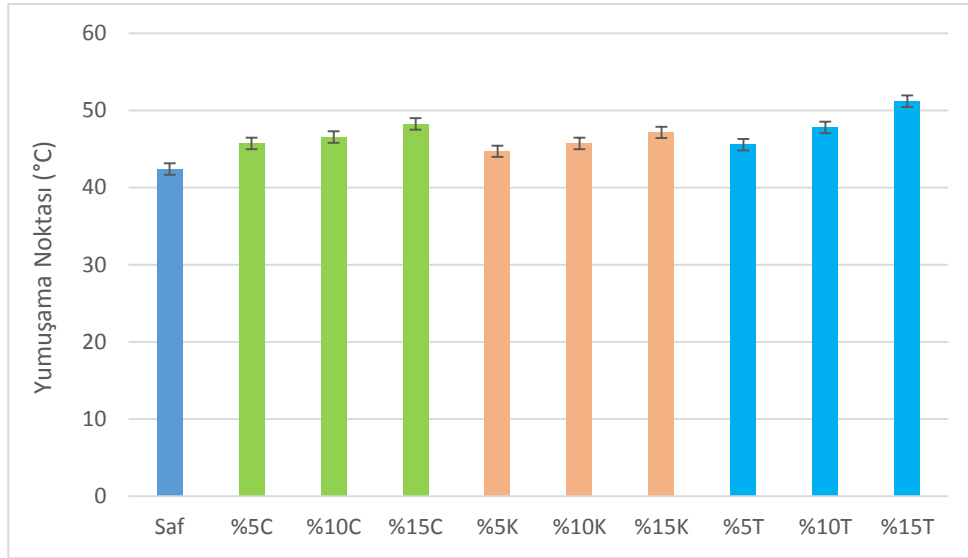
Şekil 6.10’da görüldüğü üzere katkı kullanımı ile penetrasyon değerleri azalmış dolayısıyla bağlayıcıların kıvamları artmıştır. Bitüm modifikasyonunda öğütülmüş ceviz kabuğunun pirolizinden elde edilen biyoçardan %5, %10 ve %15 kullanılması durumunda penetrasyon değeri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %14,4; %8,7 ve %16,4 oranlarında azalmıştır.

Katkı maddesi olarak öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğunun pirolizinden elde edilen biyoçardan %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılması durumunda penetrasyon değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %10,8; %3,4 ve %6,7 oranlarında azalmıştır.

Bitüm modifikasyonunda talaşın pirolizinden elde edilen biyoçardan %5, %10 ve %15 kullanılması ile penetrasyon değerleri düzenli bir şekilde saf bağlayıcıya göre sırasıyla %6,9; %12,1 ve %21,7 oranlarında azalmıştır.

Elde edilen sonuçlardan penetrasyon değerleri üzerinde etkinliği en fazla olan katkının talaşın pirolizinden elde edilen biyoçar olduğu (%15 oranında kullanım), etkinliği en az olan katkının ise %10 oranında öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğunun biyoçarı olduğu tespit edilmiştir.

Bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri Şekil 6.11’de görülmektedir.



Şekil 6.11. Saf ve modifiye bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri

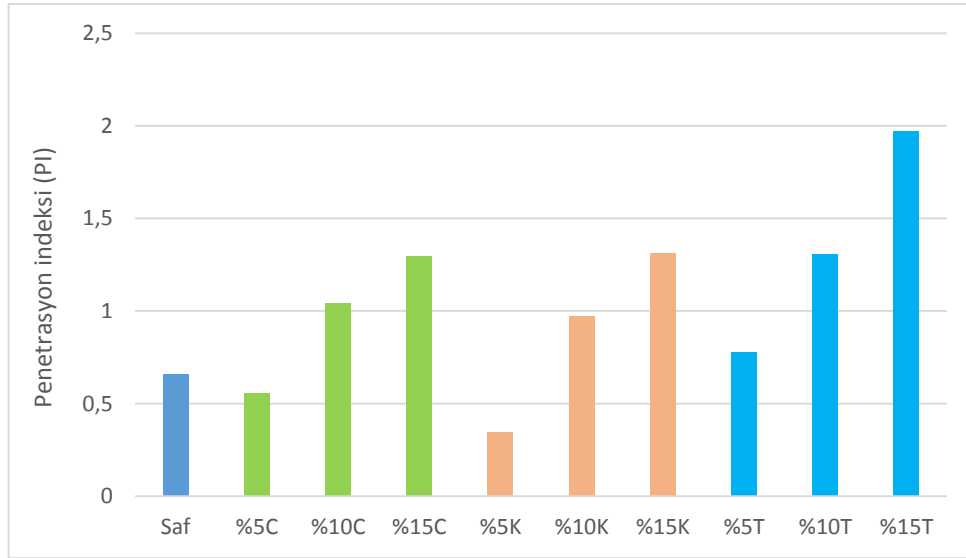
Şekil 6.11’de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile yumuşama noktası değerleri artmış, dolayısıyla bioçarların bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık dayanımlarını arttırdığı tespit edilmiştir. Katkı oranı arttıkça yumuşama noktası değerleri de düzenli bir şekilde artmıştır.

Öğütülmüş ceviz kabuğunun pirolizinden elde edilen biyoçardan bitüm ağırlığınca %5 kullanılması ile yumuşama noktası değeri saf bağlayıcıya göre %2,9; %10 kullanılması durumunda %4,8 ve %15 oranında kullanılması durumunda %8,7 oranında artmıştır.

Bitüm modifikasyonunda öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğunun pirolizinden elde edilen biyoçardan %5; %10 ve %15 oranlarında kullanılması durumunda yumuşama noktası değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %0,7; %2,9 ve %6,2 oranında artmıştır.

Bitüm modifikasyonunda talaşın pirolizinden elde edilen biyoçardan aynı oranlarda kullanılması ile yumuşama noktası değerleri sırasıyla %2,6; %7,7 ve %15,3 oranlarında artmıştır.

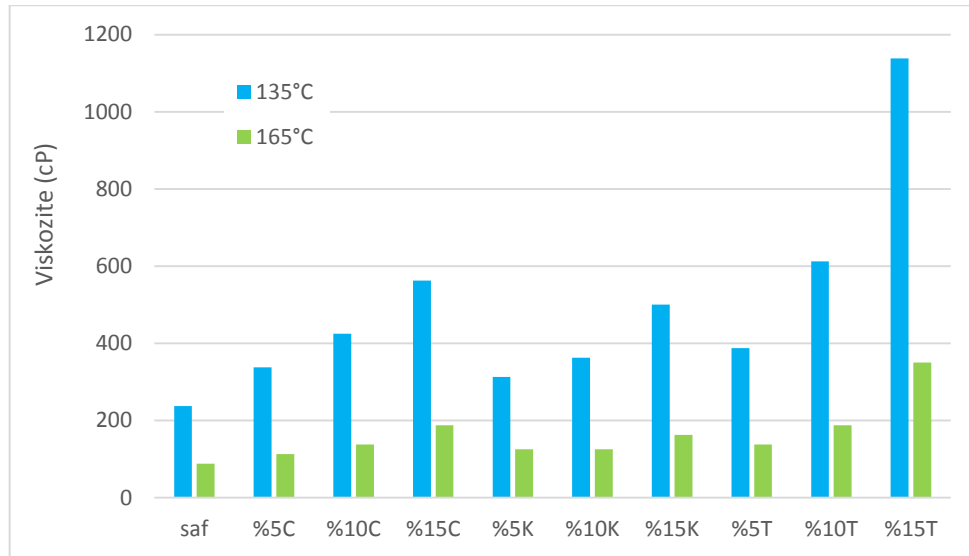
Elde edilen sonuçlardan talaşın pirolizinden elde edilen biyoçardan %15 kullanılması durumunda penetrasyon deneyinde olduğu gibi yumuşama noktası deneyinde de en etkin sonucun elde edileceği tespit edilmiştir. Penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinden yararlanılarak belirlenen ve bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetlerinin bir göstergesi olan penetrasyon indeksi değerlerinin katkı türü ve içeriği ile değişimi Şekil 6.12’de görülmektedir.



Şekil 6.12. Saf ve modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksi değerleri

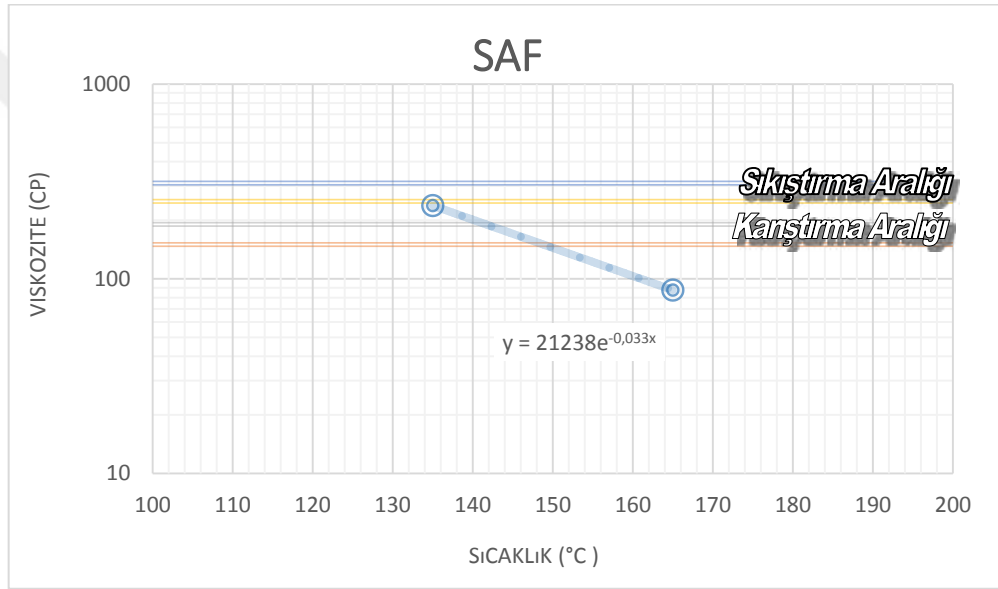
Şekil 6.12’de görüldüğü üzere katkı oranı arttıkça bütün modifiye bitümlerde penetrasyon indeksi artmış dolayısıyla bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetleri düzenli bir şekilde azalmıştır. Bunun yanı sıra saf bitümle karşılaştırıldığında öğütülmüş ceviz kabuğu ve kayısı çekirdeği kabuğunun pirolizinden elde edilen biyoçarlardan %5 kullanılarak modifiye bitüm hazırlanması durumunda ısıya karşı hassasiyeti daha yüksek bağlayıcılar elde edileceği, diğer bütün modifiye bitümlerin ısıya karşı hassasiyetinin saf bağlayıcıya göre daha az olacağı belirlenmiştir.

Bitümlü bağlayıcılara 135 ve 165°C sıcaklıkta uygulanan dönel viskozite [132] deney sonuçları Şekil 6.13’de görülmektedir.



Şekil 6.13. Saf ve modifiye bağlayıcıların 135 ve 165°C sıcaklıktaki viskozite değerleri

Şekil 6.13'te görüldüğü üzere katkı kullanımı ile viskozite değerleri düzenli olarak artmıştır. Superpave şartnamesine göre işlenebilirlik açısından bağlayıcıların 135°C sıcaklıkta viskozite değeri en fazla 3000 cP olması gerekmektedir. Şekilde görüldüğü üzere bütün bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite değerleri 3000 cP'dan düşük olduğundan işlenebilirlik açısından şartname gereksinimini sağlamaktadır. Hem 135 hem de 165°C sıcaklıklarda bağlayıcıların viskozitesini en fazla artıran katkının talaşın pirolizinden elde edilen biyoçar olduğu belirlenmiştir. Talaş biyoçarının 135°C sıcaklıkta 165°C sıcaklığa göre daha etkin olduğu belirlenmiştir. Bitümlü bağlayıcıların agregayla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları viskozite değerlerinden faydalanılarak hesaplanmıştır. Örnek olarak saf bağlayıcının sıcaklık-viskozite grafiği Şekil 6.14'de verilmiştir. Ayrıca belirlenen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ile modifikasyon indeksleri Tablo 6.2'de görülmektedir.



Şekil 6.14. Saf bağlayıcının viskozite-sıcaklık ilişkisi

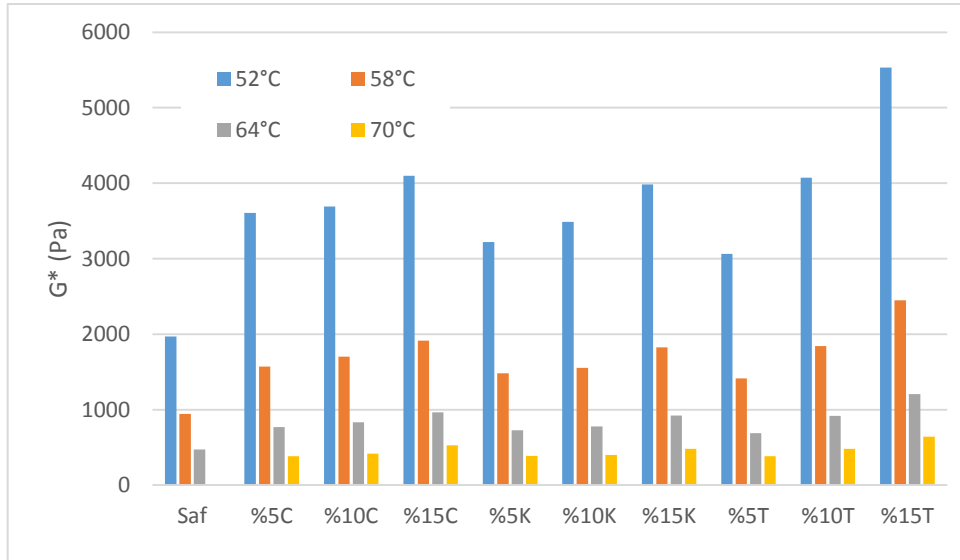
Tablo 6.2'de verilen bitümlü bağlayıcıların agregayla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları incelendiğinde katkı kullanılması ile daha yüksek sıcaklıklar gerektiği dolayısıyla daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulacağı tespit edilmiştir. Özellikle talaş biyoçarından %15 kullanılması durumunda agregayla karıştırmak için saf bitüme göre yaklaşık 25°C daha yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulacağı görülmektedir.

Tablo 6.2. Dönel viskozite deney sonuçları

	Saf	%5C	%10C	%15C	%5K	%10K	%15K	%5T	%10T	%15T
Viskozite (cP, 135°C)	237,5	337,5	425,0	562,5	312,5	362,5	500,0	387,5	612,5	1138
Modifikasyon indeksi @135°C (η_{MB}/η_{saf})	1,00	1,42	1,79	2,37	1,32	1,53	2,11	1,63	2,58	4,79
Viskozite (cP, 165°C)	87,5	112,5	137,5	187,5	125	125	162,5	137,5	187,5	350
Modifikasyon indeksi @165°C (η_{MB}/η_{saf})	1,00	1,29	1,57	2,14	1,43	1,43	1,86	1,57	2,14	4,00
Karıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	142,9- 150,1	149,1- 155,5	154,8- 161,0	163,1- 169,3	149,0- 156,7	155,4- 162,1	162,8- 169,2	153,6- 160,3	166,6- 172,7	182,0- 188,0
Sıkıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	128,1- 134,6	135,9- 141,7	141,9- 147,6	149,7- 155,5	133,3- 140,2	141,4- 147,5	149,6- 155,4	139,6- 145,7	154,1- 159,6	169,4- 174,9

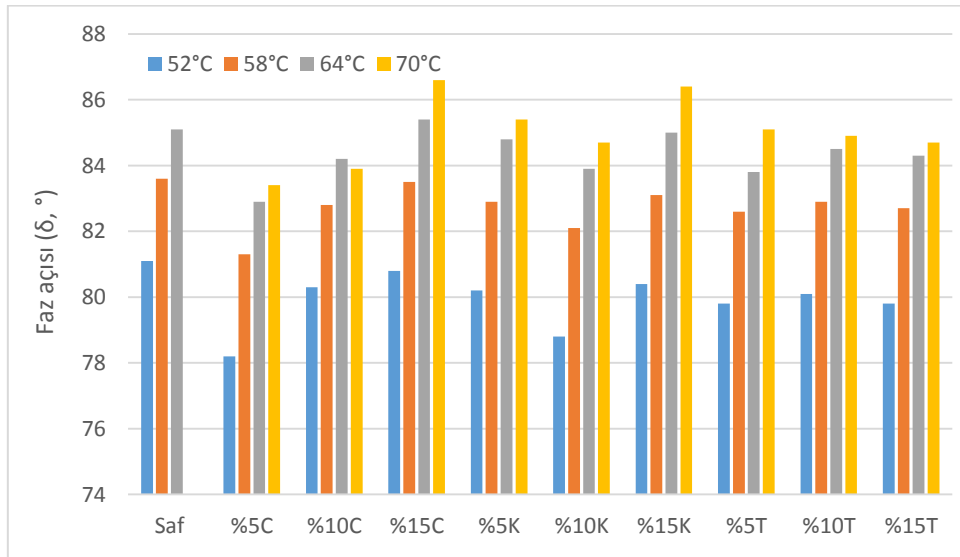
6.4.2. Bağlayıcıların Superpave Yöntemine Göre Performans Seviyeleri

Tez çalışması kapsamında öncelikle yaşlandırılmamış (orijinal) saf ve modifiye bitümlerin Superpave yöntemine göre performans seviyesi yüksek sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Bu nedenle Superpave şartnamesine uygun olarak saf bağlayıcı 3 farklı sıcaklıkta (52, 58 ve 64°C), modifiye bitümler ise 4 farklı sıcaklıkta (52, 58, 64 ve 70°C) deneylere tabi tutulmuştur. Uygulanan deneylerden elde edilen kompleks modül (G^*) değerlerinin katkı türü ile değişimi Şekil 6.15'te, faz açısı (δ°) değerlerinin değişimi Şekil 6.16'da ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) değerlerinin değişimi ise Şekil 6.17'de verilmiştir.



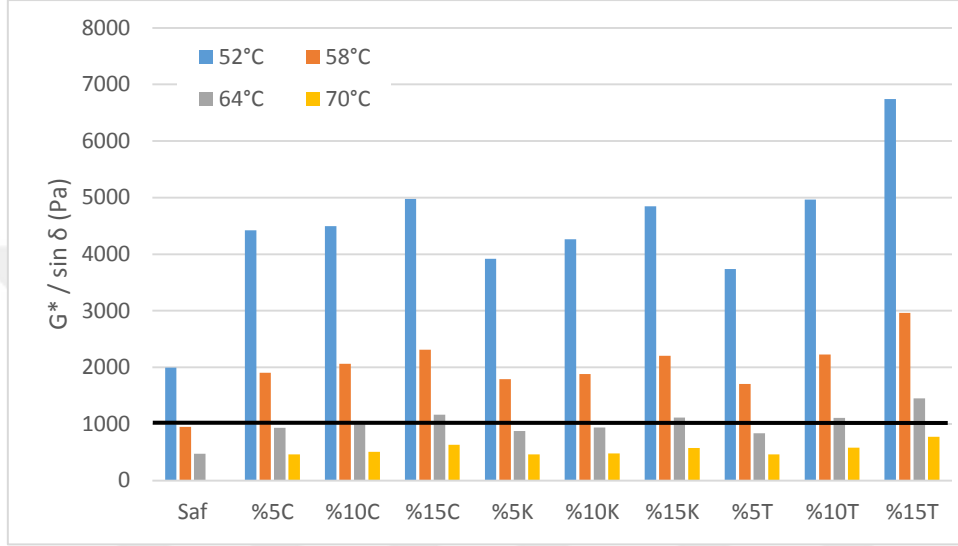
Şekil 6.15. Farklı sıcaklıklardaki kompleks modül (G^*) değerlerinin katkı türü ve oranı ile değişimi

Şekil 6.15'te görülen kompleks kayma modülü (G^*) değerleri incelendiğinde sıcaklığın artması ile G^* değerleri azalırken katkı kullanımı ile bu değerlerin düzenli bir şekilde arttığı, dolayısıyla katkı kullanımı ile kaymaya karşı direnç açısından fayda sağlanacağı söylenebilmektedir. Kompleks kayma modülleri karşılaştırıldığında etkinliği en yüksek olan katkının talaş biyoçarı olduğu, en az olan katkının ise öğütülmüş ceviz kabuğu biyoçarı olduğu belirlenmiştir. %10 talaş biyoçarı ile %15 öğütülmüş ceviz kabuğu ve kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifikasyonunun G^* değerleri açısından benzer etkiye sahip oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 6.16. Farklı sıcaklıklardaki orijinal (yaşlandırılmamış) bağlayıcıların faz açısı (δ°) değerlerinin katkı türü ve oranı ile değişimi

Faz açısı (δ°) değerleri 0° ile 90° arasında değişmekte olup bu değerlerin sıfıra yakın olması elastikiyetin fazla olduğunu, 90° 'a yakın olması ise viskoz davranışa daha yakın olduğunu göstermektedir. Şekil 6.16'da görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça δ° değerlerinin düzenli olarak arttığı dolayısıyla bağlayıcıların daha viskoz davranış sergiledikleri belirlenmiştir. Bütün sıcaklıklarda saf bağlayıcının en yüksek δ° değerlerine sahip olması katkı kullanımının elastikiyeti arttırdığını göstermektedir.



Şekil 6.17. Farklı sıcaklıklardaki orijinal bağlayıcıların tekerlek izi ($G^*/\sin \delta$) parametrelerinin sıcaklık ve katkı türü ile değişimi

Şekil 6.17'de verilen tekerlek izi dayanım parametreleri ($G^*/\sin \delta$) incelendiğinde katkı kullanımı ile bu değerlerin düzenli bir şekilde arttığı, sıcaklığın artması ile düzenli bir şekilde azaldığı görülmektedir. Superpave yöntemine göre orijinal bağlayıcılar için tekerlek izi dayanımı sınır değeri olan 1000 Pa değerlendirildiğinde 52°C sıcaklıkta bütün bağlayıcıların sağladığı, 58°C sıcaklıkta saf bağlayıcı dışında bütün bağlayıcıların (modifiye bitümlerin hepsinin) sağladığı, 64°C sıcaklıkta 4 bağlayıcının (%15 öğütülmüş ceviz kabuğu biyoçarı, %15 öğütülmüş kayısı çekirdeği biyoçarı, %10 ve %15 talaş biyoçarı modifiyeli bitümler) şartname kriterini sağladığı belirlenmiştir.

70°C sıcaklıkta ise hiçbir bağlayıcı şartname kriterini sağlayamamıştır. Elde edilen sonuçlardan biyoçar malzemelerinin katkı malzemesi olarak kullanımı ile bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarının artacağı, en etkin katkı maddesinin talaş biyoçarı olduğu tespit edilmiştir.

Bu sonuçlardan yola çıkılarak her bir katkıdan orijinal bağlayıcılar üzerinde benzer $G^*/\sin \delta$ değerini sağlayan oranlar seçilmiştir. Bu nedenle öğütülmüş ceviz kabuğu ve öğütülmüş kayısı çekirdeği biyoçarından %15 ve talaş biyoçarından ise %10 oranlarında kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışmada karşılaştırma yapabilmek amacıyla saf bağlayıcı da deneylere tabi tutulmuştur.

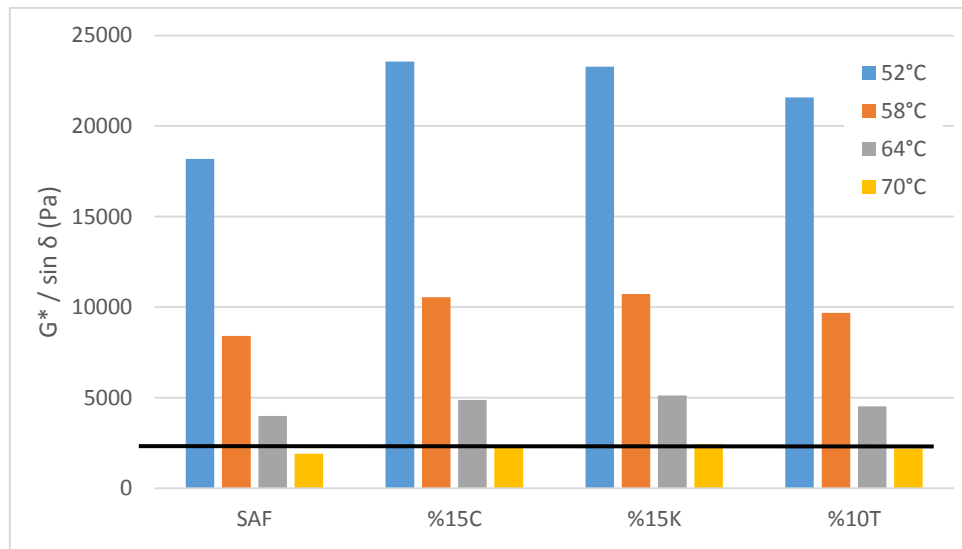
Saf bağlayıcı ile %15 ceviz kabuğu biyoçarı (%15C), %15 kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı (%15K) ve %10 talaş biyoçarı (%10T) modifiyeli bağlayıcılar dönel ince film halinde ısıtma deneyine (RTFOT) tabi tutularak kütle kayıpları ve kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcılar elde edilmiştir. Bağlayıcıların kütle kayıpları Tablo 6.3’de görülmektedir.

Tablo 6.3. RTFOT sonrası bağlayıcıların kütle kayıpları

	Saf	%15C	%15K	%10T
Kütle Kayıpları (%)	0,474	0,461	0,473	0,450

Tablo 6.3’de görüldüğü üzere bağlayıcıların kütle kaybı değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Biyokütleler 400°C sıcaklıkta piroliz işlemine tabi tutulduğundan bünyesinde bulunan hafif ve buharlaşabilen kısımlar piroliz işlemi sırasında uzaklaşmıştır. Bu nedenle kütle kaybının en fazla saf bağlayıcıdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcılar DSR deneyine tabi tutularak $G^*/\sin \delta$ değerleri belirlenmiş ve RTFOT sonrası şartname gereksinimi (2200 Pa) ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.18’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere bütün bağlayıcılar 64°C sıcaklıkta RTFOT sonrası $G^*/\sin \delta$ şartı olan 2200 Pa şartını sağlamıştır. Modifiye bağlayıcılar aynı zamanda 70°C sıcaklıkta da şartname gereksinimini sağlamıştır. Superpave yöntemine göre bağlayıcıların performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin belirlenmesinde hem orijinal hem de kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların aynı sıcaklıkta şartname gereksinimini sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle saf bağlayıcının performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin PG 58-X olduğu, modifiye bitümlerin (%15C, %15K ve %10T) performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin ise PG 64-X olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.18. Kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların tekerlek izi ($G^*/\sin \delta$) parametreleri

RTFOT yöntemi ile kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcılar basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) yöntemi ile uzun dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. PAV deney aleti bölümümüzde bulunmadığından bu deney İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. PAV deneyinde numuneler 100°C sıcaklıkta 2,07 MPa basınç altında 20 saat süresince yaşlandırma kabında bekletilmiş, ardından vakum altında numuneden havanın giderilmesi sağlanarak deney tamamlanmıştır. PAV deneyinden elde edilen uzun dönem yaşlandırılmış numuneler DSR deneyine tabi tutularak bağlayıcıların yorulma parametreleri belirlenmiş, ayrıca kiriş eğme reometresi (BBR) deneyine tabi tutularak düşük sıcaklıktaki rijitlikleri değerlendirilmiştir.

PAV yöntemi ile uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcılara uygulanan DSR deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.4'te verilmiştir. DSR deneyi 8 mm çap ve 2 mm numune yüksekliği geometrisinde uygulanmıştır. Deneyler sonucunda bağlayıcıların yorulma parametreleri olan ($G^* \cdot \sin \delta$) değerleri belirlenmiştir.

Superpave şartnamesine göre deney sıcaklığında $G^* \cdot \sin \delta$ parametresi en fazla 5,00E+06 (5.000.000) Pa olması gerekmektedir. Tablo 6.4'te görüldüğü üzere bütün deney sıcaklıklarında bütün bağlayıcılar $G^* \cdot \sin \delta$ parametresi şartını sağlamıştır.

Kiriş eğme reometresi (BBR) deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.5'te verilmiştir. Bağlayıcılara önce -12°C sıcaklıkta BBR deneyi uygulanmıştır. Bütün bağlayıcılar sünme sertliği (en fazla 300 MPa) ve m-değeri (en az 0,300) şartname kriterlerini sağladığından deneyler -18°C sıcaklıkta tekrarlanmıştır. Bütün modifiye bitümler m-değeri şartname kriterini sağlayamamış, sadece saf bağlayıcı şartname gereksinimini sağlamıştır. Bu nedenle saf bağlayıcıya -24°C sıcaklıkta deney tekrarlanmış ve saf bağlayıcının bu sıcaklıkta m-değeri şartını sağlayamadığı belirlenmiştir.

PG 58-X ve PG 64-X performans seviyesine ait bağlayıcıların Superpave bağlayıcı şartnamesi gereksinimleri Tablo 6.7'de görülmektedir. Tabloda görüldüğü üzere saf bağlayıcının performans seviyesinin PG 58-28 olduğu, modifiye bitümlerin performans seviyesinin ise PG 64-22 olduğu tespit edilmiştir (Tablo 6.6).

Tablo 6.4. Uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları

	Sıcaklık (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G*.sin δ (Pa)
B160/220	16	58070	35,31	33564,5
	19	40397	36,86	24232,6
	22	21693	38,61	17323,9
%15C	25	1,10E+06	44,32	770278
	28	754530	44,85	532135
	31	295040	45,72	211230
%15K	22	3,93E+06	39,29	2,49E+06
	25	2,73E+06	40,92	1,79E+06
	28	1,90E+06	42,42	1,28E+06
	31	1,28E+06	44,50	8,95E+05
%10T	22	3,90E+06	38,8	2,44E+06
	25	2,74E+06	40,4	1,77E+06
	28	1,92E+06	41,87	1,28E+06
	31	1,31E+06	43,75	9,05E+05

Tablo 6.5. Bağlayıcıların BBR deney sonuçları

	Deney sıcaklığı (°C)	Sünme sertliği (S _m , mPa)	m-değeri	Defleksiyon (mm)
B160/220	-12	59,0	0,326768	1,3839
%15C		100,1	0,312358	0,7930
%15K		92,9	0,324837	0,8681
%10T		98,4	0,319205	0,8159
SAF	-18	112,6	0,307726	0,7094
%15C		198,0	0,281795	0,4046
%15K		173,2	0,283301	0,4620
%10T		156,0	0,278244	0,5127
B160/220	-24	214,9	0,271582	0,3716

Tablo 6.6. Bağlayıcıların Superpave performans seviyeleri

Katkı türü	Katkı içeriği (%)	Bağlayıcı kısaltması	Performans seviyesi
B160/220	0	B160/220	PG 58-28
Ceviz Kabuğu biyoçarı	15	%15C	PG 64-22
Kayısı çekirdeği biyoçarı	15	%15K	PG 64-22
Talaş biyoçarı	10	%10T	PG 64-22

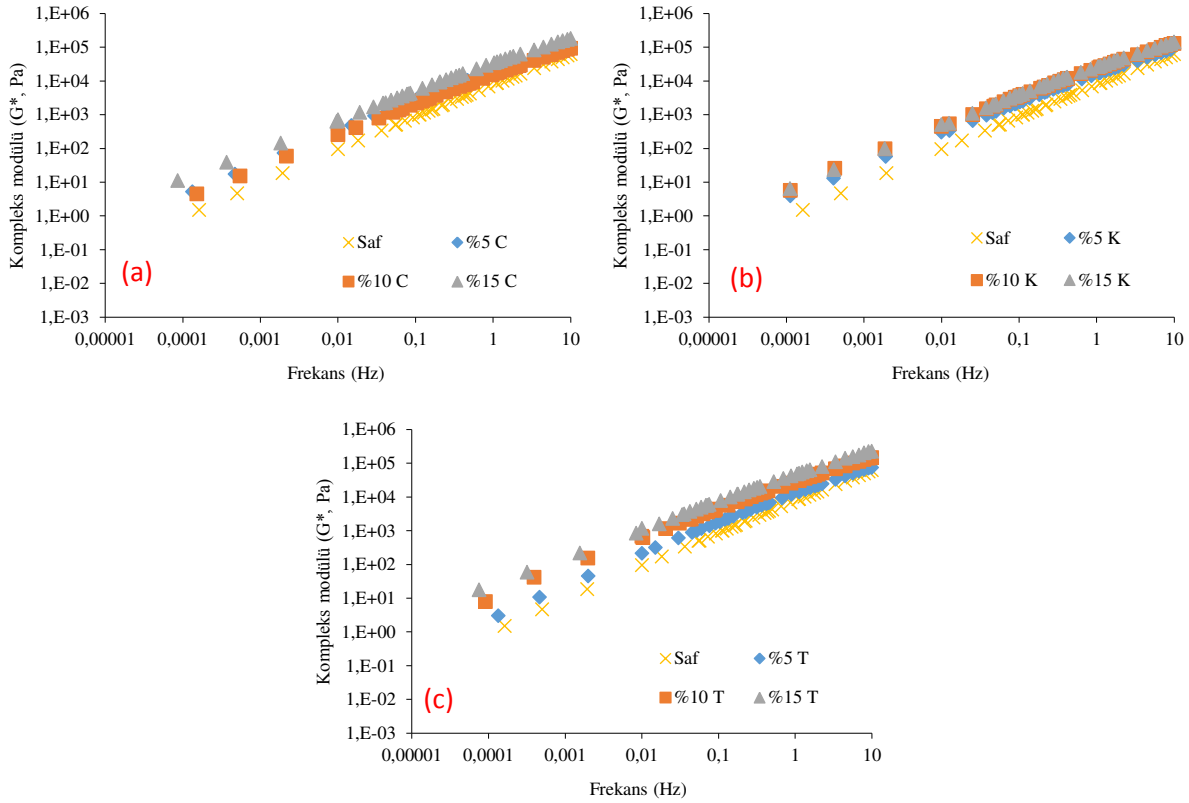
Tablo 6.7. PG 58-X ve PG 64-X Superpave bağlayıcı şartnamesi [121]

PERFORMANS SINIFI	PG 58-					PG 64-					
	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	< 58					< 64					
Minimum KaplamaTasarım Sıcaklığı, °C	> -16	> -22	> -28	> -34	>-40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
ORİJİNAL BAĞLAYICI											
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230										
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135										
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C	58					64					
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI											
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00										
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	58					64					
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI											
PAV Deney Sıcaklığı, °C	100										
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Fiziksel Sertleşme,	Rapor										
Sünme Sertliği, T313, S,Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30

6.4.3. Dinamik Mekanik Analiz Deney Sonuçları

Çalışmada saf bağlayıcı ile %15 oranında öğütülmüş ceviz kabuğu ve %15 oranında öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı ile %10 talaş biyoçarı modifiyeli yaşlandırılmamış (orijinal) bağlayıcılara 40, 50, 60 ve 70°C sıcaklıkta 0,01-10 Hz frekans aralığında 10 farklı frekansta DSR deneyi uygulanarak bitümlü bağlayıcıların farklı şartlardaki reolojik davranışı değerlendirilmeye çalışılmıştır. Elde edilen deney sonuçları superpoze edilerek ana eğrileri (master curve) Malvern Bohlin DSR yazılımı kullanılarak çizilmiştir.

Saf bitüm ve biyoçar modifiyeli bitümlerin kompleks kayma modülü ana eğrilerinin frekansla değişimi Şekil 6.19’da verilmiştir.

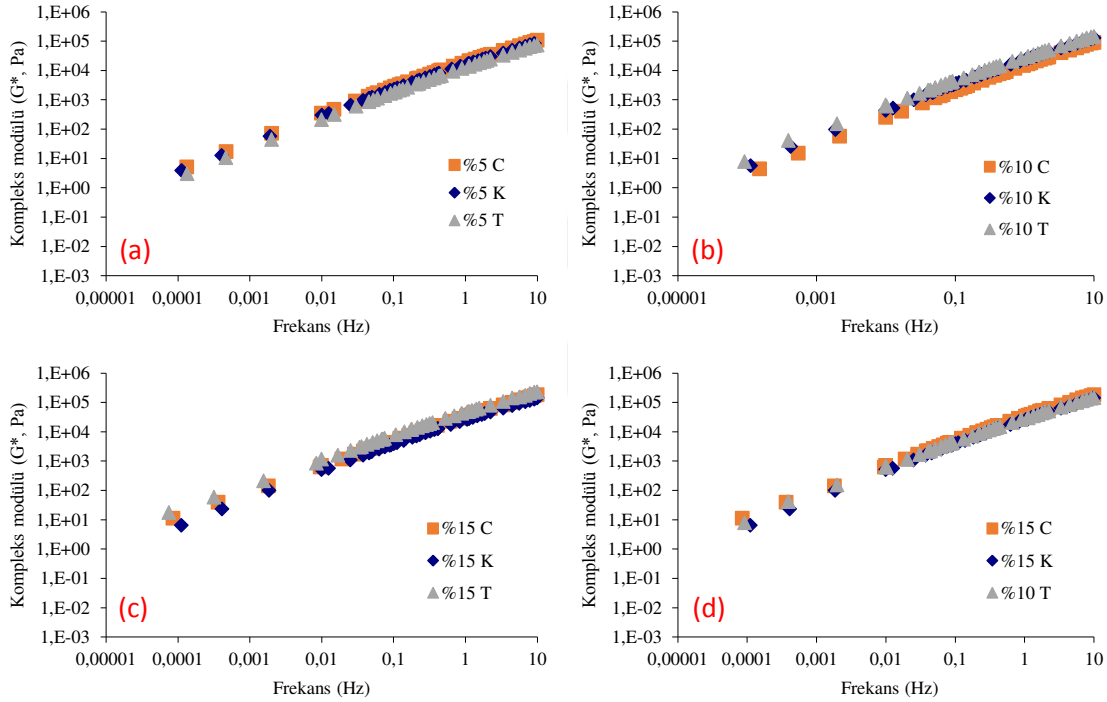


Şekil 6.19. Bağlayıcıların farklı frekanstaki G^* ana eğrileri ((a) Ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümler (b) Kayısı çekirdeği biyoçarı modifiyeli bitümler (c) Talaş biyoçarı modifiyeli bitümler)

Şekil 6.19’da görüldüğü üzere her üç grafikte de modifiye bitümlerin G^* değerlerinin saf bağlayıcıya göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümlerde

(Şekil 6.19.a) %5 ve %10 katkı oranlarında benzer değerler elde edilirken kayısı çekirdeği biyoçarı modifiyeli bitümlerde (Şekil 6.19.b) bütün katkı oranlarında benzer değişim gözlenmiştir.

Talaş biyoçarı modifiyeli bitümlerin ana eğrileri incelendiğinde (Şekil 6.19.c) katkı içeriği arttıkça özellikle düşük frekans seviyelerinde G^* modülü değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Aynı katkı içeriğine sahip farklı biyoçarlarla modifiye edilen bitümlerin G^* modülü ana eğrileri Şekil 6.20’de görülmektedir.



Şekil 6.20. Aynı oranda katkı içeren modifiye bitümlerin farklı frekanstaki G^* ana eğrileri ((a) %5 katkı içeriği (b) %10 katkı içeriği (c) %15 katkı içeriği) ve çalışmada kullanılan oranlarda katkı içeren modifiye bitümlerin ana eğrileri (d)

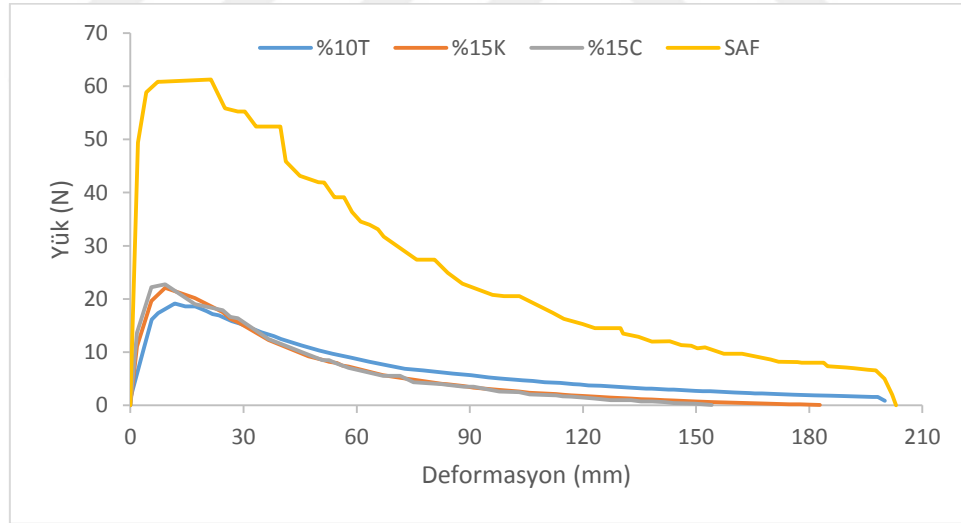
Şekil 6.20’de görüldüğü üzere %5 katkı içeriğinde ceviz kabuğu biyoçarı içeren modifiye bitümlerin, %10 katkı içeriğinde talaş biyoçarı içeren modifiye bitümlerin G^* değerleri üzerinde daha etkin olduğu belirlenmiştir. %15 katkı içeriğinde ise her üç bağlayıcının benzer değişime sahip olduğu gözlenmiştir. Şekil 6.20.d’de çalışmada seçilen katkı içeriklerindeki modifiye bitümlerin G^* modülü ana eğrileri görülmektedir.

Elde edilen sonuçlardan her üç bağlayıcının benzer G^* değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

6.4.4. Elastik Geri Dönme ve Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deney Sonuçları

Çalışma kapsamında saf, %10T, %15K ve %15C modifiyeli bağlayıcılar elastik geri dönme ve kuvvet ölçümlü düktilite deneylerine tabi tutulmuştur. Bağlayıcıların uzama sırasında gösterdikleri dirençteki değişim Şekil 6.21’de verilmiştir. Saf bağlayıcı 203 mm, %10T bağlayıcısı 200 mm, %15K bağlayıcı 179 mm ve %15C bağlayıcısı ise 149 mm deformasyon seviyesine kadar yük almış ve sonrasında kopmuşlardır. %15K ve %15C bağlayıcıları benzer bir davranış göstermiştir. En yüksek yük-deformasyon ilişkisini saf bağlayıcı vermiştir.

Yük-deformasyon eğrisinin altında kalan alan bağlayıcıların deformasyon enerjilerini vermektedir. Tablo 6.8’de elastik geri dönme yüzdeleri ve alanlar verilmiştir. Saf bağlayıcı %10T, %15K ve %15C modifiyeli bağlayıcılara göre sırasıyla 2.87, 3.74 ve 4.22 kat daha fazla deformasyon enerjisine sahiptir. Katkı kullanım ile birlikte elastik geri dönme yüzdeleri %10T, %15K ve %15C modifiyeli bağlayıcılar için saf bağlayıcıya göre sırasıyla %50, %16.7 ve %60 daha düşük elastik geri dönme değeri verdiği belirlenmiştir.



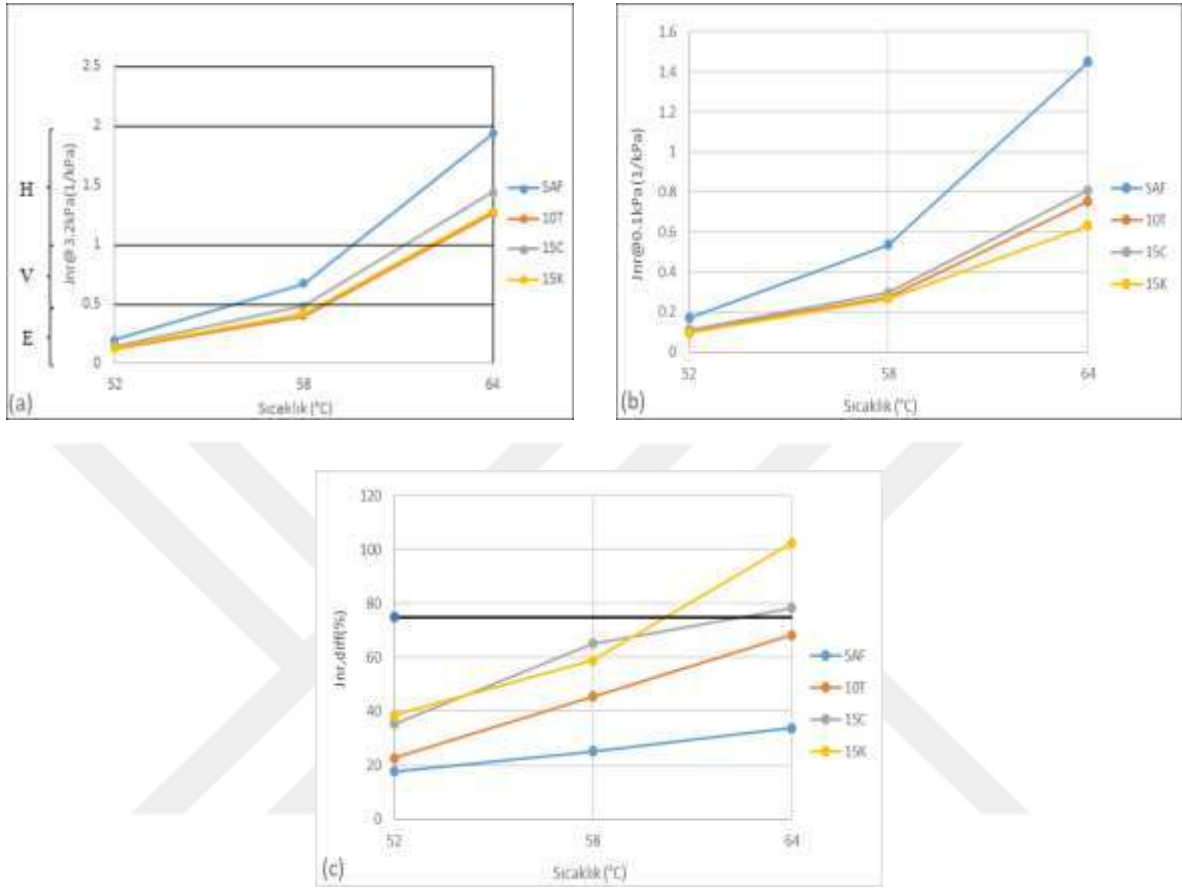
Şekil 6.21. Bağlayıcıların kuvvet-deformasyon ilişkisi

Tablo 6.8. Bağlayıcıların elastik geri dönme yüzdeleri ve kuvvet ölçüm düktilite alanları

Bağlayıcı tipi	Elastik geri dönme (%)	Force düktilite alanı (N.mm)
SAF	30	5312.92
%15C	15	1017.80
%15K	22	1121.32
%10T	25	1372.20

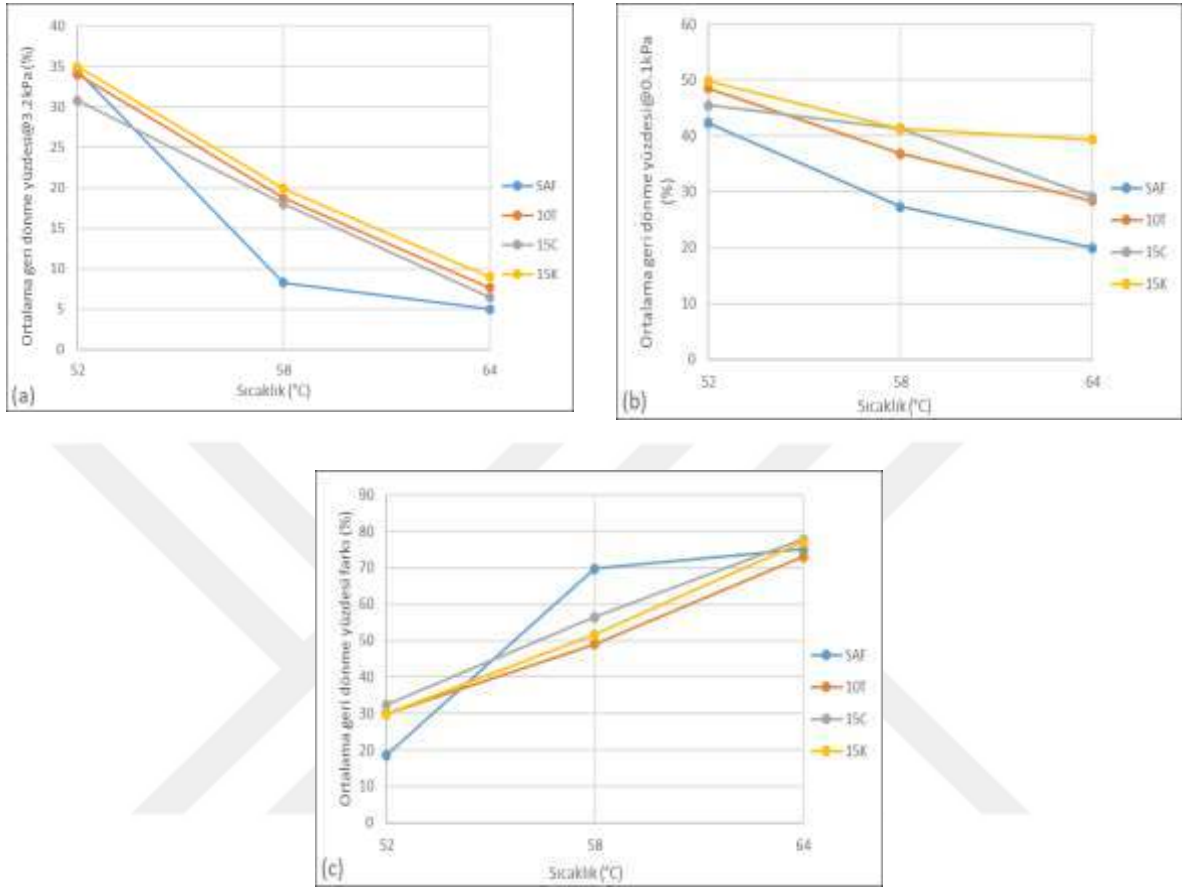
6.4.5. Çoklu Gerilme Uygulanması Sonrası Sünme-Elastik Geri Dönme (MSCR) Deney Sonuçları

MSCR testleri, AASHTO T 350' ye göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.22 sünme uyumunun 3.2 kPa ve 0.1 kPa gerilme seviyelerindeki değişiminin yanı sıra, sünme uyumunun sıcaklıkla bu iki gerilme seviyesi arasındaki yüzdesel farkını göstermektedir. MSCR testi sonuçları, bitümlü bağlayıcıyı “Jnr” kriterine göre derecelendirmenin daha uygun bir yaklaşım olduğunu göstermiştir. Bu yöntem saf ve modifiye bağlayıcıların derecelendirilmesinde başarıyla kullanılabilir. 3.2 kPa ve 0.1 kPa'daki sünme uyumlulukları arasındaki yüzde fark, MSCR protokolünde bağlayıcıları derecelendirmek için ikinci kriterdir. Bu kritere dayanarak, bitümlü bağlayıcının % 75' ten daha fazla bir yüzdesel değişim göstermesi halinde tekerlek izine hassas olduğu kabul edilmektedir. Buna göre % 15C ve %15 K ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların 3.2 kPa ve 0.1 kPa'da sünme uyumu arasındaki yüzdesel fark % 75'ten daha fazla çıktığından, 64°C' de tekerlek izine karşı daha düşük dirençli olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.22'de görüldüğü üzere 52°C'de en düşük “Jnr” değerini %10T bağlayıcısı verirken en yüksek “Jnr” değerini saf bağlayıcı vermiştir. 58 ve 64°C'de %10T ve %15K benzer sünme uyumu gösterirken yine en düşük Jnr değerini saf bağlayıcının verdiği belirlenmiştir.



Şekil 6.22. Farklı sıcaklıklarda 3.2 kPa'daki sünme uyumunun (a), 0.1kPa'daki sünme uyumunun (b), 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyesindeki yüzdesel farkın değişimi (c)

Şekil 6.23, ortalama yüzde geri kazanımın 3.2 kPa ve 0.1 kPa gerilme seviyelerindeki değişiminin yanı sıra sıcaklıkla bu iki gerilme seviyesi arasındaki ortalama yüzde geri kazanımın yüzdesel farkını göstermektedir. 3.2 kPa gerilme seviyesindeki ortalama geri dönme yüzdesi 52, 58 ve 64 °C sıcaklıklarda saf bağlayıcı için sırasıyla %34, %8 ve %5, %10T modifiyeli bağlayıcı için sırasıyla %34, %19 ve %8, %15K modifiyeli bağlayıcı için %35, %20 ve %9 ve %15C modifiyeli bağlayıcı için sırasıyla %31, %18 ve %6 olduğu görülmüştür. Saf bağlayıcının 58 °C'de verdiği yüzde geri dönme değerlerini modifiye bağlayıcılar 64 °C'de vermiştir. 0.1 kPa gerilme seviyesindeki ortalama geri dönme yüzdeleri 3.2 kPa gerilme seviyesi ile uyumluluk göstermiştir. Şekil 6.23 (c)'de görüldüğü üzere modifiye bağlayıcıların ortalama yüzde geri dönmelerindeki yüzdesel farklılıklar benzerlik göstermektedir.

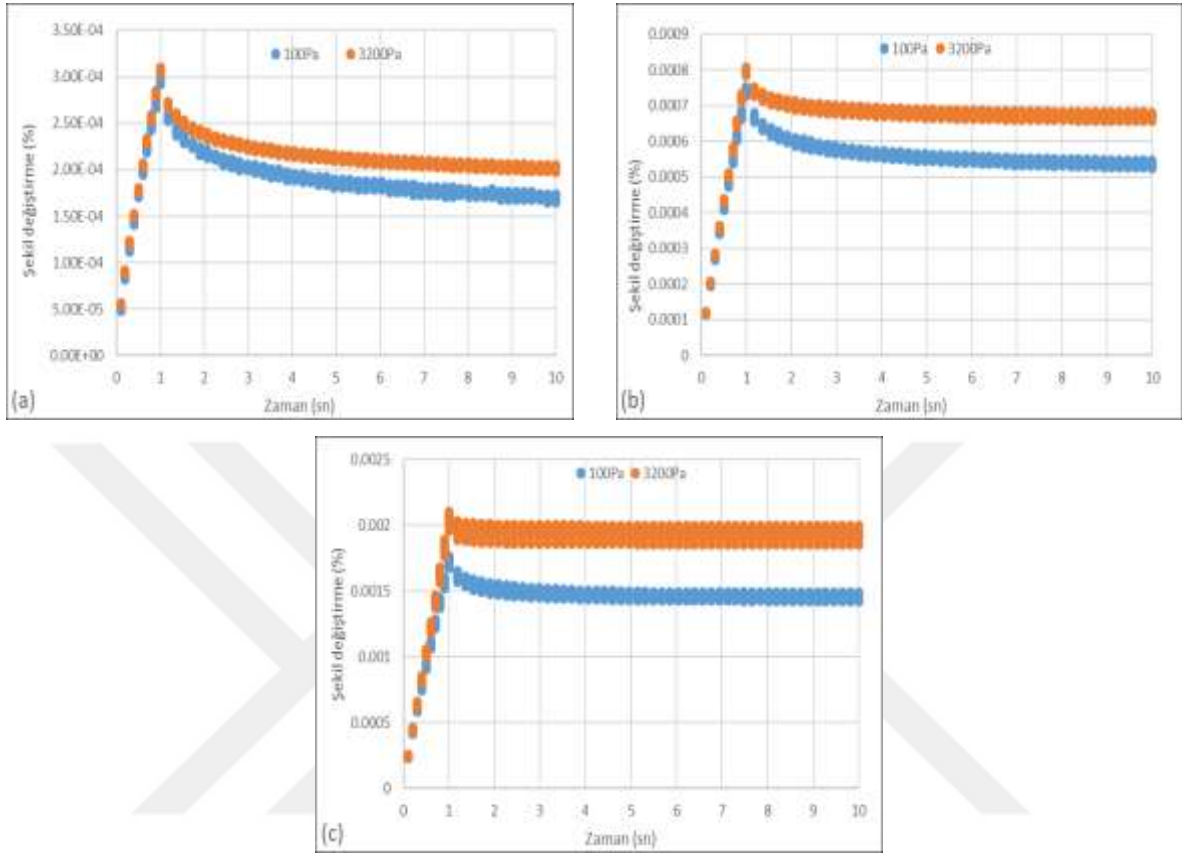


Şekil 6.23. Farklı sıcaklıklarda 3.2 kPa'daki ortalama yüzde geri dönmenin (a), 0.1kPa'daki ortalama yüzde geri dönmenin (b), ortalama yüzde geri dönmenin yüzdesel farklılığındaki değişim (c)

Tablo 6.9. PG ve MSCR testine göre performans seviyeleri

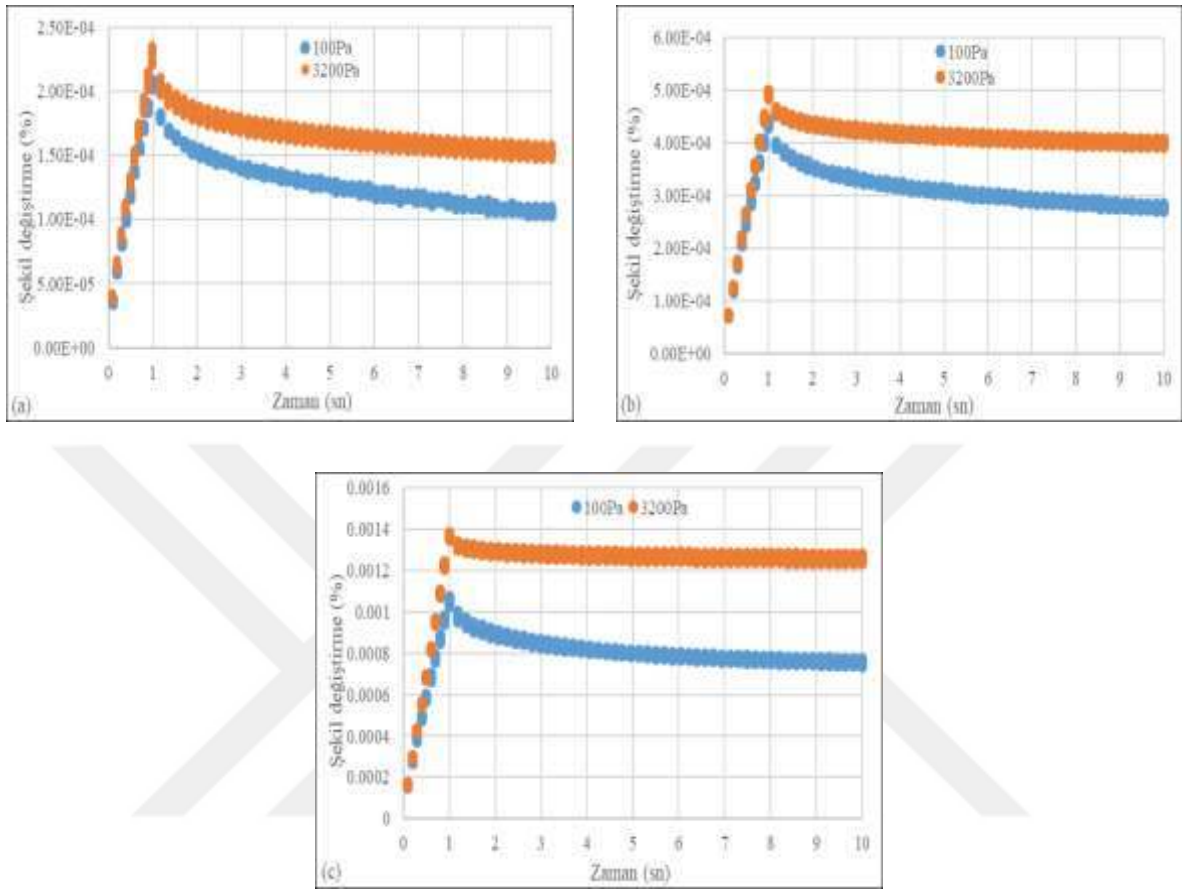
Bağlayıcı Tipi	Seviye seçimi			
	PG sistemi	MSCR sistemi		
Saf	58-22	52E-22	58V-22	
%10T	64-22	52E-22	58E-22	64H-22
%15C	64-22	52E-22	58E-22	
%15K	64-22	52E-22	58E-22	

Şekil 6.24'de saf ve modifiye bağlayıcıların 52, 58 ve 64 °C'deki şekil değiştirme zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 6.24'e göre bağlayıcının sıcaklığı yüksek sıcaklık performans derecesine (PG seviyesine) yaklaştıkça her iki gerilme seviyesinde kalıcı deformasyonun arttığı belirlenmiştir. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla 0.1 kPa ile 3.2 kPa gerilme seviyesi arasındaki şekil değiştirme oranı artmaktadır.



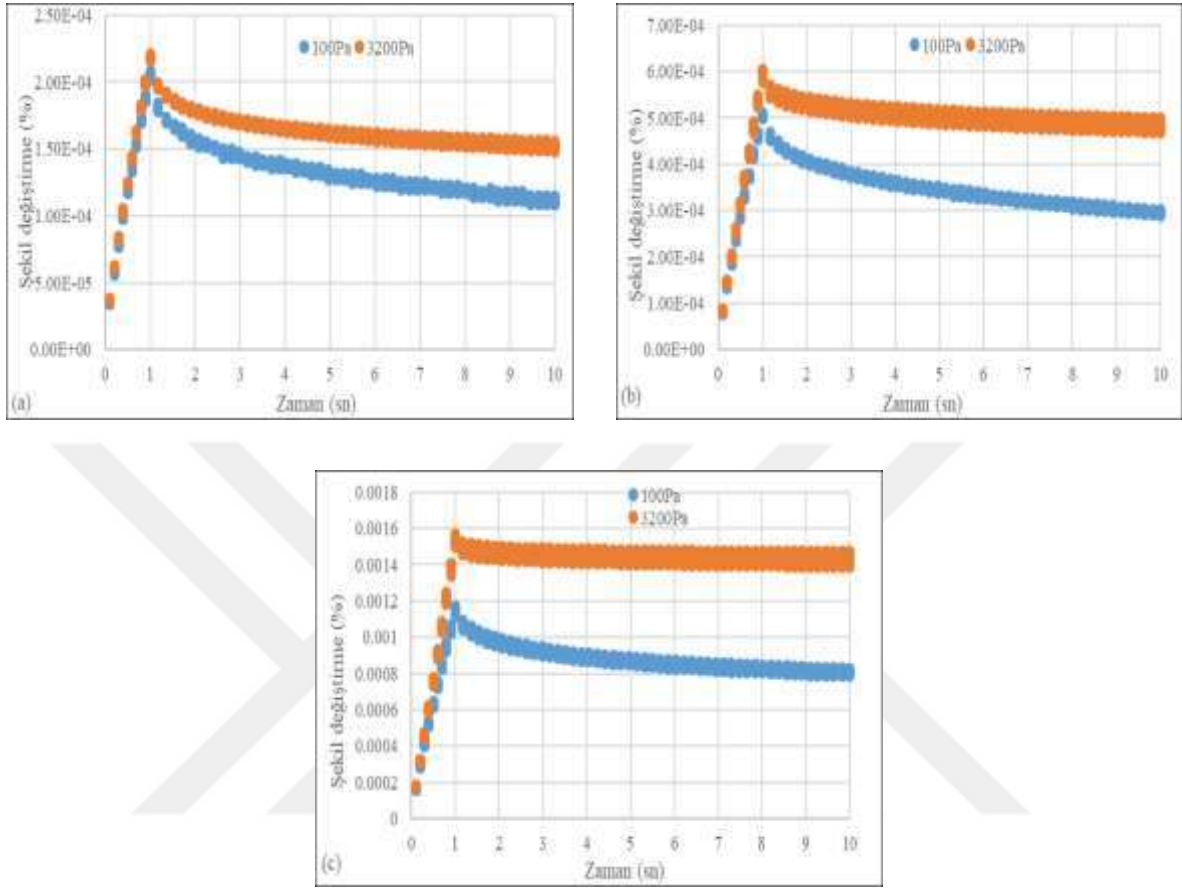
Şekil 6.24. Saf bağlayıcının 52°C (a), 58°C (b), 64°C (c) sıcaklıktaki şekil değiştirme-zaman grafiği

Şekil 6.25'e göre %10T ile modifiye edilmiş bağlayıcının sıcaklık artışıyla gerilme altında şekil değiştirmesi artarken geri dönme yüzdesinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca 100 Pa ile 3200 Pa gerilme seviyelerindeki şekil değiştirme arasındaki farklar 52, 58 ve 64 °C sıcaklıklarda sırasıyla 45, 43.5 ve 51.8 kat olmaktadır. Bağlayıcının PG seviyesine yaklaştıkça şekil değiştirmedeki geri dönme azalmaktadır.



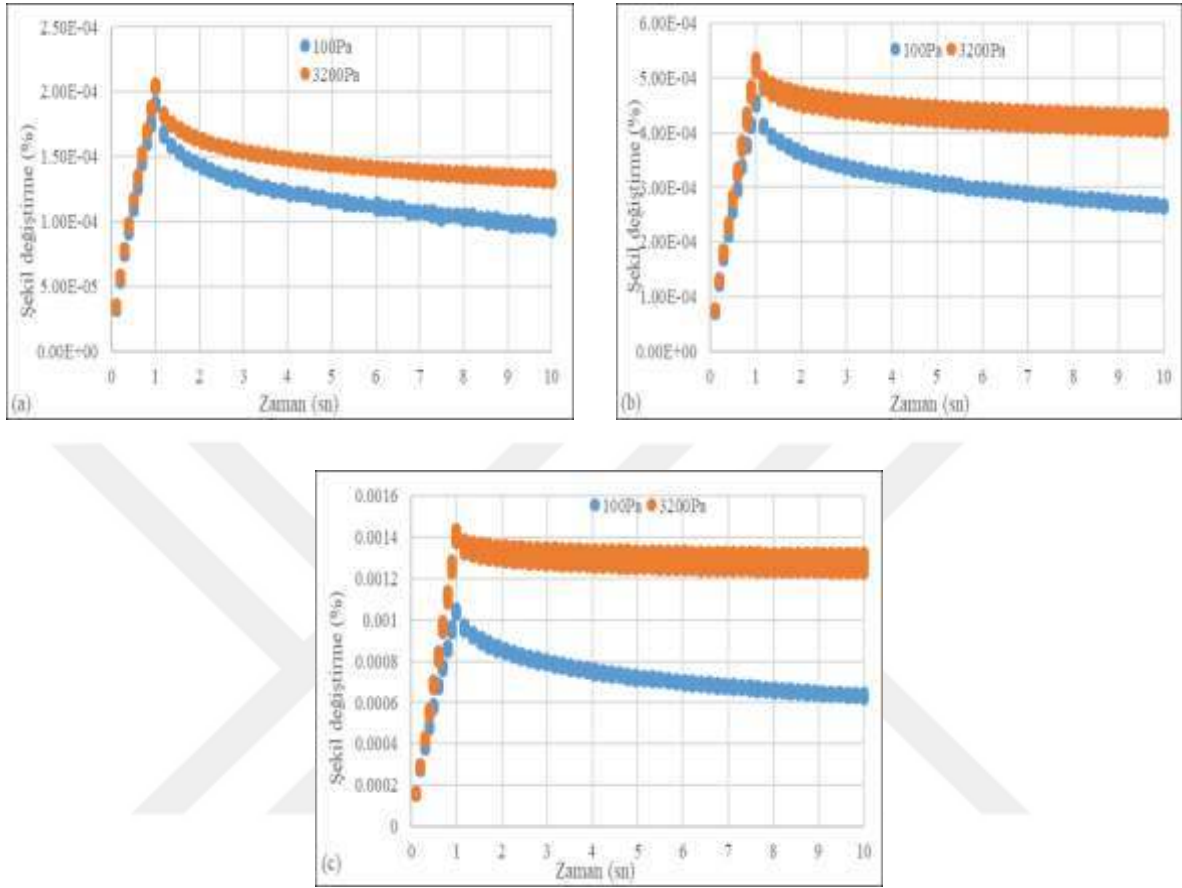
Şekil 6.25. %10T modifiyeli bağlayıcının 52°C (a), 58°C (b), 64°C (c) sıcaklıktaki şekil değiştirme-zaman grafiği

Şekil 6.26'ya göre %15C ile modifiye edilmiş bağlayıcının sıcaklık artışıyla gerilme altında şekil değiştirmesi artarken geri dönme yüzdesinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca 100 Pa ile 3200 Pa gerilme seviyelerindeki şekil değiştirme arasındaki farklar 52, 58 ve 64 °C sıcaklıklarda sırasıyla 43.5, 49.8 ve 53.3 kat olduğu belirlenmiştir. Bağlayıcının PG seviyesine yaklaştıkça şekil değiştirmedeki geri dönme azalmaktadır.



Şekil 6.26. %15C modifyeli bağlayıcının 52°C (a) ,58°C (b), 64°C (c) sıcaklıktaki şekil değiştirme-zaman grafiği

Şekil 6.27'ye göre %15K ile modifiye edilmiş bağlayıcının sıcaklık artışıyla gerilme altında şekil değiştirmesi artarken geri dönme yüzdesinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca 100 Pa ile 3200 Pa gerilme seviyelerindeki şekil değiştirme arasındaki farklar 52, 58 ve 64 °C sıcaklıklarda sırasıyla 43.1, 46.8 ve 61.2 kat olduğu belirlenmiştir. Bağlayıcının PG seviyesine yaklaştıkça şekil değiştirmedeki geri dönme azalmaktadır.



Şekil 6.27. %15K modifiyeli bağlayıcının 52°C (a), 58°C (b), 64°C (c) sıcaklıktaki şekil değiştirme-zaman grafiği

MSCR testinin ayrıntılı sonuçları Tablo 6.10'da verilmiştir.

Tablo 6.10. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların MSCR testinden elde edilen sonuçları

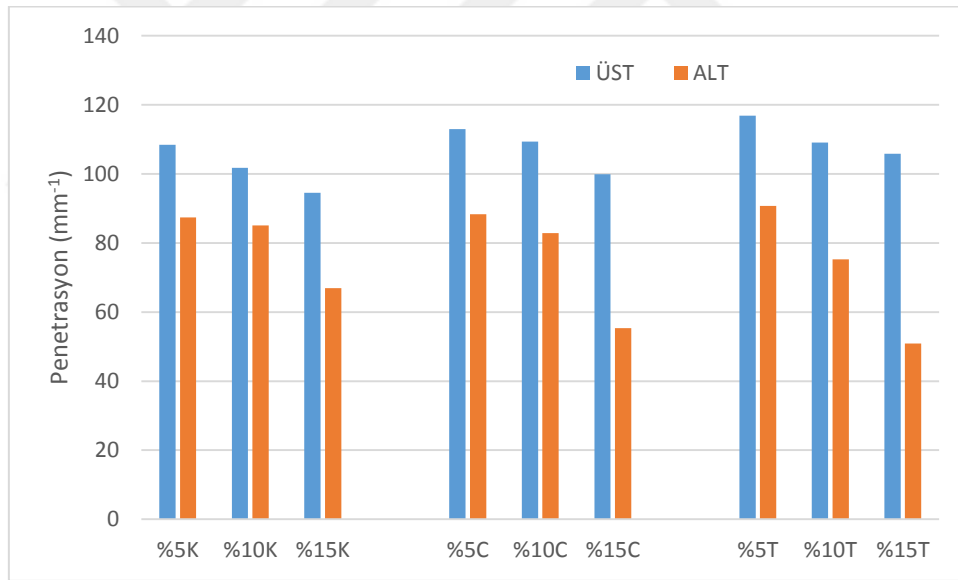
Bağlayıcı Tipi (Test Sıcaklığı (°C))	Ortalama yüzdesel geri dönme (%)		Jnr (1/kPa)		Yüzdesel fark (%)	Seviye
	0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa		
Saf (52)	42,3072	34,4544	0,1707	0,201	17,7811	52E
Saf (58)	27,3155	8,2640	0,5372	0,6723	25,1547	58V
Saf (64)	20,0005	4,9953	1,4508	1,9405	33,7559	64H
%10T (52)	48,4972	34,0000	0,1052	0,1290	22,6119	52E
%10T (58)	36,8219	18,748	0,2751	0,4003	45,5319	58E
%10T (64)	28,3749	7,6520	0,7524	1,2664	68,3309	64H
%15C (52)	45,5083	30,7937	0,1116	0,1511	35,4045	52E
%15C (58)	41,3372	17,9934	0,2956	0,4884	65,2204	58E
%15C (64)	29,1207	6,4530	0,8077	1,4411	78,4067	-
%15K (52)	49,8525	34,9724	0,0959	0,1329	38,5865	52E
%15K (58)	41,2817	19,9407	0,2655	0,4218	58,8568	58E
%15K (64)	39,3835	9,0067	0,6322	1,2808	102,5914	-

6.4.6. Depolama Stabilitesi Deney Sonuçları

Çalışmanın depolama stabilitesi ve sonrasındaki kısmında bitüm ağırlığınca %5, %10 ve %15 oranlarında öğütülmüş ceviz kabuğu, öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğu ve talaşının pirolizinden elde edilen biyoçarlar kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmış ve EN 13399 standardına uygun olarak depolama stabilitesi deneyine tabi tutulmuştur [122]. Depolama stabilitesi deneyi sonrası elde edilen numuneler üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve dinamik kayma reometresi deneyleri uygulanmıştır.

Depolama Stabilitesi Sonrası Penetrasyon Deney Sonuçları

Biyoçar modifiyeli bağlayıcılara uygulanan depolama stabilitesi deneyleri sonucunda elde edilen numunelerin penetrasyon deney sonuçları Şekil 6.28’de görülmektedir.



Şekil 6.28. Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon deney sonuçları

Şekil 6.28’de görüldüğü üzere bütün biyokütlelerden elde edilen biyoçarların kullanım oranlarının artması ile penetrasyon değerleri azalmış dolayısıyla bağlayıcıların kıvamları artmıştır. Tüplerin üst kısmından elde edilen numunelerin penetrasyon değerlerinin tüplerin alt kısmından elde edilen numunelere göre daha yüksek penetrasyon değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu duruma katkıların tüplerin alt kısmına çökmesi neden olmuştur.

Tüplerin üst kısmından elde edilen numuneler arasında en yüksek penetrasyon değeri, talaş pirolizinden elde edilen biyoçar modifikasyonu kullanımında, en düşük penetrasyon değerinin ise kayısı çekirdeği kabuğunun pirolizinden elde edilen biyoçar modifikasyonu durumunda gözlenmiştir.

Tüplerin alt kısmından elde edilen numuneler incelendiğinde en yüksek penetrasyon değerlerine %5 katkı içeriğinde talaş biyoçarı modifiyeli bitümlerin, %10 ve %15 katkı içeriklerinde ise kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümlerin sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük penetrasyon değerlerine ise %5 katkı içeriğinde kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümlerin, %10 ve %15 katkı içeriğinde ise talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların sahip olduğu tespit edilmiştir.

Kayısı çekirdeğinden elde edilen biyoçarların bitüm modifikasyonunda kullanılması durumunda %5, %10 ve %15 katkı içeriğinde tüplerin üst kısmından elde edilen numunelerin alt kısımdan elde edilen numunelere göre penetrasyon değerlerinde %19,4; %16,4 ve %29,2 oranlarında azalma meydana gelmiştir.

Ceviz kabuğu biyoçarı kullanılması durumunda %5, %10 ve %15 katkı içeriklerinde %21,9; %24,2 ve %44,7 oranlarında penetrasyon değerlerinde azalış olurken talaşın pirolizinden elde edilen biyoçar kullanılması durumunda %22,4; %31,0 ve %51,9 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlardan katkıların depolama süresince tüplerin alt kısmına çökmesinden ötürü tüplerin alt kısımlarından alınan numunelerin penetrasyon değerlerinin daha düşük çıktığı dolayısıyla tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerin kıvamlarının üst kısma göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

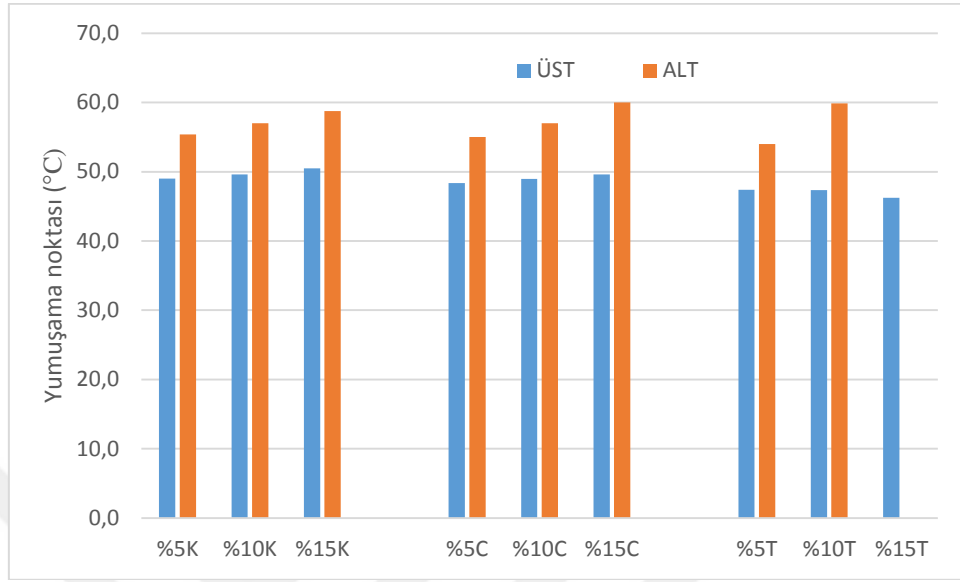
Tüplerin alt ve üst kısmından elde edilen numunelerin penetrasyon değerleri karşılaştırıldığında ceviz kabuğu biyoçarı katkılı bağlayıcıların depolama stabilitesi açısından en kararlı bağlayıcılar olduğu, talaş biyoçarı katkılı bağlayıcıların ise depolama açısından en olumsuz sonuçlara sahip bağlayıcılar olduğu tespit edilmiştir.

Modifiye bitüm gereksinimlerini içeren EN 14023 [174] standardına göre tüplerin alt ve üst kısmından elde edilen numunelerin penetrasyon değerleri farkı en fazla 13 mm^{-1} olmalıdır.

Elde edilen sonuçlar şartname limitleri ile karşılaştırıldığında biyoçar modifiyeli bitümlerin şartname gereksinimini karşılamadığı belirlenmiştir.

Depolama Stabilitesi Sonrası Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Farklı modifiye bitümler üzerinde uygulanan depolama stabilitesi deneyleri sonucunda elde edilen yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 6.29'da verilmiştir. %15 Talaş modifiyeli bitümde depolamadan ötürü biyoçarda aşırı çökme meydana geldiğinden bu numuneler akıcı hale getirilememiştir. Bu nedenle bu numunelere yumuşama noktası ve viskozite deneyleri uygulanamamıştır.



Şekil 6.29. Depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası deney sonuçları

Şekil 6.29’da görüldüğü üzere tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerin yumuşama noktası değerleri tüplerin üst kısmından elde edilen numunelerin yumuşama noktası değerlerinden yüksek çıkmıştır. Bu duruma katkı depolamadan ötürü biyoçarların tüplerin alt kısmına çökmesi neden olmuştur. Talaş biyoçarı içeren modifiye bitümlerde %15 içeriğinde tüpün alt kısmından numune alınamaması, özellikle talaş biyoçarı kullanılması durumunda depolama açısından olumsuzluk oluştuğunu göstermektedir.

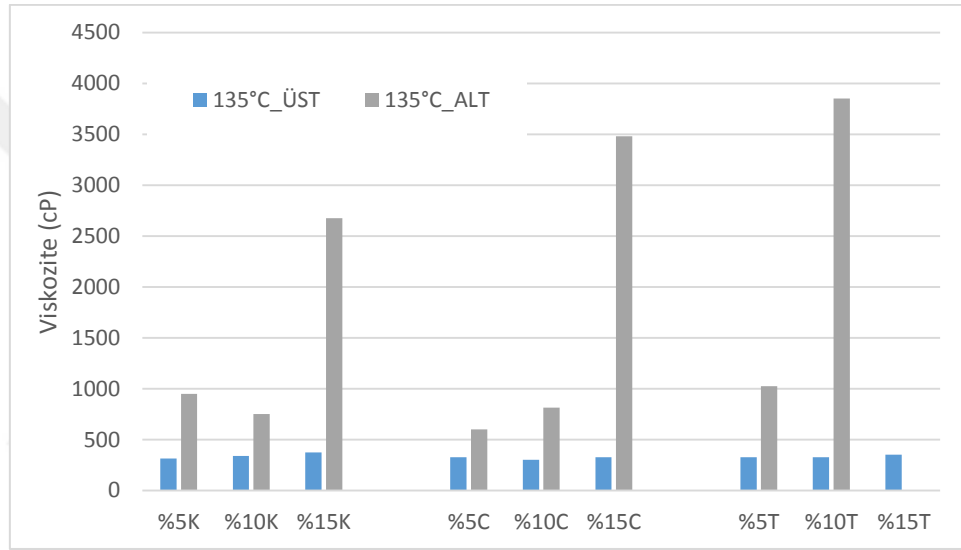
Kayısı çekirdeği biyoçarından %5; %10 ve %15 oranlarında kullanılması durumunda tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerde üst kısımdan elde edilen numunelere göre yumuşama noktası değerlerinde %13,1; %14,9 ve %16,3 oranlarında artış meydana gelmiştir.

Ceviz kabuğu biyoçarı ile modifiye edilen bitümlerin depolama stabilitesi deneyleri sonucunda tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerde üst kısımdan elde edilen numunelere göre yumuşama noktası değerlerinde %13,8; %16,4 ve %21,0 oranlarında artış meydana gelirken talaş biyoçarı içeren bağlayıcılarda %5 ve %10 katkı içeriğinde artış %13,9 ve %26,4 olmuştur.

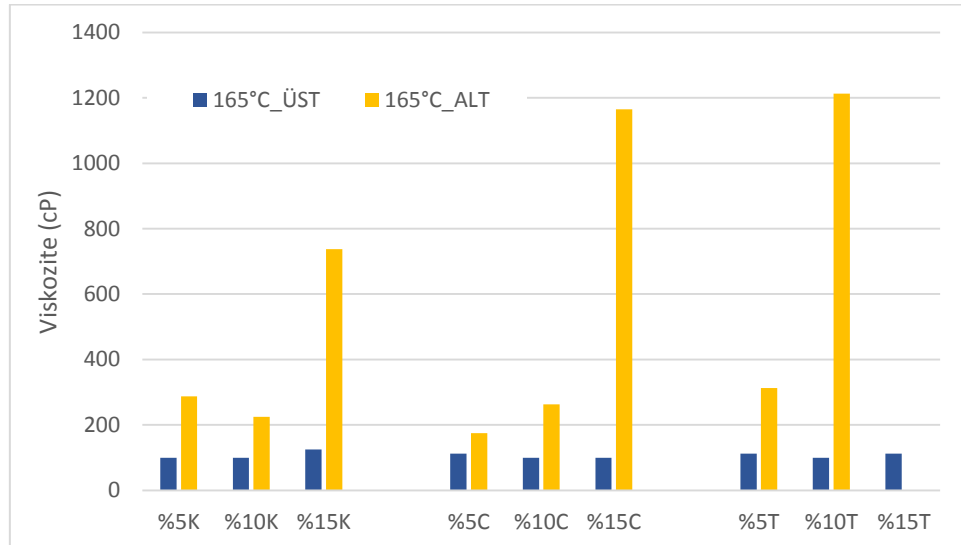
Elde edilen sonuçlardan depolama stabilitesi açısından en olumlu katkının kayısı çekirdeği biyoçarı olduğu, en olumsuz katkının ise talaş biyoçarı olduğu belirlenmiştir. EN 14023 [174] standardına göre tüplerin alt ve üst kısmından elde edilen numunelerin yumuşama noktası değerleri farkı en fazla 5°C olmalıdır. Bağlayıcıların hiçbiri depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası şartname gereksinimini sağlayamamıştır.

Depolama Stabilitesi Sonrası Viskozite Deney Sonuçları

Farklı modifiye bitümler üzerinde uygulanan depolama stabilitesi deneyleri sonucunda elde edilen numunelerin 135°C sıcaklıktaki dönel viskozite deney sonuçları Şekil 6.30'da, 165°C sıcaklıktaki dönel viskozite deney sonuçları ise Şekil 6.31'de verilmiştir. %15 oranında talaş biyoçarı içeren bağlayıcıda depolama stabilitesi deneyi sonrası biyoçar tüpün altında biriktiğinden bu kısım akıcı hale getirilerek viskozite deneyi uygulanamamıştır.



Şekil 6.30. Depolama stabilitesi tüplerinden elde edilen bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite deney sonuçları



Şekil 6.31. Depolama stabilitesi tüplerinden elde edilen bağlayıcıların 165°C sıcaklıktaki viskozite deney sonuçları

Şekil 6.30 ve Şekil 6.31’de görüldüğü üzere depolama stabilitesi deneyi sonrası tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerin viskozite deney sonuçları tüplerin üst kısmından elde edilen numunelerin viskozite değerlerinden yüksek çıkmıştır. Bu duruma, depolama stabilitesi deneyi süresince kullanılan katkıların tüplerin alt tarafına çökmesi neden olmuştur.

Kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyi sonrası tüplerin alt ve üstleri arasındaki viskozite değerleri farkları değerlendirildiğinde 135°C sıcaklıkta %5 modifiyeli bitümde 3,04 kat; %10 modifiyeli bitümde 2,22 ve %15 modifiyeli bitümde 7,13 kat fark olduğu belirlenmiştir. 165°C sıcaklıkta ise %5, %10 ve %15 oranında katkı kullanılması durumunda 2,88; 2,25 ve 5,90 kat fark meydana gelmiştir.

Ceviz kabuğu biyoçarı katkılı bağlayıcılar değerlendirildiğinde depolama stabilitesi deneyi sonrası tüplerin alt ve üst kısımlarından elde edilen numunelerin dönel viskozite deney sonuçları arasında %5 biyoçar içeriğinde 135°C sıcaklıkta 1,85 kat, 165°C sıcaklıkta ise 1,56 kat; %10 biyoçar içeriğinde 135°C sıcaklıkta 2,71 kat, 165°C sıcaklıkta ise 2,65 kat; %15 katkı içeriğinde ise 135°C sıcaklıkta 10,71 kat, 165°C sıcaklıkta ise 11,65 kat artış meydana gelmiştir. Buna göre katkı içeriği arttıkça depolama stabilitesi deneyinde tüplerin alt ve üst kısımları arasındaki fark artmıştır.

Talaş biyoçarı katkılı bağlayıcıların depolama stabilitesi sonrası viskozite sonuçları değerlendirildiğinde tüplerin alt ve üst kısımlarından elde edilen numuneler arasında, %5 biyoçar içeriğinde 135°C sıcaklıkta 3,15 kat, 165°C sıcaklıkta ise 2,78 kat; %10 biyoçar içeriğinde 135°C sıcaklıkta 11,85 kat, 165°C sıcaklıkta ise 12,13 kat fark oluşmuştur. %15 katkı içeriğinde tüpün alt kısmından elde edilen numuneye deney uygulanamadığından karşılaştırma yapılamamıştır. Bu sonuç en fazla ayrışmanın %15 talaş biyoçarı katkılı bağlayıcılarda olduğunu göstermektedir.

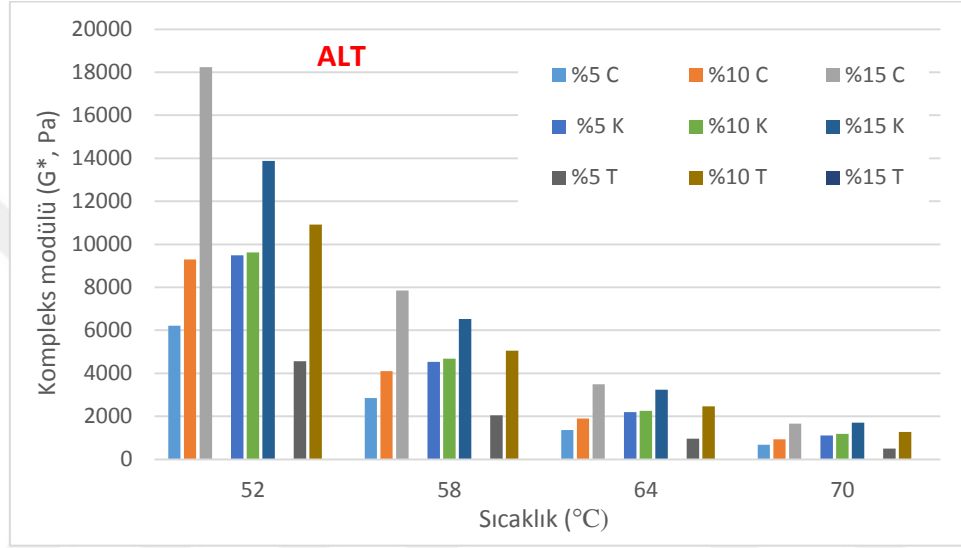
Elde edilen viskozite sonuçlarından depolama stabilitesi deneyi açısından en olumlu katkının %5 katkı içeriğinde ceviz kabuğu biyoçarı olduğunu, %10 ve %15 katkı içeriğinde ise kayısı çekirdeği biyoçarı olduğunu göstermiştir. Depolama stabilitesi deneyi sonrası viskozite deneyi açısından en olumsuz katkının ise talaş biyoçarı olduğu belirlenmiştir.

Sıcaklığın 135°C’den 165°C sıcaklığa yükselmesi ile viskozite değerleri önemli oranda düşmüştür. Bağlayıcıların viskozite değerlerinin sıcaklığın 135°C’den 165°C sıcaklığa yükselmesi ile bütün bağlayıcılarda yaklaşık 3 kat azalma meydana geldiğini göstermiş olup, olumlu veya olumsuz yönden farklı sonuç veren herhangi bir bağlayıcı olmadığı belirlenmiştir.

Depolama Stabilitesi Sonrası Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları

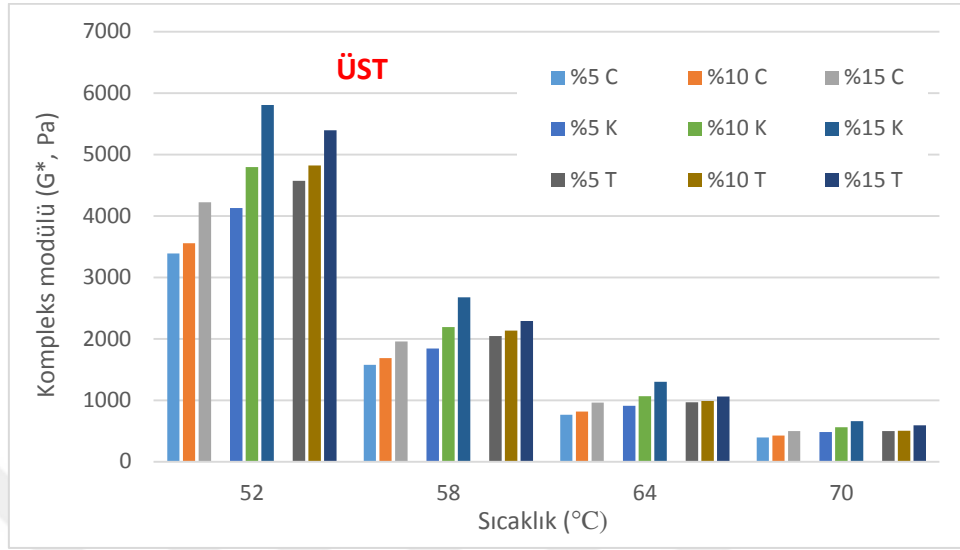
Çalışmada tüplerin alt ve üst kısımlarından elde edilen numuneler üzerinde 10 rad/s (1,59 Hz) frekansta ve 4 farklı sıcaklıkta (52, 58, 64 ve 70°C) ve 10 ayrı frekansta DSR deneyi uygulanmıştır.

1,59 Hz frekans değeri 90 km/sa taşıt hızına karşılık geldiği için tercih edilmiştir. Farklı bağlayıcılara uygulanan depolama stabilitesi deneyleri sonucunda elde edilen numunelerin DSR deney sonuçları Şekil 6.32-6.33’de verilmiştir. %15 talaş biyoçarı modifiyeli bitümün depolama stabilitesi sonrası tüplerin altından numune elde edilemediği için deney yapılamamıştır.



Şekil 6.32. Depolama stabilitesi tüplerinin alt kısmınlarından elde edilen numunelerin G* değerleri

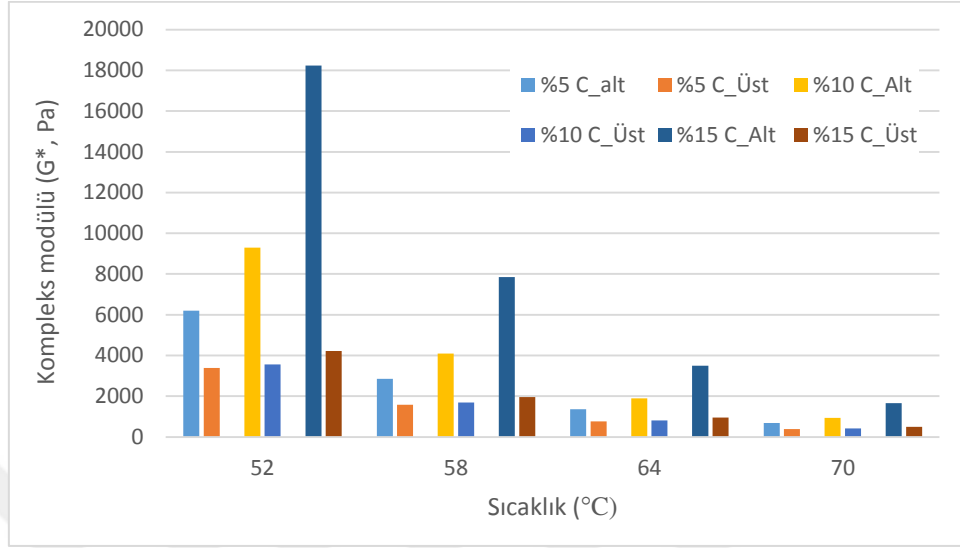
Şekil 6.32’de görüldüğü üzere katkı içeriğinin artması ile G* değerleri artmıştır. %5 katkı içeriğinde bütün sıcaklıklarda en yüksek değere kayısı çekirdeği pirolizinden elde edilen biyoçar modifiyeli bağlayıcıdan elde edilen numunenin, %10 katkı içeriğinde ise talaş biyoçarı modifiyeli bitümlerden elde edilen numunelerin sahip olduğu belirlenmiştir. %15 katkı içeriğinde kayısı çekirdeği ve ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümlerin depolama stabilitesi sonrası tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerin G* değerleri karşılaştırıldığında %15 C numunesinin daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.33. Depolama stabilitesi tüplerinin üst kısmından elde edilen numunelerin G^* değerleri

Şekil 6.33’de görüldüğü üzere tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerde olduğu gibi tüplerin üst kısımlarından elde edilen numunelerde de katkı içeriği arttıkça bütün sıcaklıklarda G^* değerleri artmıştır. Bütün katkı içeriklerinde ve bütün sıcaklıklarda en yüksek değerlere talaş pirolizinden elde edilen biyoçar katkılı bağlayıcılardan elde edilen numunelerin, en düşük değerlere ise ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcılardan elde edilen numunelerin sahip olduğu belirlenmiştir.

Ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcılara uygulanan depolama stabilitesi deneyi sonrası tüplerden elde edilen numunelerin G^* değerleri Şekil 6.34’de, kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcılara uygulanan depolama stabilitesi deneyi sonrası tüplerden elde edilen numunelerin G^* değerleri Şekil 6.35’de, talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcılara uygulanan depolama stabilitesi deneyi sonrası tüplerden elde edilen numunelerin G^* değerleri ise Şekil 6.35’de görülmektedir.

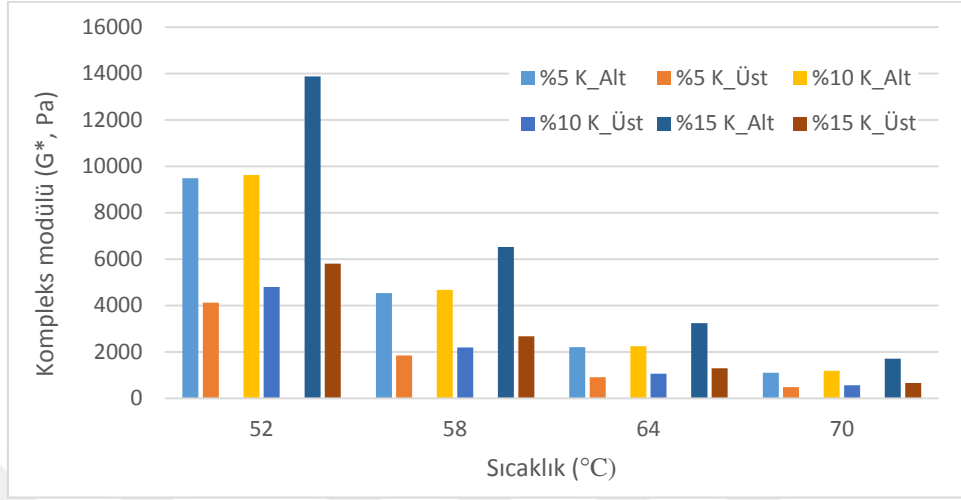


Şekil 6.34. Ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi sonrası G^* değerleri

Şekil 6.34’de görüldüğü üzere sıcaklığın artması ile G^* değerleri azalırken katkı içeriğinin artması ile bu değerler yükselmiştir. Katkı maddeleri depolama stabilitesi deneyi süresince tüplerin alt kısmına çöktüğünden tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerin G^* değerleri tüplerin üst kısmına göre daha yüksek çıkmıştır.

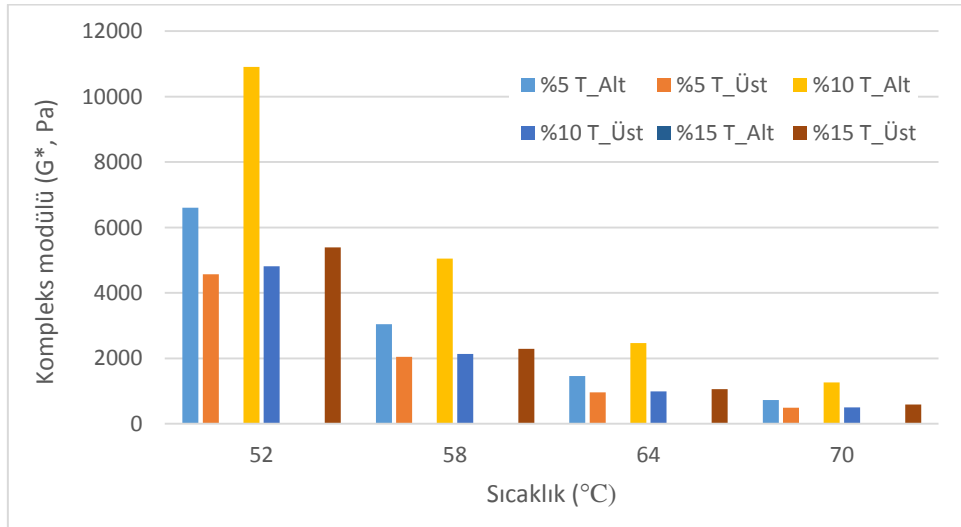
Ceviz kabuğu biyoçarının %5 oranında kullanıldığı modifiye bitümlerde depolama stabilitesi deneyi sonrası tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerin G^* değerleri tüplerin üst kısmından elde edilen numunelerin G^* değerlerinden bütün sıcaklıklarda yaklaşık 1,8 kat daha yüksek çıkmıştır. %10 katkı içeriğinde yaklaşık 2,4 kat, %15 katkı içeriğinde ise ortalama 3,8 kat G^* değerlerinde fark meydana gelmiştir.

Bu durum ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümlerde katkı içeriğinin artması ile depolama nedeniyle daha fazla ayrışma meydana geleceğini göstermektedir.



Şekil 6.35. Kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi sonrası G^* değerleri

Şekil 6.35 incelendiğinde Şekil 6.34’de olduğu gibi katkı içeriğinin artması ile G^* değerleri artarken sıcaklığın artması ile bu değer azalmıştır. Depolama stabilitesi deneyi sonrası katkı maddeleri tüpün alt kısmında toplandığından tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerin deney sonuçları tüplerin üst kısmından elde edilen numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Ceviz kabuğu biyoçarından %5 oranında bitüm modifikasyonunda kullanılması durumunda depolama stabilitesi deneyi sonrası tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerin G^* değerleri tüplerin üst kısmına göre bütün sıcaklıklarda ortalama 2,4 kat artmıştır. %10 katkı içeriğinde bu fark 2,1 kat olurken %15 katkı içeriğinde ise bu fark 2,5 kat olmuştur.



Şekil 6.36. Talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi sonrası G^* değerleri

Şekil 6.36’da görüldüğü üzere tüplerin üst kısmından elde edilen numunelerin G^* değerleri tüplerin alt kısmında elde edilen numunelerden düşük çıkmıştır. Bu duruma diğer katkılarda olduğu gibi katkıların depolama stabilitesi deneyi süresince tüplerin altında birikmesi neden olmuştur. %15 katkı içeriğinde tüplerin alt kısmından numune alınamaması çalışmada kullanılan bağlayıcılar içerisinde en olumsuz sonuca bu bağlayıcının sahip olduğunu göstermektedir. %5 oranında talaş atığı içeren modifiye bitümün depolama stabilitesi deneyi sonrası tüplerin alt kısmından elde edilen numunelerin G^* değerlerinin tüplerin üst kısmından elde edilen numunelerin G^* değerlerine göre ortalama 1,5 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. %10 katkı içeriğinde bu oran ortalama 2,4 kat olmuştur.

Bütün DSR deney sonuçları karşılaştırıldığında, depolama stabilitesi açısından en olumsuz duruma %5 katkı içeriğinde kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların, %10 ve %15 katkı içeriklerinde ise talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların sahip olduğu tespit edilmiştir. Depolama stabilitesi açısından en olumlu duruma ise %5 katkı içeriğinde talaş atığı katkılı bağlayıcıların %10 ve %15 katkı içeriğinde ise kayısı çekirdeği kabuğu modifiyeli bağlayıcıların sahip olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlardan düşük oranlarda talaş biyoçarı kullanılması durumunda depolama açısından uyum gözlenirken modifikasyondaki talaş atığı oranının artması ile depolama durumunda önemli miktarda ayrışmalar meydana geldiği söylenebilmektedir. Kayısı çekirdeği kabuğu kullanılması durumunda ise düşük oranlarda bitüm katkı malzemesi olarak kullanılması durumunda depolama açısından düşük uyum gözlenirken yüksek oranlarda kullanılması durumunda depolama açısından çalışmada kullanılan diğer katkı maddelerine göre depolama açısından daha yüksek uyum gözlenmiştir.

6.5. Superpave Yöntemine Göre Karışımların Tasarım Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi

Superpave tasarım yönteminde trafik hacimlerine göre Seviye 1, Seviye 2 ve Seviye 3 olmak üzere üç farklı prosedür değerlendirilmektedir. Seviye 1 tasarım yöntemi en düşük kritere sahip olup bu yöntemde nem hasarına karşı dayanıklılık deneyi ve hacimsel karışım tasarım yöntemi yer almaktadır. Diğer iki seviye yöntemine göre hacimsel tasarım temel prosedür olarak yer almakta olup hacimsel tasarım yapılırken agrega ve bitümün özgül ağırlıklarının doğru şekilde tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Agregaların özgül ağırlıkları; zahiri (G_{sa}), hacim (G_{sb}) ve efektif özgül ağırlık (G_{se}) olmak üzere üçe ayrılmaktadır;

Zahiri özgül ağırlık (G_{sa}), standart sıcaklıkta birim hacimdeki boşluksuz malzemenin havadaki ağırlığının standart sıcaklıktaki ve aynı hacimdeki saf suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır.

Hacim özgül ağırlık (Gsb); standart sıcaklıkta bütün boşluklar dahil olarak malzemenin birim hacimdeki havadaki ağırlığının standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki saf suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Efektif özgül ağırlık (Gse) ise standart sıcaklıkta, bağlayıcının giremediği suyun girebildiği boşluklar dahil olarak malzemenin birim hacimdeki havadaki ağırlığının standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki saf suyun ağırlığına oranıdır.

Özgül ağırlık değerlerinin değişiminde dikkate alınan boşluklar yani hacim değerleri etkili olmaktadır. Hacim değerleri arttıkça özgül ağırlık değerleri azalmaktadır. Dikkate alınan hacim değerlerine bağlı olarak özgül ağırlık değerleri arasında $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$ şeklinde bir ilişki söz konusudur. Bitümlü sıcak karışımların (BSK) Superpave yöntemine göre hacimsel tasarımında maksimum teorik özgül ağırlık (Gmm) ve hacim özgül ağırlık (Gmb) değerleri kullanılmaktadır.

Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (Gmm); standart bir sıcaklıkta, boşluksuz bitümlü sıcak karışımın havadaki ağırlığının standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki saf suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Maksimum teorik özgül ağırlık değeri AASHTO T209 [175] standardıyla belirlenmekte olup BSK'daki hava boşluğu miktarının ve yapım süresince kaplamanın sıkıştırılması için hedef yoğunluk değerinin hesaplanmasını sağlamaktadır.

Hacim Özgül Ağırlık (Gmb); standart bir sıcaklıkta, boşluklu bitümlü sıcak karışımın birim hacminin standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki saf suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır.

Tez çalışmasında agrega gradasyonu Superpave tasarım yöntemine uygun olarak maksimum dane boyutu 19 mm ve nominal maksimum dane boyutu 12,5 mm olan agregalar için tavsiye edilen kontrol noktaları ve yasaklanmış bölge noktaları baz alınarak seçilmiştir. Seçilen agrega gradasyonuna uygun olarak ince ve kaba agrega numuneleri hazırlanmış, zahiri ve hacim özgül ağırlık değerleri, filler malzemenin zahiri özgül ağırlığı belirlenmiştir. Agregaların özgül ağırlıkları Tablo 6.11'de verilmiştir.

Tablo 6.11. Agrega özgül ağırlıkları

	Agrega karışımdaki oran (%)	Hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	Zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)
Kaba	35	2,543	2,620
İnce	60	2,558	2,643
Filler	5	-	2,670

Tablo 6.11' de verilen kaba, ince ve filler agregalarının özgül ağırlıkları ve ağırlıkça yüzdeleri kullanılarak agrega karışımının zahiri (Gsa) ve hacim (Gsb) özgül ağırlığı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Fillerin malzemenin hacim özgül ağırlığı tespit edilemediğinden zahiri özgül ağırlık değeri kullanılmıştır.

$$G_{sb}, G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (6.3)$$

P_1, P_2, P_N : Her bir agreganın ağırlıkça yüzdesi,

G_1, G_2, G_N : Her bir agreganın hacim ve zahiri özgül ağırlığı.

$$G_{sa} = \frac{100}{\frac{35}{2,620} + \frac{60}{2,643} + \frac{5}{2,670}} = 2,636 \text{ gr/cm}^3, G_{sb} = \frac{100}{\frac{35}{2,543} + \frac{60}{2,558} + \frac{5}{2,670}} = 2,558 \text{ gr/cm}^3$$

6.5.1. PG 58-28 sınıfı Bağlayıcı ile Hazırlanan Sıcak Karışımların Tasarım Bitüm İçeriğinin Tespit Edilmesi

Deneysel çalışmada bitümlü sıcak karışımlarda kullanılacak saf ve 3 farklı modifiye bağlayıcı için tasarım bitüm içerikleri belirlemiş olup bu kısımda sadece PG 58-28 sınıfı bitümle hazırlanan karışımların tasarım bitüm içeriklerinin hesaplanması örnek olarak detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Diğer modifiye bağlayıcılara ait tasarım bitüm içerikleri de aynı şekilde bulunmuştur.

Agregaların özgül ağırlıkları belirlendikten sonra ilk olarak başlangıç bitüm içeriği (P_{bi}) belirlenmektedir. Başlangıç bitüm içeriğinin (P_{bi}) belirlenmesi için öncelikle agregalar karışımının efektif özgül ağırlığının (G_{se}) tespit edilmesi gerekmektedir. Agregalar efektif özgül ağırlığı ise karışımın efektif özgül ağırlığından faydalanan belirlenmektedir. Fakat tasarım aşamasında öncelikle aşağıdaki denklemle yakın bir değer belirlenmekte ve kullanılmaktadır. Bu denklem de, su absorpsiyonuna bağlı olarak katsayı değişmekle birlikte hesapta 0,5 olarak alınmıştır. Bu katsayı absorpsiyonu yüksek olan agregalarda 0,6 veya 0,5'e kadar azaltılmaktadır.

$$G_{se} = G_{sb} + 0,5 \times (G_{sa} - G_{sb}) \quad (6.4)$$

$$G_{se} = 2,558 + 0,5 \times (2,636 - 2,558) = 2,597 \text{ gr/cm}^3$$

Daha sonra agregalar tarafından absorbe edilecek olan bitümlü bağlayıcı hacmi (V_{ba}), hava boşluğu %4 olarak kabul edilip aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır.

$$V_{ba} = \frac{P_s \times (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}\right)} \times \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right) \quad (6.5)$$

V_{ba} : Absorbe edilen bitümlü bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm^3/cm^3)

P_b : Bağlayıcı yüzdesi

P_s : Agregalar yüzdesi

Gb: Bağlayıcının özgül ağırlığı

Va: Hava boşluğu hacmi.

$$V_{ba} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,031} + \frac{0,95}{2,597}\right)} \times \left(\frac{1}{2,558} - \frac{1}{2,597}\right) = 0,0129 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Karışımının efektif bağlayıcı hacmi (Vbe) ise aşağıdaki denklem ile belirlenmiştir.

$$Vbe = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(Sn) \quad (6.6)$$

Vbe: Efektiv bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm^3/cm^3),

Sn: Agregada karışımındaki nominal maksimum elek boyutu (mm).

$$Vbe = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(12,5) = 0,102 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

En son işlem sırasında, başlangıç deneme bitümlü bağlayıcı içeriği (Pbi) aşağıdaki denklemler yardımıyla belirlenmiştir.

$$Ws = \frac{Ps \times (1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}\right)} \quad (6.7)$$

$$Pbi = \frac{Gb \times (Vbe + Vba)}{(Gb \times (Vbe + Vba)) + Ws} \times 100 \quad (6.8)$$

Pbi: Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi,

Ws: Agreganın ağırlığı (gr).

$$Ws = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,031} + \frac{0,95}{2,597}\right)} = 2,201 \text{ gr}$$

$$P_{bi} = \frac{1,031 \times (0,102 + 0,0083)}{(1,024 \times (0,102 + 0,0129)) + 2,201} \times 100 = \% 5,107$$

Karışım ağırlığına hesaplanan başlangıç bağlayıcı içeriği (P_{bi}) kullanılarak, toplam agregada ağırlığına kullanılacak bağlayıcı miktarı (W_b) aşağıdaki denklem e göre hesaplanmıştır. Karışımların hazırlanmasında 100 mm çapındaki silindirik kalıp kullanılmış ve bu kalıp için gereken toplam agregada ağırlığı 1100 gr olarak alınmıştır.

$$Wb = \frac{Ws \times Pbi}{100 - Pbi} \quad (6.9)$$

$$W_b = \frac{1100 \times 5,107}{100 - 5,107} = 59,2 \text{ gr}$$

Belirlenen bitüm içeriğinde 4 adet bitümlü sıcak karışım numunesi hazırlanmış bunlardan 2 tanesi sıkıştırılmış 2 tanesi ise maksimum teorik özgül ağırlık değerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanırken saf bağlayıcı (PG 58-28) 2 saat, daha önce belirlenen gradasyona göre hazırlanan agregalar ise 146,5 °C'deki etüvde 3 saat ısıtılmıştır. Etüvden çıkarılan agregalara ısıtılmış saf bağlayıcı hesaplanan ağırlıkta ilave edilerek karıştırıcı yardımıyla agregalar tamamen bitümle sarıncaya kadar 1,5–2 dakika karıştırılmıştır. Elde edilen karışım düz bir tepsiye metrekareye 21–22 kg düşecek şekilde dökülmüş ve önceden 135°C'de ısıtılmış etüve kısa dönem yaşlandırma amacıyla koyularak 4 saat boyunca bekletilmiştir.

Karışımların maksimum teorik özgül ağırlıklarının (Gmm) tespit edilmesi amacıyla 2 adet asfalt karışım numunesi daha yukarıdaki şekilde hazırlanmış ve soğuduktan sonra AASHTO T209 [175] standardına göre karışım numunelerinin maksimum teorik özgül ağırlıkları aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır. Deneme karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlık değerleri Tablo 6.16'da verilmiştir.

$$Gmm=(C-A)/((B-A)-(D-C)) \quad (6.10)$$

Tablo 6.12. Deneme karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları

Maksimum Teorik Özgül Ağırlık, (Gmm)	Numune No	
	1	2
Piknometre, A (gr)	674,88	674,88
Piknometre +Su, B (gr)	2667,18	2667,18
Piknometre +Numune, C (gr)	1826,59	1828,28
Piknometre +Numune+Su, D (gr)	3338,46	3339,84
$Gmm=(C-A)/((B-A)-(D-C))$	2,397	2,399
Ortalama, Gmm	2,398	

Bulunan Gmm değerlerine göre denklem yardımıyla Gse değerleri belirlenmiştir. Hesapla bulunan bu Gse değerleri çalışmanın geri kalan kısmında kullanılmıştır.

$$Gse \text{ (hesap)} = \frac{100 - Pbi}{\left(\frac{100}{Gmm} - \frac{Pbi}{Gb}\right)} \quad (6.11)$$

$$Gse \text{ (hesap)} = \frac{100 - 5,107}{\left(\frac{100}{2,398} - \frac{5,107}{1,031}\right)} = 2,597 \text{ gr/cm}^3$$

Diğer iki karışım numunesi etüvde 4 saat yaşlandırma işlemi sonrası sıkıştırma sıcaklığına (131,35°C) göre önceden ısıtılmış olan etüvde 30 dakika bekletildikten sonra yoğurmalı sıkıştırıcıda sıkıştırılmıştır. Numuneler sıkıştırılmadan yaklaşık 45–60 dakika önce, yoğurmalı sıkıştırıcının, alt ve üst plakalar sıkıştırma sıcaklığına ayarlanmış bir etüvde ısıtılmış ve yoğurmalı sıkıştırıcı ve bilgisayar yazılımı hazırlanmıştır. Sıkıştırma enerjisinin bir fonksiyonu olan yoğurma sayısı; yolun sınıfı ve uygulanan yoldan geçmesi planlanan eşdeğer standart dingil yükü (ESDY) sayısına bağlı olarak AASHTO TP4 [176] standardına göre Tablo 6.13’de görülmektedir. Bu çalışmada kabul edilen 3-10 milyon eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısına göre sıkıştırma parametreleri; Nini = 8, Ndes = 100 ve Nmaks =160 olarak alınmıştır.

Tablo 6.13. Taşıt sayısına göre sıkıştırma parametreleri

Tasarım Trafik (ETDY), milyon	Sıkıştırma Parametreleri			Tipik Karayolu Uygulamaları
	Nini	Ndes	Nmaks	
< 0,3	6	50	75	Çok az trafik kapasiteli yollar
0,3–3	7	75	115	Orta trafikli şehir yolları
3–30	8	100	160	Yüksek trafikli şehir yolları ile çift yönlü, çok şeritli yollar
> 30	9	125	205	Ağır kamyon trafiğine maruz kalan çok şeritli, ağır trafik yoğunluklu yollar

Çalışmada 100 mm ile 150 mm çaplarında BSK numuneleri hazırlamak için Cooper marka yoğurmalı pres kullanılmıştır (Şekil 6.37). Kullanılan yoğurmalı pres, 1,25° yoğurma açısına sahip, yoğurma hızı 30 devir/dakika ve yoğurma basıncı 0–700 kPa olarak ayarlanabilmektedir. Yoğurma sayısı bilgisayar yazılımından girilerek seçilmekte ve dökülen numunelerin sıkışma miktarları cihazın sensörleri yardımıyla ölçülerek bilgisayar yazılımına kaydedilmektedir. Yoğurma işlemi bittiğinde sıkıştırılmış olan numune cihazdaki kriko yardımıyla kalıptan çıkarılmaktadır.



Şekil 6.37. Cooper yağurmalı sıkıştırıcı

Daha önceden hazırlanıp etüvde sıkıştırma sıcaklığında bekletilen karışımlar çıkartılarak yağurmalı sıkıştırıcının kalıbına dökülerek istenen yağurma sayısında ($N_{des}=100$) sıkıştırma işlemine başlanmıştır. Karışımların yağurma sayılarındaki yükseklikleri cihazda bulunan sensörler sayesinde ölçülmüş ve yazılım sayesinde kaydedilmiştir. Yağurma sayısına ulaşıncaya otomatik olarak duran cihazdan sıkıştırılmış numuneler zarar görmeyecek şekilde çıkartılarak soğumaya bırakılmış ve bu numunelerin hacim özgül ağırlığı (G_{mb} (ölçülen)), AASHTO T166 [177] standardına göre tespit edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 6.14’de verilmiştir.

Tablo 6.14. Deneme karışımlarının ölçülen hacim özgül ağırlıkları

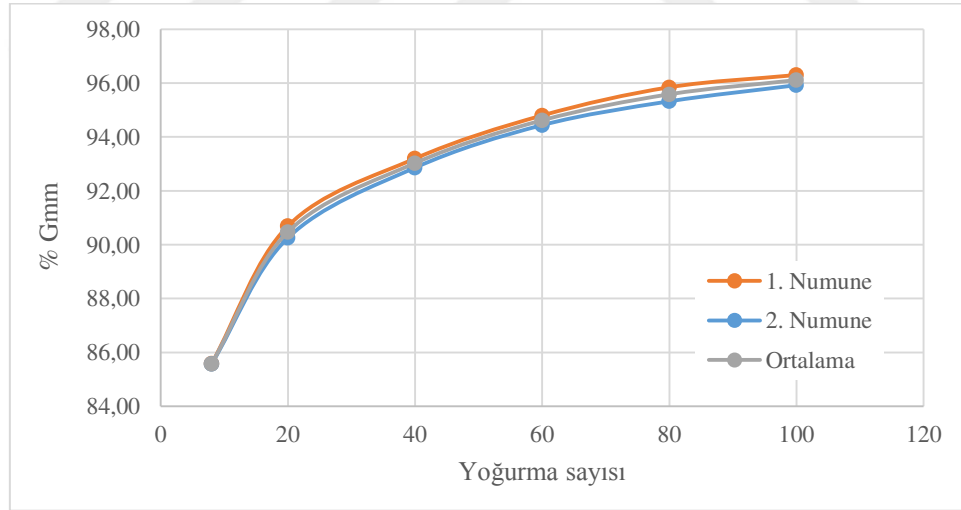
Hacim Özgül Ağırlık, G_{mb} (ölçülen)	Numune No	
	1	2
Kuru ağırlık, A (gr)	1151,3	1151,6
Sudaki ağırlık, C (gr)	658,7	658,3
Doygun yüzey kuru ağırlık, B (gr)	1157,2	1158,9
$G_{mb}(\text{ölçülen}) = A/(B-C)$	2,310	2,300

Sıkıştırma işlemi tamamlanan karışım numunelerinden elde edilen veriler (h_x , G_{mb} (ölçülen), W_m , G_{mm}) kullanılarak tasarım yağurma sayısındaki (N_{des}) tahmini hacim özgül ağırlık ($G_{mb}(\text{tahmini})$), düzeltme faktörü (C), düzeltilmiş hacim özgül ağırlık ($G_{mb}(\text{düzeltilmiş})$) ve son olarak maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi ($\%G_{mm}$) hesaplanarak sonuçları değerlendirilmiştir. PG 58–28 ana bağlayıcısı ile %5,107 bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerine ait sıkıştırma

karakteristikleri Tablo 6.15’da verilmiştir. Yoğurmalı preste sıkıştırılan numunelerin farklı yoğurma sayılarındaki yoğunluk değerleri ve bu değerlerin ortalaması Şekil 6.38’de gösterilmiştir.

Tablo 6.15. Numunelerin %5,107 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir (Yoğ.) Sayısı	Numunelerin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1151,3 gr		Numune-2		Wm = 1151,6 gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
Nini= 8	71,0	2,066	2,053	85,59	71,4	2,055	2,052	85,58	85,58
20	67,0	2,189	2,175	90,70	67,7	2,167	2,165	90,25	90,48
40	65,2	2,249	2,235	93,20	65,8	2,229	2,227	92,86	93,03
60	64,1	2,288	2,273	94,80	64,7	2,267	2,265	94,44	94,62
80	63,4	2,313	2,299	95,85	64,1	2,289	2,286	95,32	95,58
Ndes= 100	63,1	2,324	2,310	96,30	63,7	2,303	2,300	95,92	96,11
Gmb(ölçülen)		2,310			2,300				
Düz. Faktörü. (C)		0,994			0,999				
Gmm(ölçülen)		2,398							



Şekil 6.38. Sıkıştırılan numunelerin yoğunluk eğrileri ve ortalaması

Sıkıştırma esnasında yoğurmalı presin yaptığı her dönüş sonrası numune yüksekliği sensörler yardımıyla ölçülerek kaydedilmektedir. Sıkıştırılmış numunenin hacim özgül ağırlığı (Gmb) numune yüksekliğinden yola çıkılarak hesaplanabilmektedir. Herhangi bir yoğurma değeri için hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlık değeri olan Gmb(tahmini), karışım ağırlığının numunenin hacmine bölünmesi ile elde edilir. Tasarım yoğurma sayısında (Ndes) 1. numune için gösterilen hesaplamalar aşağıdaki gibi denklem e göre yapılmıştır.

$$W_m = 1151,3 \text{ gr}$$

$$V_{mx} = \frac{\pi d^2 h_x}{4} \times 0,001 \text{ cm}^3 / \text{mm}^3 \quad (6.10)$$

d: Kalıbın çapı (100 mm veya 150 mm),

h_x: Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği (mm),

$$V_{mx} = \frac{3,14 \times 100^2 \times 63,1}{4} \times 0,001 = 495,335 \text{ cm}^3$$

$$G_{mb}(\text{tahmini}) = \frac{(W_m / V_{mx})}{\gamma_{su}} \quad (6.11)$$

G_{mb}(tahmini) : Numunenin sıkıştırma esnasındaki hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı,

W_m: Numunenin ağırlığı (gr),

γ_{su}: Suyun yoğunluğu (1 gr/cm³),

V_{mx}: Numunenin hesapla bulunan hacmi (cm³).

Silindir geometriye sahip olan sıkıştırılmış numunelerin hesaplamalarda kenarlarının tam olarak düzgün ve boşluksuz olduğu kabul edilmekte olup gerçekte boşluklar nedeniyle daha düşük hacimli bir numune elde edilmektedir. Bu nedenle hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı (G_{mb}(tahmini)) bir düzeltme faktörüyle (C) çarpılarak düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı (G_{mb}(düzeltilmiş)) elde edilmektedir.

$$C = \frac{G_{mb}(\text{ölçülen})}{G_{mb}(\text{tahmini})} \quad (6.12)$$

$$G_{mb}(\text{düzeltilmiş}) = C \times G_{mb}(\text{tahmini}) \quad (6.13)$$

C: Düzeltme faktörü,

G_{mb}(ölçülen) : Sıkışmış numunenin ölçülen hacim özgül ağırlığı,

G_{mb}(tahmini) : Sıkışmış numunenin hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı.

G_{mb}(düzeltilmiş): Herhangi bir yoğurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı.

$$\gamma_{su} = 1 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{mb}(\text{tahmini}) = (1151,3/495,335)/1 = 2,324 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{mb}(\text{ölçülen}) = 2,310 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{mm}(\text{ölçülen}) = 2,398 \text{ gr/cm}^3$$

$$C = \frac{G_{mb}(\text{ölçülen})}{G_{mb}(\text{tahmini})} = 2,310/2,324 = 0,994$$

$$Gmb(\text{düzeltilmiş})=C \times Gmb(\text{tahmini}) \quad (6.14)$$

$$Gmb(\text{düzeltilmiş}) = 0,994 \times 2,324 = 2,310 \text{ gr/cm}^3$$

Düzeltilmiş maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi (% Gmm) değeri, düzeltilmiş hacim özgül ağırlığın (Gmb(düzeltilmiş)), ölçülen maksimum teorik özgül ağırlığına (Gmm(ölçülen)) oranlanması ile bulunur.

$$\% \text{ Gmm} = 100 \times Gmb(\text{düzeltilmiş}) / Gmm(\text{ölçülen})$$

$$\% \text{ Gmm} = 100 \times 2,310 / 2,398 = \%96,30$$

$$\text{Ortalama } \% \text{ Gmm} = (96,30 + 95,92) / 2 = \%96,11$$

Hazırlanan karışımlarının özelliklerini tayin edilebilmek ve şartname limitleri ile kıyaslamak için, gerekli hesaplamalarda kullanmak üzere ortalama %Gmm@Ndes ve %Gmm@Nini değerleri Tablo 6.15’den alınarak aşağıdaki Tablo 6.16’de verilmiştir. Her bir karışımın tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (Va) ve mineral agregadaki boşluk yüzdesi (VMA) aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenmiş ve Tablo 6.17’de verilmiştir.

Tablo 6.16. Karışımın Nini ve Ndes’deki %Gmm değerleri

%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
85,58	96,11

Superpave hacimsel tasarım kriterleri olan VMA, VFA ve filler oranı, tasarım yoğurma sayısı olan Ndes’de karışımın % 4’lük hava boşluğu içeriğine sahip olması esasına dayanmaktadır. Superpave karışım tasarım yöntemi ayrıca Nmaks, Ndes ve Nini yoğurma sayılarında da karışım yoğunluğu için kriterler içermektedir. Tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes), hava boşluğu yüzdesi (Va) ve mineral agregadaki boşluk yüzdesi (% VMA) aşağıdaki bağıntılar ile belirlenmektedir.

$$Va = 100 - \%Gmm@Ndes \quad (6.15)$$

Va: Toplam hacmin yüzdesi olarak Ndes’deki hava boşluğu,

%Gmm@Ndes: Ndes’deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi.

$$Va = 100 - 96,11 = \%3,89$$

$$\%VMA = 100 - \left(\frac{\%Gmm @ Ndes \times Gmm \times Ps}{Gsb} \right) \quad (6.16)$$

%VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

%Gmm@Ndes: Ndes'deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi,

Gmm: Maksimum teorik özgül ağırlık,

Gsb: Toplam agreganın hacim özgül ağırlığı,

Ps: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agrega içeriği (cm³/cm³).

$$VMA = 100 - \left(\frac{96,11 \times 2,398 \times 0,9489}{2,558} \right) = \%14,50$$

Tablo 6.17. Deneme karışımlarının sıkıştırma hesap özeti

%AC	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes	%Va	%VMA
5,11	85,58	96,11	3,89	14,50

Deneme bitüm (başlangıç) içeriğinde hazırlanan karışım numunelerinin hacimsel özellikleri burada belirlenmiş olup deneme bitüm içeriğinde %4 boşluk oranı genellikle yakalanamamaktadır. Fakat hacimsel tasarımda hava boşluğunun %4 olması amaçlanmaktadır.

Bu nedenle tasarım yoğurma sayısında (Ndes) %4 boşluk oranını verecek tahmini bitüm içeriği hesaplama yoluyla aşağıdaki bağıntıya göre belirlenmektedir.

$$Pb(\text{tahmini}) = Pbi - (0,4 \times (4 - Va)) \quad (6.17)$$

Pb(tahmini) : Karışım ağırlığının yüzdesi olarak tahmini bitüm içeriği,

Pbi: Karışım ağırlığının yüzdesi olarak deneme (başlangıç) bitüm içeriği,

Va: Tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (deneme).

Tasarım yoğurma sayısında (Ndes) bulunan hava boşluğu yüzdesi % 4'den farklı çıktığından, tasarım yoğurma sayısındaki hava boşluğu %4 olan tahmini bir bitüm içeriği hesaplanmış ve hesaplanan tahmini tasarım bitüm içeriğindeki tahmini tasarım özellikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Tasarım yoğurma sayısında (Ndes) hava boşluğu % 4 olan tahmini bitüm içeriği;

$$Pb(\text{tahmini}) = Pbi - (0,4 \times (4 - Va))$$

$$Pb(\text{tahmini}) = 5,11 - (0,4 \times (4 - 3,89)) = \%5,06$$

Deneme bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin hacimsel özelliklerinden yola çıkarak karışımların tasarım yoğurma sayısında (Ndes) ve %4 hava boşluğuna sahip olması durumundaki hacimsel özellikleri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenmektedir.

$$\%VMA(tahmini) = \%VMA(başlangıç) + C \times (4 - V_a) \quad (6.18)$$

$\%VMA(başlangıç)$: Deneme bitüm içeriğindeki karışımın agregası boşlukları yüzdesi,

C: Sabit katsayı, hava boşluğu yüzdesi % 4'den az ise 0,1; yüksek ise 0,2 alınır.

Tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes), hacimsel özellikler olan VMA ve VFA ve başlangıç yoğurma sayısındaki (Nini) karışım yoğunlukları, bu tahmini bitüm içerikleri için aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Deneme karışımlarında boşluk oranı %4'ten küçük olduğundan C katsayısı 0,1 olarak alınmıştır.

$$\%VMA(tahmini) = \%VMA(başlangıç) + C \times (4 - V_a)$$

$$\%VMA(tahmini) = 14,50 + 0,1 \times (4 - 3,89) = \%14,51$$

$$\%VFA(tahmini) = 100 \times \frac{(\%VMA(tahmini) - 4,0)}{\%VMA(tahmini)} \quad (6.19)$$

$$\%VFA(tahmini) = \frac{14,51 - 4,0}{14,51} \times 100 = \%72,43$$

$$\%Gmm(tahmini)@Nini = \%Gmm(deneme)@Nini - (4,0 - V_a) \quad (6.20)$$

$$\%Gmm(tahmini)@Nini = 85,58 - (4,0 - 3,89) = \%85,47$$

Karışımında kullanılan 0,075 mm'lik (No. 200) elekten geçen filler malzemesinin agregası karışımındaki ağırlıkça yüzdesinin ($P_{0,075}$), toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak hesaplanan efektif bitüm içeriğine ($Pbe(tahmini)$) oranlanması ile filler oranı (DP) hesaplanmaktadır. Karışımların efektif bitüm bağlayıcı içeriği Denklem 6.21 ile Filler oranı ise Denklem 6.22 ile hesaplanmaktadır.

$$Pbe(tahmini) = Pb(tahmini) - (Ps \times Gb) \times \left(\frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \right) \quad (6.21)$$

Pbe: Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak efektif bitüm içeriği,

Pb(tahmini) : Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak tahmini bitüm içeriği,

Ps: Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak agregası içeriği,

Gb: Bitümün özgül ağırlığı,

Gse: Agreganın efektif özgül ağırlığı,

Gsb: Agreganın hacim özgül ağırlığı.

$$Pbe(tahmini) = 5,06 - (94,89 \times 1,031) \times \left(\frac{2,597 - 2,558}{2,597 \times 2,558} \right) = \%4,49$$

$$DP = \frac{P_{0.075}}{Pbe(tahmini)} \quad (6.22)$$

$$DP = 5,0/4,49 = 1,11$$

Sonuç olarak, başlangıç bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerin yukarıda ifade edilen tahmini değerleri hesaplandıktan sonra, bu değerler Tablo 6.18’de gösterilerek şartname kriterleri ile ayrı ayrı kıyaslanmıştır. Sıkıştırılan deneme karışımlarının özellikleri şartname kriterleri ile kıyaslandığında, deneme karışımlarının gerekli şartname kriterlerini karşıladığı belirlenmiştir.

Tablo 6.18. Deneme karışımlarının sıkıştırma sonuçları ve şartname kriterleri

Deneme Karışımı	Pbi (%)	Pb (%)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
	5,11	5,06	4,00	14,51	72,43	1,11	85,47	96,00
Şartname Kriterleri			4.00	14,0 (min.)	65-75 (min.)	0,6-1,2	≤89,0	96,00

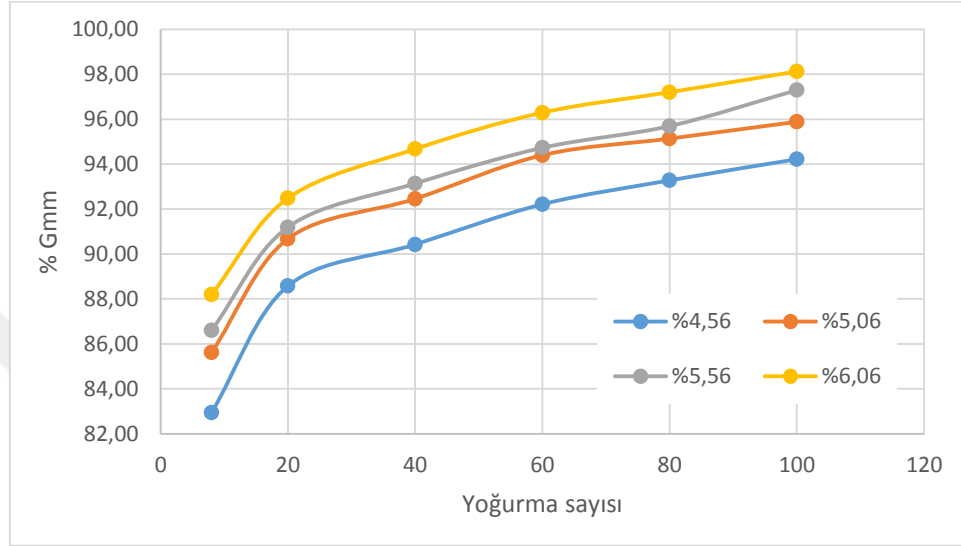
Tahmini bitüm içeriği belirlendikten sonra karışımın ±%0,5 ve +%1,0 tahmini bitüm içeriğinde olmak üzere toplam dört farklı bitüm içeriğinde ve her bitüm içeriği için en az iki numune olmak üzere toplamda 8 bitümlü sıcak karışım numunesi hazırlanmıştır.

Superpave karışım tasarım yöntemine göre bu dört farklı bitüm içeriği minimum gereksinimdir. PG 58-28 bağlayıcısı kullanılarak %4,56; %5,06; %5,56 ve %6,06 bitüm içeriklerinde hazırlanan karışım numuneleri daha önce anlatılan tasarım agrega gradasyonu seçimindeki gibi hazırlanmış ve numuneler yoğurmalı presle sıkıştırılmıştır. Ayrıca, agrega karışımının her bir bitüm içeriğindeki karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlık (Gmm) ve sıkışmış hacim özgül ağırlık (Gmb) değerleri bulunarak Tablo 6.19’da gösterilmiştir.

Tablo 6.19. Farklı bitüm içeriklerinde sıkıştırılan karışım numunelerinin fiziksel özellikleri

%AC (Pb)	Wb (gr)	Numune-1				Numune-2				Gmm
		A (kuru)	B (doygün)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	A (kuru)	B (doygün)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	
4,56	1144,56	1152,49	652,21	500,28	2,288	1143,77	1152,04	652,35	499,69	2,289
5,06	1150,67	1155,91	658,54	497,37	2,314	1151,23	1155,38	657,29	498,09	2,311
5,56	1158,72	1163,2	665,91	497,29	2,330	1157,92	1163,55	666,55	497	2,330
6,06	1162,33	1166,72	668,84	497,88	2,335	1162,85	1167,12	668,56	498,56	2,332

%4,56; %5,06; %5,56 ve %6,06 bitüm içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri, Şekil 6.39’de gösterilmiştir.



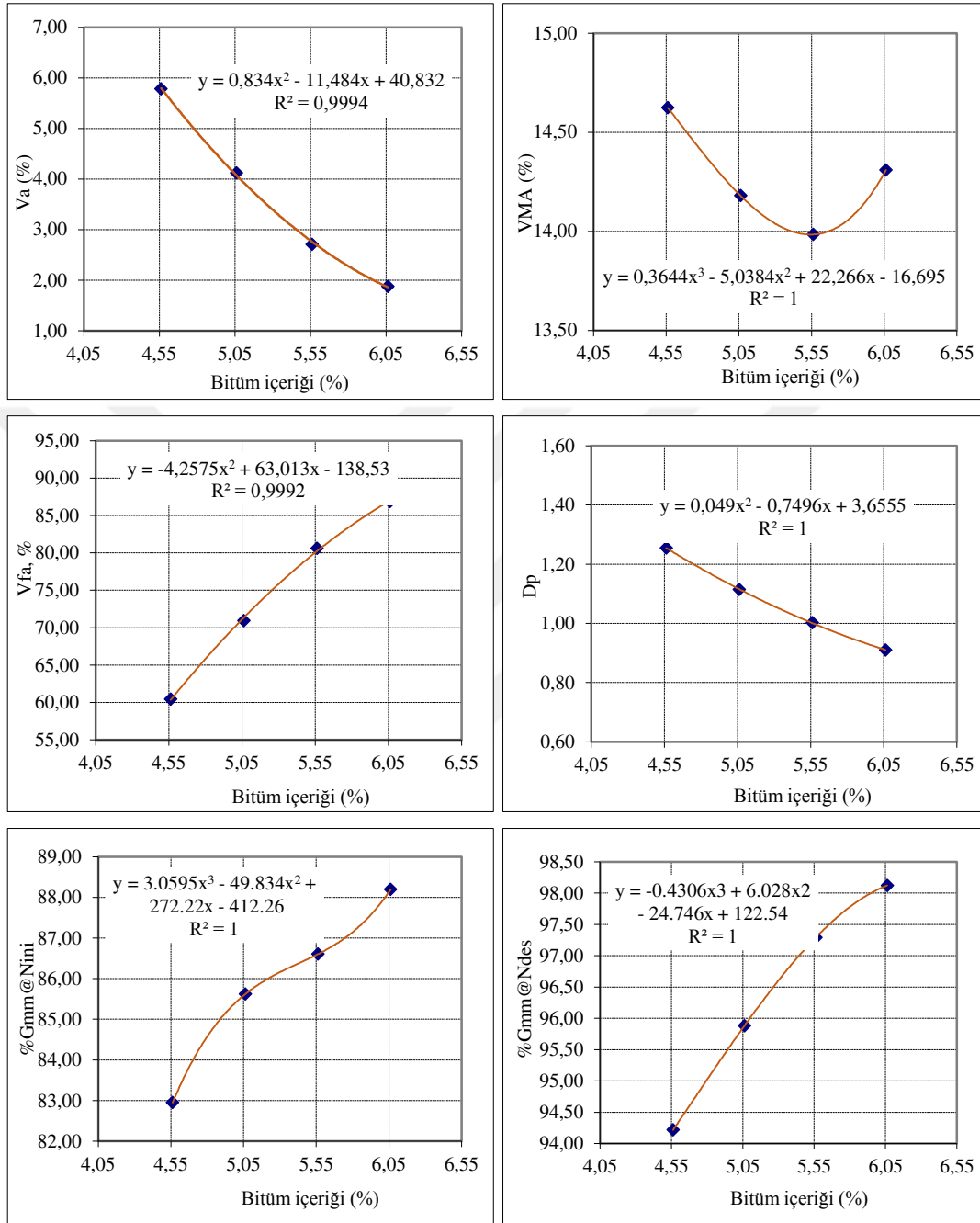
Şekil 6.39. Karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri

Tasarım yoğurma sayısında sıkıştırılan dört farklı bitüm içeriğindeki karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristiklerinden yola çıkılarak, karışımların numunelerinin yoğunluk ve hacim özellikleri tespit edilmiş ve bu değerler Tablo 6.20’de verilmiştir.

Tablo 6.20. Karışım numunelerinin yoğunluk değerleri ve hacim özellikleri

%AC (Pb)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	<u>%Gmm@Nini.</u>	<u>%Gmm@Ndes.</u>
4,56	5,78	14,62	60,46	1,26	82,95	94,22
5,06	4,12	14,18	70,96	1,11	85,62	95,88
5,56	2,71	13,98	80,63	1,00	86,60	97,29
6,06	1,88	14,31	86,87	0,91	88,20	98,12

Tasarım yoğurma sayısında (Ndes=100) hesaplanan Va, VMA, VFA, DP ve yoğunluk değerlerinin, bitüm yüzdelere (%AC) bağlı olarak değişimini gösteren grafikler çizilerek Şekil 6.40’da gösterilmiştir.



Şekil 6.40. Karışımların hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm içeriği ile değişimleri

PG 58-28 ana bağlayıcısı için tasarım bitüm içeriği; karışımın hava boşluğu yüzdesi- bitüm yüzdesi grafiği yardımıyla, boşluk oranı %4 olacak şekilde bitüm yüzdesi %5,08 olarak bulunmuştur. Grafiğe göre bulunan tasarım bitüm yüzdesine göre diğer tasarım değerleri tespit edilerek sonuçları Tablo 6.21’te verilmiş ve Superpave şartname kriterleri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 6.21. Karışımların %5,08 tasarım bitüm bağlayıcı içeriğindeki özellikleri

Karışım Özelliği	Sonuç	Şartname Kriteri
Hava Boşluğu Yüzdesi (Va, %)	4,0	4,0
Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA, %)	14,15	Min. 14,0
Bitümle Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA, %)	71,71	65–75
Filler Oranı (DP)	1,12	0,6–1,2
%Gmm@Nini. = 8 (%)	85,7	Maks. 89
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96,0	96

Son olarak belirlenen tasarım bitüm içeriğinde iki karışım numunesi daha hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılmış ve yoğunluk değerleri şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır. Hazırlanan ve maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılan karışım numunelerinin Gmm ve Gmb değerleri Tablo 6.22’de, sıkıştırma karakteristikleri Tablo 6.23’de, bu numunelerden elde edilen değerler Tablo 6.24’de ve karışımların %5,08 tasarım bitüm içeriğindeki özellikleri Tablo 6.25’te verilmiştir.

Tablo 6.22. Maksimum yoğurma sayısında sıkıştırılan numunelerin Gmm ve Gmb değerleri

%AC (Pb)	Wb (gr)	Numune-1				Numune-2				Gmm
		A (kuru)	B (doğgun)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	A (kuru)	B (doğgun)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	
5,08	58,9	1151,6	1155,4	660,6	2,327	1150,9	1155,9	660,8	2,325	2,411

Tablo 6.23. Numunelerin Nmaks.’da %5,08 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1151,6 gr		Numune-2		Wm = 1150,9 gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
Nini= 8	70,9	2,069	2,065	85,64	71,4	2,053	2,061	85,47	85,56
20	67,4	2,177	2,172	90,08	67,6	2,169	2,177	90,28	90,18
40	65,6	2,236	2,232	92,56	66,0	2,221	2,229	92,47	92,51
60	64,3	2,282	2,277	94,43	64,7	2,266	2,274	94,33	94,38
80	63,7	2,303	2,298	95,32	63,9	2,294	2,303	95,51	95,41
Ndes= 100	63,3	2,318	2,313	95,92	63,6	2,305	2,314	95,96	95,94
120	63,1	2,325	2,320	96,22	63,5	2,309	2,317	96,11	96,17
140	63,0	2,329	2,324	96,38	63,4	2,312	2,321	96,26	96,32
Nmax= 160	62,9	2,332	2,327	96,53	63,3	2,316	2,325	96,41	96,47
Gmb(ölçülen)		2,327			2,325				
Düz, Faktörü, (C)		0,998			1,004				
Gmm(hesaplanan)		2,411							

Tablo 6.24. Karışım numunelerinin Nmaks,'da %5,08 bitüm içeriğindeki yoğunluk değerleri

Özellik	%Gmm@Nini.	%Gmm@Ndes.	%Gmm@Nmaks.
Sonuç	85,56	95,94	96,47
Şartname Kriteri	≤89,0	96,0	≤98,0

Tablo 6.25. Karışımların %5,08 tasarım bitüm içeriğindeki özellikleri

Karışım Özelliği	Sonuç	Şartname Kriteri
Hava Boşluğu Yüzdesi (Va, %)	4,06	4,0
Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA, %)	14,17	Min. 14,0
Bitümle Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA, %)	71,33	65–75
Filler Oranı (DP)	1,11	0,8–1,6
%Gmm@Nini. = 8 (%)	85,56	Maks. 89
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	95,94	96
%Gmm@Nmaks. = 160 (%)	96,47	Maks. 98

Tablo 6.25. değerlendirildiğinde, daha önce belirlenmiş olan tasarım agregada gradasyonu ile PG 58-28 ana bağlayıcısı kullanılarak belirlenen tasarım bitüm içeriğinde (%5,08) hazırlanan ve Nmaks'da sıkıştırılan karışım numunelerinin yoğunluk yüzdesi değerlerini Nini, Ndes ve Nmaks yoğunluk sayılarında sağladığı görülmüştür.

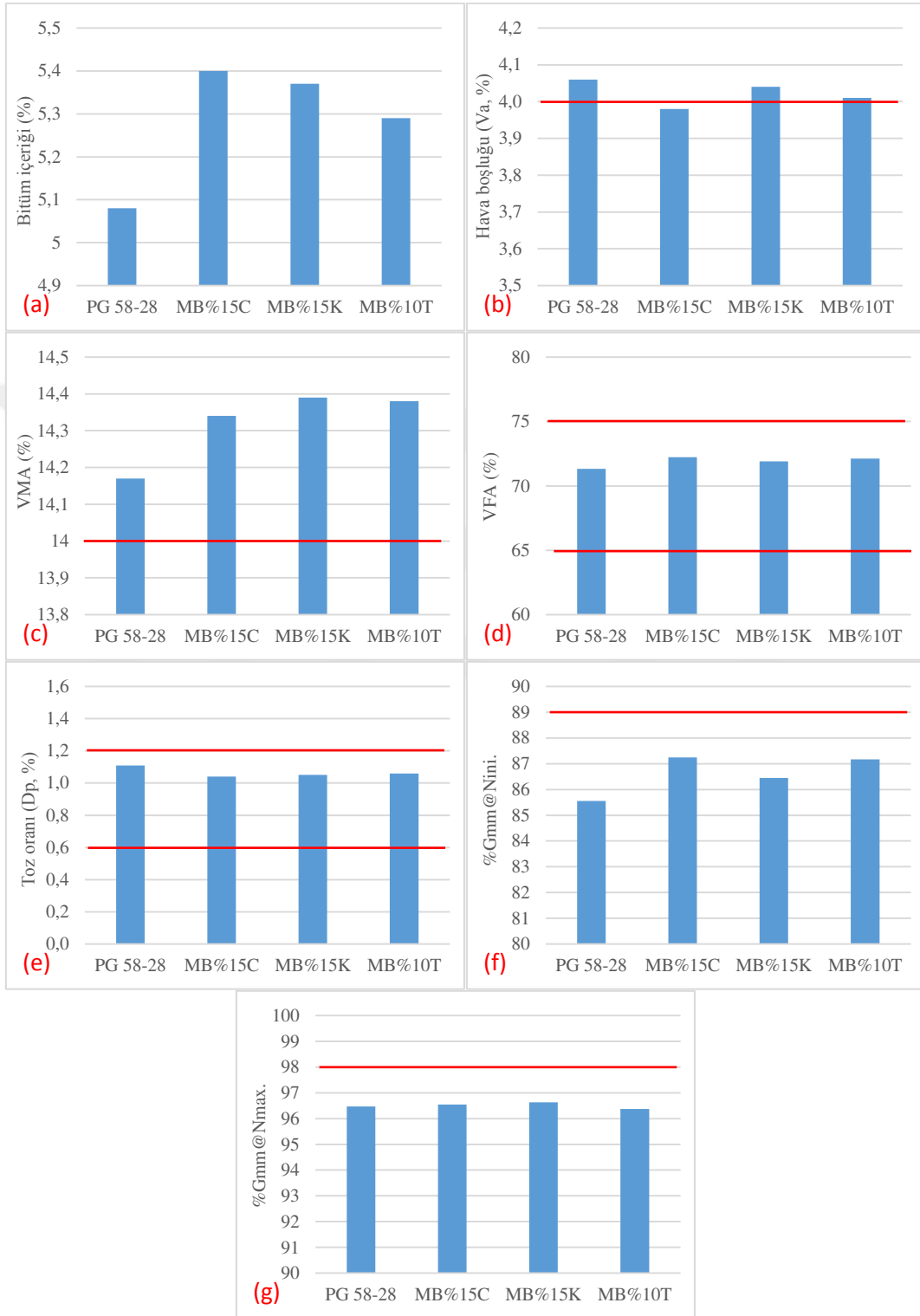
6.5.2. Modifiye Bağlayıcılar ile Hazırlanan Karışımların Tasarım Bitüm İçeriğinin Tespit Edilmesi

Öğütülmüş Kayısı Çekirdeği, Ceviz Kabuğu ve Talaş'ın No.50 elekten elendikten sonra 400°C'de piroliz işlemine tabi tutulmasıyla elde edilen biyoçarlarının kullanılmasıyla elde edilen modifiye bağlayıcılarla hazırlanan bitümlü sıcak karışımların dizayn bitüm içerikleri, PG 58-28 ana bağlayıcıyla hazırlanan karışımın tasarım bitüm içeriğinin belirlendiği gibi belirlenmiştir. Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri ise Tablo 6.26'da verilmiştir.

Tablo 6.26. PG58-28 ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri

Karışım özellikleri	Şartname limitleri	Bağlayıcı türü			
		PG 58-28	MB _{%15C}	MB _{%15K}	MB _{%10T}
Tasarım bitüm içeriği (%)	–	5,08	5,40	5,37	5,29
Hava boşluğu (Va, %)	4,0	4,06	3,98	4,04	4,01
Agregalar arası boşluk oranı (VMA, %)	Min. 14,0	14,17	14,34	14,39	14,38
Bitümle dolu boşluk oranı (VFA, %)	65–75	71,33	72,23	71,90	72,12
Toz oranı (Dp)	0,6–1,2	1,11	1,04	1,05	1,06
%Gmm@Nini. = 8 (%)	Max. 89	85,56	87,24	86,45	87,17
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96	95,94	96,02	95,96	95,99
%Gmm@Nmax. = 160 (%)	Max. 98	96,47	96,54	96,63	96,37

PG58-28 ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan BSK'ların hacimsel özellikleri Şekil 6.41'de verilmiştir.



Şekil 6.41. PG58-28 ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan BSK'ların hacimsel özellikleri

Şekil 6.41(a)'da görüldüğü üzere katkı kullanımı ile gerekli bitüm ihtiyacı artmıştır. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde en düşük tasarım bitüm içeriğine %10T modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların, en yüksek tasarım bitüm içeriğine ise %15C modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 6.41(b) incelendiğinde karışımların hava boşluğu oranlarının tasarıma uygun olarak %4'e yakın olduğu belirlenmiştir.

Şekil 6.41(c)'de görüldüğü üzere bütün karışımların tasarım bitüm içeriğindeki agregalar arası boşluk oranı değerlerinin Superpave şartname kriterini sağladığı, %14'ten büyük olduğu belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde en düşük tasarım bitüm içeriğindeki agregalar arası boşluk oranı değerine PG58-28 ana bağlayıcı ile hazırlanan karışımın, en yüksek VMA değerine ise %15K ve %10T modifiyeli bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.41(d)'de bütün karışımların VFA değerlerinin şartname sınırları arasında (%65-75) olduğu görülmektedir. Karışımlar incelendiğinde en düşük VFA değerine VMA değerleri ile bağlantılı olarak PG58-28 ana bağlayıcı ile hazırlanan karışımın, en yüksek VFA değerine ise %15C modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 6.41(e)'de görüldüğü üzere karışımların filler oranı değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Karışımların filler oranı değerlerinin 0,6 ile 1,2 arasında olduğu dolayısıyla Superpave şartname kriterini sağladığı tespit edilmiştir.

Şekil 6.41(f)'de görüldüğü üzere bütün karışımların şartname kriterini sağladığı, %Gmm@Nini değerlerinin %89'dan az olduğu belirlenmiştir.

Şekil 6.41(g)'de bütün karışımların şartname kriterini sağladığı, %Gmm@Nmaks değerlerinin %98'den az olduğu görülmektedir.

6.6. Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

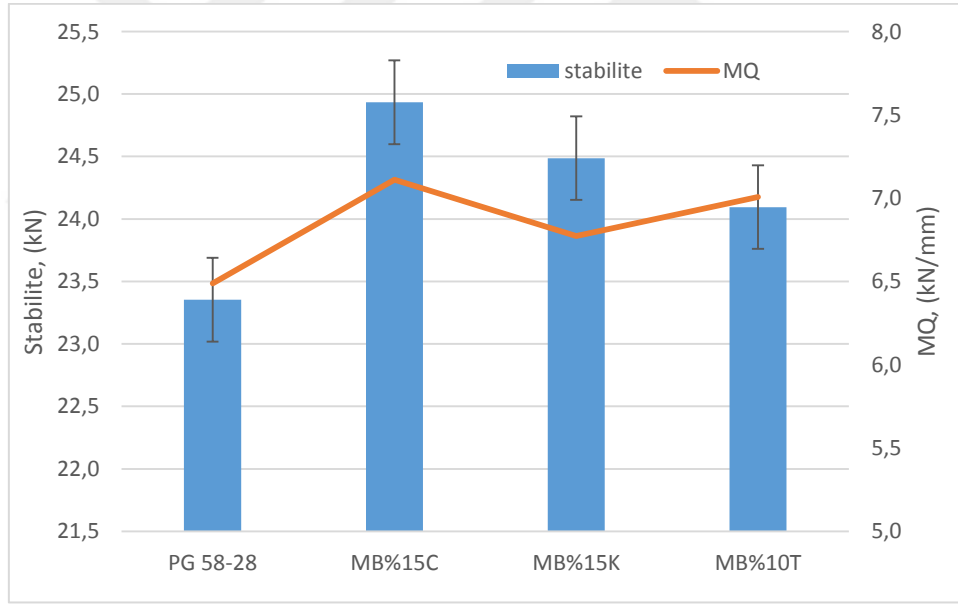
PG 58-28 saf bitümü ve MB_{%10T}, MB_{%15C} ve MB_{%15K} modifiye bitümleri kullanılarak tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanmıştır. Bütün karışımlar tasarım bitüm içeriklerinde ve %4 boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Marshall stabilite ve akma deneyinde numuneler EN 12697-34 [136] standardına göre 60°C suda 40 dakikada bekletilmiş daha sonra Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur. Marshall stabilite ve akma deney sonuçları Tablo 6.27'de verilmiştir. Deneye tabi tutulan numunelerin bir kısmı Şekil 6.42'de görülmektedir. Ayrıca Marshall stabilite ve Marshall stabilite değerinin akma değerine bölümünden elde edilen Marshall oranı (MQ) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi Şekil 6.43'de verilmiştir.

Tablo 6.27. Marshall stabilite ve akma deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	Numune No	h_{ort} , (mm)	G_{mb}	G_{mm}	V_a (%)	Stabilite, (kN)	Akma, (mm)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite, (kN)	MQ, (kN/mm)
PG 58-28	1	63,8	2,322	2,411	3,8	21,412	3,356	1,010	21,633	6,49
	2	64,1	2,317		4,1	22,782	3,785	1,003	22,840	
	3	63,9	2,318		4,0	25,389	3,662	1,008	25,585	
	Ortalama						3,601		23,353	
MB _{%15C}	4	64,3	2,316	2,412	4,1	25,822	3,299	0,997	25,754	7,11
	5	64,4	2,315		4,2	25,691	3,721	0,995	25,558	
	6	64,2	2,321		3,9	23,49	3,53	1,000	23,489	
	Ortalama						3,517		24,934	
MB _{%15K}	7	64,3	2,322	2,413	3,9	24,428	3,679	0,997	24,364	6,77
	8	64,0	2,321		4,0	24,086	3,730	1,005	24,210	
	9	64,1	2,325		3,8	24,824	3,454	1,003	24,887	
	Ortalama						3,621		24,487	
MB _{%10T}	10	64,0	2,316	2,409	4,0	23,999	3,779	1,005	24,122	7,01
	11	64,1	2,318		3,9	24,745	3,615	1,003	24,808	
	12	64,2	2,315		4,1	23,356	3,005	1,000	23,355	
	Ortalama						3,466		24,095	



Şekil 6.42. Deneye tabi tutulan numunelerin bir kısmının görünüşü



Şekil 6.43. Karışımlarının stabilite ve MQ değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Şekil 6.43’de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile Marshall stabilite değerleri artmıştır. Karışımlar içerisinde en yüksek stabilite değerlerine MB%15C modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük stabilite değerine ise PG 58-28 saf bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. En etkin modifiye bitümün ceviz kabuğu biyoçarından %15 oranında kullanılması ile elde edildiği (saf bağlayıcı kullanımına göre %6,77 artış) belirlenmiştir. Etkinliği en az olan katkı ise talaş biyoçarından %10 oranında kullanılması ile elde edildiği (saf bağlayıcı kullanımına göre %3,18 artış) tespit edilmiştir. Bitüm modifikasyonunda %15

kayısı çekirdeği biyoçarı kullanılması durumunda ise karışımın stabilite değeri saf bağlayıcıya göre %4,86 daha yüksek çıkmıştır.

Tablo 6.27’de görüldüğü üzere karışımların akma değerleri KTŞ şartname kriteri olan %3-5 aralığında olup karışımların akma değerleri birbirine çok yakın olarak tespit edilmiştir. Şekil 6.42’de verilen Marshall oranı değerleri incelendiğinde katkı kullanımı ile MQ değerleri artmıştır. MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} modifiye bitümleri ile hazırlanan MQ değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %9,57; %4,37 ve %7,97 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Marshall stabilite ve akma deney sonuçları değerlendirildiğinde katkı kullanımı ile stabilite ve MQ değerlerinin arttığı, akma değerlerinin önemli oranda değişmediği belirlenmiştir. Katkı türleri değerlendirildiğinde stabilite ve MQ değerleri üzerinde en etkin katkının ceviz kabuğu biyoçarından %15 oranında kullandığı modifiye bitüm olduğu belirlenmiştir.

6.7. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deney Sonuçları

PG 58-28 bitümü ve MB_{%10T}, MB_{%15C} ve MB_{%15K} modifiye bitümleri kullanılarak dizayn bitüm içeriklerinde hazırlanan karışım numuneleri üzerine AASHTO T 283 [142] standardına uygun olarak çekme dayanımı oranı deneyi uygulanmış ve karışımların nem hasarına karşı dayanımları belirlenmiştir. Her bir karışım türü için $\%7 \pm 0,5$ boşluk oranına sahip olacak şekilde 6 adet numune hazırlanmıştır. Standarta uygun olarak nem hasarına karşı dayanımlarının tespitinde kullanılacak karışım numuneleri hazırlanırken yoğurmalı preste 40 devirlik yoğurma sayısında sıkıştırma işlemi uygulanmıştır.

Karışımların kısa dönem yaşlandırılmasında numuneler 16 saat süresince 60°C sıcaklığa sahip etüvde, ardından sıkıştırma sıcaklığında iki saat bekletilmiştir. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ardından numunelerin hacimsel özellikleri belirlenerek boşluk oranları birbirine yakın olacak şekilde gruplandırılmıştır. Karışım numunelerinden üçer tanesine vakum uygulanarak boşluklarının %70-80 oranında suyla dolması sağlanmıştır. Bu doygunluk oranını sağlamak amacıyla koşullandırmaya maruz bırakılacak numunelerin hepsine 10 dakika süresince vakum uygulanmıştır. Doygunluk derecesi sağlanmayan numunelere yeniden vakum uygulanmıştır. Doygunluk seviyesi %80’in üzerinde olan numuneler deney dışında bırakılmış bu numunelerin yerine yeni numuneler hazırlanmıştır. Vakum uygulanan numuneler streç film ile kaplanmış, içerisinde 10 ml. su bulunan poşetlere konularak poşetlerin ağzı iyice kapatılmıştır.

Numuneler -18°C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat bekletilmiş ardından 60°C’deki suda 24 saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler poşetten ve streç filmden çıkarılmış ve 25°C’deki suda 2 saat bekletilerek kırılmıştır. Koşullandırılmamış numunelerde 25°C’deki suda 2 saat bekletilerek

Marshall deney aletinde indirekt çekme dayanımı çenesinde kırılmıştır. Kırma işlemi süresince numunelere 2 inç/dakika'lık (50,8 mm/dk) sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Maksimum yük değerleri yardımıyla çekme dayanımı değerleri Denklem 6.23 kullanılarak, çekme dayanımı oranları ise Denklem 6.24 kullanılarak belirlenmiştir.

$$TS = \left(\frac{2P_{mak}}{\pi dt} \right) \quad (6.23)$$

$$TSR = \left(\frac{TS_{yaş}}{TS_{kuru}} \right) * 100 \quad (6.24)$$

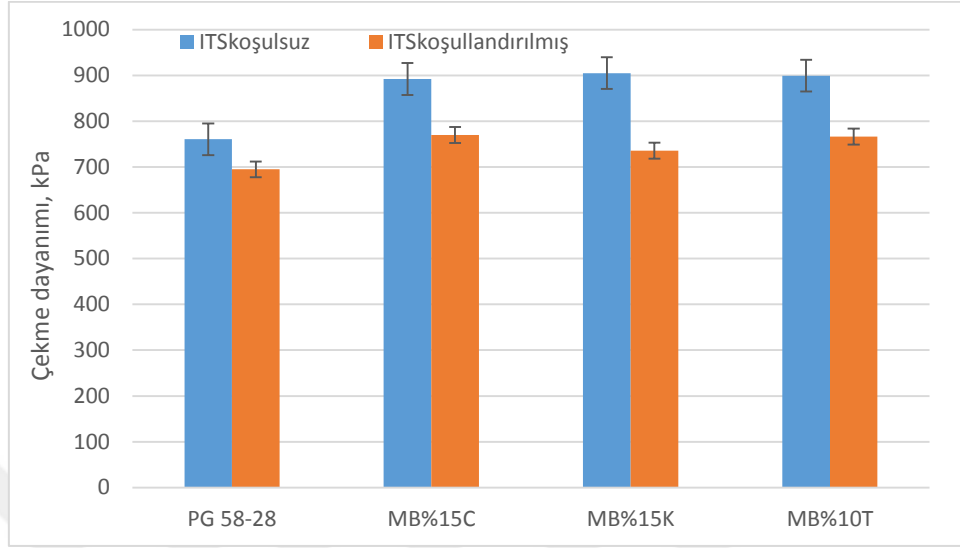
Koşullandırılmamış numunelere uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 6.28'de, koşullandırılmış numunelerden elde edilen sonuçlar ise Tablo 6.29'da verilmiştir. Karışımların çekme dayanımı değerleri Şekil 6.44'te gösterilmiştir.

Tablo 6.28. Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	Numune No	h_{ort} , (mm)	Havadaki Ağırlık, (gr)	Sudaki Ağırlık, (gr)	Doygun Ku. Yüz. Ağ., (gr)	Gmb	Gmm	Boşluk, (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı, (kPa)
PG 58-28	1	66,2	1153,4	647,3	1163,3	2,235	2,411	7,29	7,57	728,3
	2	66,4	1154,2	647,7	1163,1	2,239		7,11	8,03	770,3
	3	66,0	1154,9	648,3	1163,3	2,243		6,98	8,11	782,7
	Ortalama									760,4
MB _{%15C}	4	66,6	1160,2	653,3	1172,0	2,237	2,412	7,25	9,44	902,8
	5	66,7	1159,7	652,1	1170,3	2,238		7,20	9,45	902,4
	6	66,4	1159,7	653,3	1171,5	2,238		7,21	9,08	871,0
	Ortalama									892,1
MB _{%15K}	7	66,7	1161,2	654,2	1171,4	2,245	2,413	6,96	9,11	869,9
	8	66,5	1159,7	654,0	1171,9	2,239		7,20	9,43	903,2
	9	66,3	1159,2	654,2	1171,4	2,241		7,11	9,80	941,5
	Ortalama									904,9
MB _{%10T}	10	66,2	1156,2	649,7	1166,6	2,237	2,409	7,15	9,51	915,0
	11	66,4	1157,6	650,0	1167,4	2,238		7,11	9,52	913,2
	12	66,3	1158,3	650,2	1168,9	2,233		7,31	9,05	869,4
	Ortalama									899,2

Tablo 6.29. Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	Numune No	h_{ort} , (mm)	Havadaki Ağırlık, (gr)	Sudaki Ağırlık, (gr)	Doygun Ku. Yüz. Ağ., (gr)	Gmb	Gmm	Boşluk, (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı, (kPa)
PG 58-28	1	66,4	1152,2	646,5	1161,4	2,238	2,411	7,18	7,25	695,5
	2	66,4	1154,0	648,4	1163,3	2,241		7,05	7,71	739,6
	3	66,6	1155,2	649,2	1164,8	2,240		7,07	6,79	649,4
	Ortalama									694,8
MB _{%15C}	4	66,7	1160,5	653,4	1171,4	2,240	2,412	7,12	8,03	766,8
	5	66,5	1159,2	653,2	1170,1	2,243		7,02	7,97	763,4
	6	66,5	1158,9	653,6	1172,0	2,236		7,32	8,13	778,7
	Ortalama									769,6
MB _{%15K}	7	66,8	1159,5	653,8	1169,7	2,247	2,413	6,86	7,79	742,8
	8	66,4	1158,6	651,5	1168,4	2,241		7,11	7,53	722,3
	9	66,7	1158,4	652,4	1168,6	2,244		7,00	7,77	742,0
	Ortalama									735,7
MB _{%10T}	7	66,7	1159,1	650,9	1168,1	2,241	2,409	6,98	8,04	767,8
	8	66,5	1157,2	650,1	1168,4	2,233		7,31	8,12	777,7
	9	66,6	1157,0	650,8	1168,4	2,235		7,21	7,88	753,6
	Ortalama									766,4

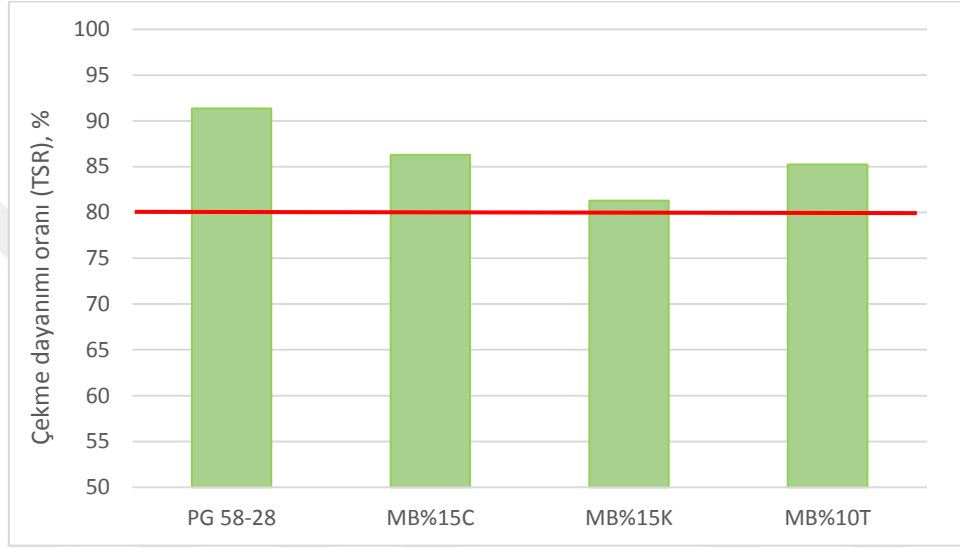


Şekil 6.44. Karışım numunelerinin çekme dayanımı değerleri

Şekil 6.44’de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile hem koşullandırılmamış hem de koşullandırılmış karışımlarda çekme dayanımı (TS) değerleri saf karışımlara göre artmıştır. Koşullandırmadan önce modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların TS değerlerinin birbirine yakın olduğu, bunun yanı sıra en yüksek değere kayısı çekirdeği kabuğunun pirolizinden elde edilen biyoçardan %15 oranında kullanılan modifiye bitümle hazırlanan karışımların, en düşük çekme dayanımı değerine PG 58-28 bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Modifiye bitümlerin TS değerleri üzerindeki etkinlikleri değerlendirildiğinde koşullandırma öncesinde $MB_{\%15K} > MB_{\%10T} > MB_{\%15C}$ şeklinde bir sıralama meydana gelmiştir. Koşullandırma öncesinde $MB_{\%15C}$, $MB_{\%15K}$ ve $MB_{\%10T}$ modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların TS değerlerinin PG 58-28 bitümü ile hazırlanan karışımların TS değerlerine göre sırasıyla %17.3, %19.0 ve %18.3 oranlarında arttığı belirlenmiştir.

Koşullandırma işlemi dolayısıyla karışımların çekme dayanımı değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Koşullandırma sonrasında da modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların TS değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma sonrasında modifiye bitümlerin TS değerleri üzerindeki etkinlikleri değerlendirildiğinde $MB_{\%15C} > MB_{\%10T} > MB_{\%15K}$ şeklinde bir sıralama meydana gelmiştir. Koşullandırma sonrasında $MB_{\%15C}$, $MB_{\%15K}$ ve $MB_{\%10T}$ modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların TS değerlerinin PG 58-28 bitümü ile hazırlanan karışımların TS değerlerine göre sırasıyla %10.8, %5.9 ve %10.3 oranlarında arttığı görülmüştür. Elde edilen değerlerden koşullandırma nedeniyle modifiye bitümlerin etkinliğin azaldığı belirlenmiş, en fazla azalmanın $MB_{\%15K}$ ile hazırlanan karışımda meydana geldiği tespit edilmiştir.

Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerlerinin koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerlerine oranlanması ile nem hasarına karşı bitümlü sıcak karışımların dayanımının bir göstergesi olan çekme dayanımı oranı (TSR) değerleri belirlenmiştir. Karışımların TSR değerleri Şekil 6.45’de görülmektedir.



Şekil 6.45. Karışımlarının çekme dayanımı oranlarının katkı kullanımı ile değişimi

Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan çekme dayanımı oranları incelendiğinde (Şekil 6.45) katkı kullanımı ile karışımların nem hasarına karşı dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde en yüksek TSR değerine PG 58-28 bitümü ile hazırlanan karışımın, en düşük değere ise MB_{%15K} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. TSR sonuçları değerlendirildiğinde bütün karışımların TSR değerlerinin Superpave şartname limiti olan %80’den büyük olduğu tespit edilmiştir. MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} kullanılarak hazırlanan karışımların TSR değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla 5.6%, 11.0% ve 6.7% daha düşük olduğu belirlenmiştir. MB_{%15C} ve MB_{10T} ile hazırlanan karışımların TSR değerlerinin %85 bandında olduğu ve birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Çekme dayanımı oranı deneyleri değerlendirildiğinde piroliz sonrası biyoçarların katkı olarak kullanımı ile çekme dayanımı değerlerinin hem koşullandırma işleminden önce hem de koşullandırma sonra arttığı tespit edilmiştir. Koşullandırma öncesinde ceviz kabuğu biyoçarından %15 oranında kullanılması durumunda koşullandırma sonrasında ise kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarından %15 oranında kullanılması ile en etkin modifiye bitümlerin elde edileceği belirlenmiştir.

Bitüm modifikasyonunda biyoçar kullanılması ile karışımların nem hasarına karşı dayanımları azalmıştır. Özellikle bitüm modifikasyonunda kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarı kullanılması ile nem hasarına karşı dayanımda önemli oranda azalma meydana gelmiştir. Biyokütlelerin pirolizinden elde edilen biyoçarların bitüm modifikasyonunda kullanılması durumunda nem hasarına karşı ilave tedbir alınmasının (kireç kullanımı gibi) faydalı olacağı düşünülmektedir.

6.8. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

PG 58-28 ana bağlayıcı ve MB_{%10T}, MB_{%15C} ve MB_{%15K} modifiye bitümleri ile tasarım dizayn bitüm içeriklerinde hazırlanan sıcak karışımlar üzerinde BS DD 213 [144] standardına uygun olarak indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanarak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. ITSM deneyi tahribatsız bir deney olduğundan ITSM deneylerinde rijitlikleri belirlenen BSK numuneleri indirekt çekme yorulma deneylerinde de kullanılmıştır. Yapılan deneylerde her bir karışım türü için üç adet numune deneye tabi tutulmuştur.

ITSM deneyinde 5 adet ön yükleme, ardından 5 defa deney yükleme yapılarak uygulanan dinamik yükler karşısında BSK numunelerini rijitlikleri belirlenmiştir. Bu deney deformasyon kontrollü olduğundan hedef deformasyon 5 µm., yük periyodu 3000 ms., yük artış süresi ise 124 ms. olarak seçilmiştir. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz BSK numunelerine yatay ekseninde 5 µm. deformasyon oluşturacak yükü tespit etmektedir. Daha sonra numuneye uygulanan 5 adet deney yükleme sonucunda ITSM değerlerinin ortalamaları aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunmuş ve buradan numunenin ITSM değeri belirlenmiştir (Denklemler 6.25).

$$S_m = \frac{F(R + 0,27)}{LH} \quad (6.25)$$

Deneyde poisson oranı 0,35 olarak alınmış olup sıcaklığın ITSM değerleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla deneyler 20°C, 25°C ve 30°C sıcaklıklarda yapılmıştır. PG 58-28 ve MB_{%10T}, MB_{%15C} ve MB_{%15K} modifiye bitümleri ile dizayn bitüm içeriklerinde hazırlanan karışım numunelerine uygulanan ITSM deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.30'da verilmiştir.

Tablo 6.30. Karışım numunelerin ITSM deney sonuçları

Katkı Türü	Numune No	hort, (mm)	Deneme No	Sıcaklık, (°C)	ITSM, (MPa)	ITSMort, (MPa)	Sıcaklık, (°C)	ITSM, (MPa)	ITSMort, (MPa)	Sıcaklık, (°C)	ITSM, (MPa)	ITSMort, (MPa)
PG 58-28	1	64,5	1	20	5659	6055	25	3541	3371	30	2770	2720
			2		6451			3201			2669	
	2	63,7	1		6210	6149		3101	3249		2710	2757
			2		6087			3397			2803	
	3	63,9	1		6349	6112		3047	3096		2687	2621
			2		5874			3144			2554	
	Ortalama					6105			3239			2699
MB _{%15C}	1	64,6	1	20	7853	8010	25	4263	4453	30	3433	3480
			2		8167			4642			3526	
	2	64,1	1		7615	8055		4108	3812		3515	3441
			2		8494			4216			3367	
	3	64,6	1		8192	8047		4292	3971		3612	3433
			2		7902			4020			3253	
	Ortalama					8037			4257			3451
MB _{%15K}	1	64,1	1	20	7648	7832	25	4023	4209	30	3435	3356
			2		8016			4394			3277	
	2	64,3	1		7629	7925		3962	4103		2980	3100
			2		8221			4244			3220	
	3	64,3	1		7912	8082		4200	4373		2945	3087
			2		8252			4545			3228	
	Ortalama					7946			4228			3181
MB _{%10T}	1	64,1	1	20	6202	6388	25	4056	4266	30	3428	3342
			2		6574			4475			3256	
	2	64,1	1		6206	6296		4132	4127		3198	3326
			2		6385			4122			3453	
	3	64,1	1		6409	6376		3980	4093		3338	3208
			2		6342			4205			3078	
	Ortalama					6353			4162			3292

Katkı türü ve sıcaklıkla BSK'ların ITSM değerlerinin değişimi Şekil 6.46'da verilmiştir.



Şekil 6.46. Karışımların ITSM değerlerinin sıcaklıkla (a) ve katkı türü ile (b) değişimi

Şekil 6.46(a)'da görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça ITSM değerleri azalmıştır. Şekil 6.46(b)'de ise modifiye bitüm kullanımı ile bütün sıcaklıklarda karışımların ITSM değerlerinin arttığı görülmüştür. Bütün sıcaklıklarda en yüksek ITSM değerine MB%15C ile hazırlanan, en düşük ITSM değerine ise PG 58-28 ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.

20°C sıcaklıkta MB_{%15C}, MB_{%15K} MB_{%10T} ile hazırlanan karışımların ITSM değerinin PG 58-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %31,65; %30,16 ve %4,06 oranlarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

25°C sıcaklıkta MB_{%15C}, MB_{%15K} MB_{%10T} ile hazırlanan karışımların ITSM değerinin PG 58-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %31,44; %30,55 ve %28,51 oranlarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

30°C sıcaklıkta ise MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} ile hazırlanan karışımların ITSM değerinin PG 58-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %27,87; %17,86 ve %21,97 oranlarında daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlardan bütün sıcaklıklarda etkinliği en fazla olan modifiye bitümün ceviz kabuğunun pirolizinden elde edilen biyoçarın bitüm modifikasyonunda %15 oranında kullanılması ile elde edildiği, etkinliği en az olan modifiye bitümün ise 20 ve 25°C sıcaklıklarda talaş biyoçarından %10 kullanılan modifiye bitümün, 30°C sıcaklıkta kayısı çekirdeği pirolizinden elde edilen biyoçarın bitüm modifikasyonunda %15 oranında kullanılması ile elde edilen modifiye bitümün en az etkinliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklığın 20°C sıcaklıktan 30°C sıcaklığa yükselmesi ile PG58-28, MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} ile hazırlanan karışımların ITSM değerleri sırasıyla %55,79; %57,06; %59,07 ve 48,18 oranlarında azalmıştır.

Bu sonuçlardan sıcaklıktan en fazla etkilenen karışımın MB_{%15K} ile hazırlanan, en az etkilenen karışımın ise MB_{%10T} ile hazırlanan karışım olduğu belirlenmiştir.

6.9. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

İndirekt çekme yorulma deneyi, PG 58-28 saf bitümü ile hazırlanan karışım ile MB_{%10T}, MB_{%15C} ve MB_{%15K} modifiye bitümleri kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Gerilme kontrollü olarak yapılan deneyde karışım numunelerine 250 kPa, 300 kPa ve 350 kPa olmak üzere üç farklı gerilme seviyesi uygulanmıştır.

Deney, 25°C sıcaklıkta yapılmış ve deneye başlamadan önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında UTM iklimlendirme kabiniinde koşullandırılmışlardır. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Yükleme periyodu 1,5 sn olarak alınmış bu sürenin 0,124 saniyesi ITSM deneyinde olduğu gibi yük etki süresi olarak ayarlanmıştır. Dolayısıyla dinlenme periyodu (rest period) 1,376 saniye olmuştur. Numunelerin deneyden sonraki durumları Şekil 6.47'de görülmektedir.



Şekil 6.47. Yorulma deneyi sonrasında numunelerin görünüşü

İndirekt çekme yorulma deneyinde numunelerde kırılma meydana gelinceye kadar tekrarlı yük uygulanmaya devam edilmiştir. Böylece maksimum yük tekerrür sayısı (N_{mak}) ve maksimum yük tekerrür sayısındaki deformasyon miktarları (δ_{mak}) belirlenmiştir.

Yük-deformasyon eğrisinde II. ve III. kısımların teğetlerin kesişimlerinden yorulma ömürleri belirlenmiştir. III. kısımda teğet, eğimin dönüş yaptığı noktadan itibaren alınmıştır. Excel formatında eğrinin II. ve III. kısımları iki ayrı kısma ayrılmış belirlenen yerlerden geçirilen teğetlerin denklemleri belirlenmiştir. İki teğet birbirine eşitlenerek karışımların yorulma ömürleri (N_f) belirlenmiştir. Eğride deformasyon oranının arttığı nokta (II. ve III. bölge sınırı) çatlak başlaması için gerekli yük tekerrür sayısı (N_i) olarak elde edilmiştir. Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısının belirlenmesi için eğim-yük tekrar sayısı grafiği çizilmiş eğimin artmaya başladığı nokta çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı (N_i) olarak alınmıştır. Yorulma ömrü (N_f) ile çatlak başlangıcı yük tekerrür sayısı (N_i) arasındaki farktan çatlak ilerlemesi yük tekerrür sayısı (N_p) değerleri elde edilmiştir. N_i ile N_f arasında her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayıları (r_f) belirlenmiştir.

Numunelere 250, 300 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde uygulanan indirekt çekme yorulma deneylerinden elde edilen N_f , N_{mak} , δ_f , δ_{mak} ve r_f değerleri Tablo 6.31–6.33’de verilmiştir. Ayrıca 250, 300 ve 350 kPa gerilme seviyesinde uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon–yük tekerrür sayısı ilişkisine birer örnek Şekil 6.48–6.50’de çizilmiştir.

Tablo 6.31. Karışımların 250 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

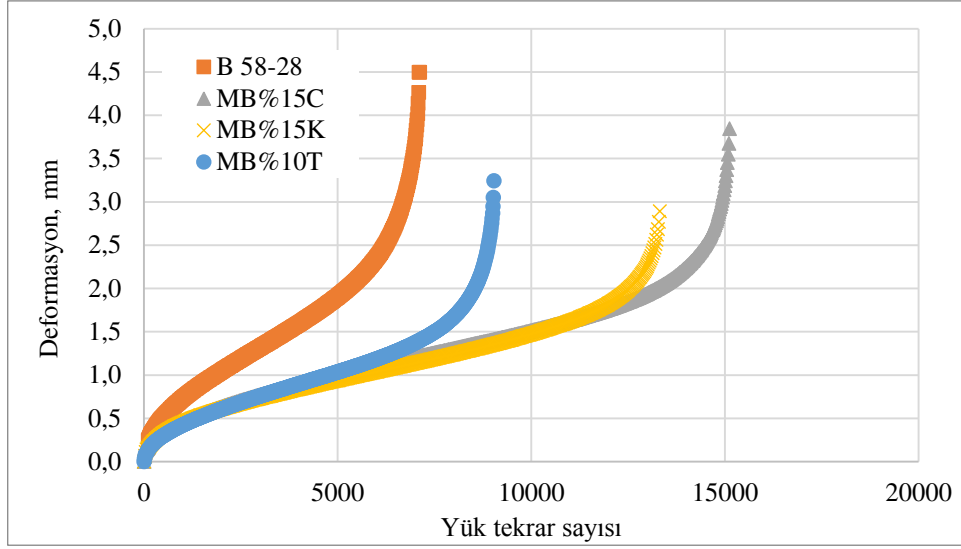
Gerilme Seviyesi	Katkı Türü	Num. No	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N _i	δ_i	N _f	δ_f	N _p	N _{mak}	δ_{mak}	r _p
250 kPa	PG 58-28	1	$y = 0.0003x + 0.5063$	$y = 0.0031x - 18.622$	5244	1,872	6832	2,722	1588	7272	4,262	1868
		2	$y = 0.0003x + 0.5236$	$y = 0.0036x - 19.095$	4440	1,792	5945	2,767	1505	6252	3,842	1544
		3	$y = 0.0003x + 0.4696$	$y = 0.0028x - 16.092$	5460	2,080	6625	2,899	1165	7104	4,494	1422
		Ort.			5048	1,915	6467	2,796	1419	6876	4,199	1611
	MB _{%15C}	1	$y = 8E-05x + 0.2398$	$y = 0.0011x - 13.218$	11592	1,194	13194	1,457	1602	14520	2,678	6091
		2	$y = 0.0001x + 0.4637$	$y = 0.0017x - 22.286$	11844	1,740	14219	2,348	2375	15120	3,844	3906
		3	$y = 9E-05x + 0.4163$	$y = 0.0014x - 17.56$	10608	1,385	13722	2,123	3114	14352	3,353	4220
		Ort.			11348	1,440	13712	1,976	2364	14664	3,292	4739
	MB _{%15K}	1	$y = 1E-04x + 0.3254$	$y = 0.0015x - 17.098$	10632	1,408	12445	2,009	1813	12936	3,102	3017
		2	$y = 8E-05x + 0.4008$	$y = 0.0015x - 19.044$	11112	1,355	13694	1,962	2582	14208	2,858	4253
		3	$y = 0.0001x + 0.4156$	$y = 0.0013x - 15.139$	10920	1,605	12962	2,238	2042	13320	2,888	3226
		Ort.			10888	1,456	13034	2,070	2146	13488	2,949	3499
	MB _{%10T}	1	$y = 0.0001x + 0.5413$	$y = 0.0036x - 30.605$	7332	1,639	8899	2,288	1567	9408	3,615	2414
		2	$y = 0.0001x + 0.3302$	$y = 0.0032x - 25.754$	7104	1,394	8414	1,898	1310	9036	3,239	2600
		3	$y = 0.0001x + 0.3726$	$y = 0.0033x - 25.419$	6684	1,368	8060	1,901	1376	8436	2,824	2581
		Ort.			7040	1,467	8458	2,029	1418	8960	3,226	2532

Tablo 6.32. Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

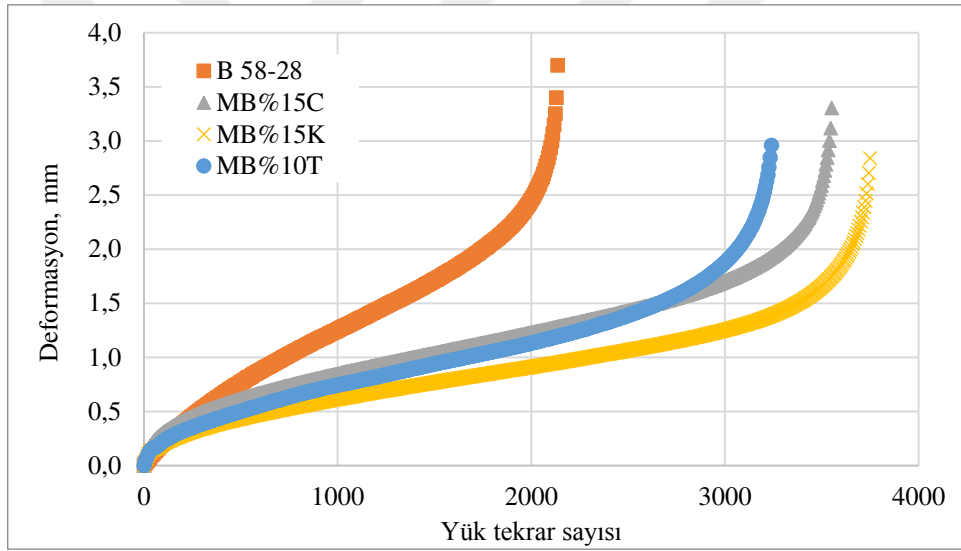
Gerilme Seviyesi	Katkı Türü	Num. No	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N _i	δ_i	N _f	δ_f	N _p	N _{mak}	δ_{mak}	r _p
300 kPa	PG 58-28	1	$y = 0.0009x + 0.4403$	$y = 0.0132x - 22.726$	1248	1,535	1883	2,671	635	1998	3,737	559
		2	$y = 0.0007x + 0.4322$	$y = 0.0128x - 27.61$	1602	1,633	2318	2,678	716	2445	3,779	685
		3	$y = 0.001x + 0.2459$	$y = 0.0146x - 27.732$	1650	1,874	2057	2,663	407	2136	3,696	516
		Ort.			1500	1,681	2086	2,671	586	2193	3,737	587
	MB _{%15C}	1	$y = 0.0004x + 0.3173$	$y = 0.0067x - 19.999$	2676	1,488	3225	2,051	549	3408	2,994	975
		2	$y = 0.0004x + 0.3755$	$y = 0.0104x - 35.006$	2814	1,523	3538	2,421	724	3690	3,694	806
		3	$y = 0.0004x + 0.4631$	$y = 0.0109x - 35.411$	2634	1,491	3417	2,246	783	3552	3,301	1037
		Ort.			2708	1,501	3393	2,239	685	3550	3,330	939
	MB _{%15K}	1	$y = 0.0003x + 0.3324$	$y = 0.0048x - 16.396$	2790	1,247	3717	1,889	927	3948	2,676	1445
		2	$y = 0.0003x + 0.3235$	$y = 0.0084x - 28.952$	2928	1,219	3614	1,891	686	3750	2,838	1021
		3	$y = 0.0003x + 0.4129$	$y = 0.0069x - 21.89$	2694	1,357	3379	1,918	685	3540	2,677	1221
		Ort.			2804	1,274	3570	1,899	766	3746	2,730	1229
	MB _{%10T}	1	$y = 0.0004x + 0.3417$	$y = 0.0113x - 33.646$	2202	1,230	3118	2,134	916	3228	3,033	1013
		2	$y = 0.0004x + 0.3121$	$y = 0.0073x - 20.856$	2262	1,252	3068	2,005	806	3240	2,957	1070
		3	$y = 0.0004x + 0.2981$	$y = 0.007x - 21.687$	2568	1,247	3331	1,967	763	3498	2,908	1060
		Ort.			2344	1,243	3172	2,035	828	3322	2,966	1048

Tablo 6.33. Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

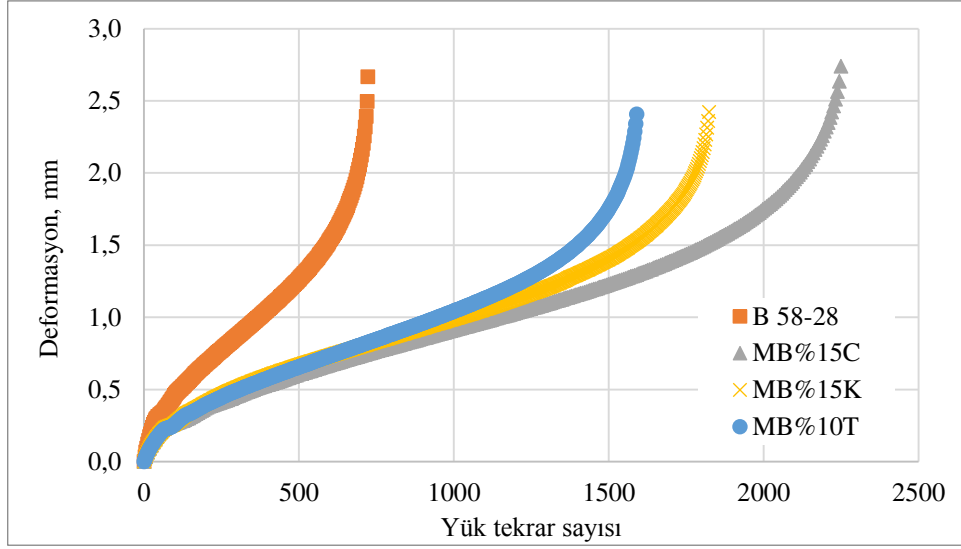
Gerilme Seviyesi	Katkı Türü	Num. No	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N _i	δ_i	N _f	δ_f	N _p	N _{mak}	δ_{mak}	r _f
350 kPa	PG 58-28	1	$y = 0.0021x + 0.2075$	$y = 0.0265x - 16.573$	498	1,259	688	1,973	190	723	2,666	266
		2	$y = 0.0028x + 0.2403$	$y = 0.0147x - 6.7089$	399	1,338	584	2,074	185	642	2,806	251
		3	$y = 0.0019x + 0.3095$	$y = 0.0095x - 5.719$	516	1,290	793	1,999	277	894	2,845	391
		Ort.			471	1,296	688	2,015	217	753	2,772	303
	MB _{%15C}	1	$y = 0.0005x + 0.4511$	$y = 0.0055x - 10.3$	1989	1,538	2150	1,760	161	2313	2,477	726
		2	$y = 0.0006x + 0.3371$	$y = 0.0124x - 22.309$	1545	1,255	1919	1,849	374	2004	2,869	630
		3	$y = 0.0006x + 0.3057$	$y = 0.0055x - 9.8133$	1530	1,251	2065	1,873	535	2250	2,739	860
		Ort.			1688	1,348	2045	1,827	357	2189	2,695	739
	MB _{%15K}	1	$y = 0.0007x + 0.4048$	$y = 0.0069x - 9.6056$	1305	1,292	1615	1,759	310	1740	2,522	663
		2	$y = 0.0007x + 0.3254$	$y = 0.0082x - 12.626$	1347	1,245	1727	1,808	380	1824	2,421	675
		3	$y = 0.0007x + 0.4346$	$y = 0.0039x - 4.868$	1203	1,263	1657	1,756	454	1836	2,323	921
		Ort.			1285	1,267	1666	1,774	381	1800	2,422	753
	MB _{%10T}	1	$y = 0.0008x + 0.2373$	$y = 0.0094x - 12.56$	1071	1,103	1488	1,709	417	1590	2,405	688
		2	$y = 0.0007x + 0.3073$	$y = 0.0085x - 13.277$	1422	1,342	1742	1,844	320	1860	2,680	637
		3	$y = 0.001x + 0.3274$	$y = 0.0086x - 10.472$	1092	1,456	1421	2,062	329	1518	2,722	543
		Ort.			1195	1,300	1550	1,872	355	1656	2,602	623



Şekil 6.48. Karışımların 250 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



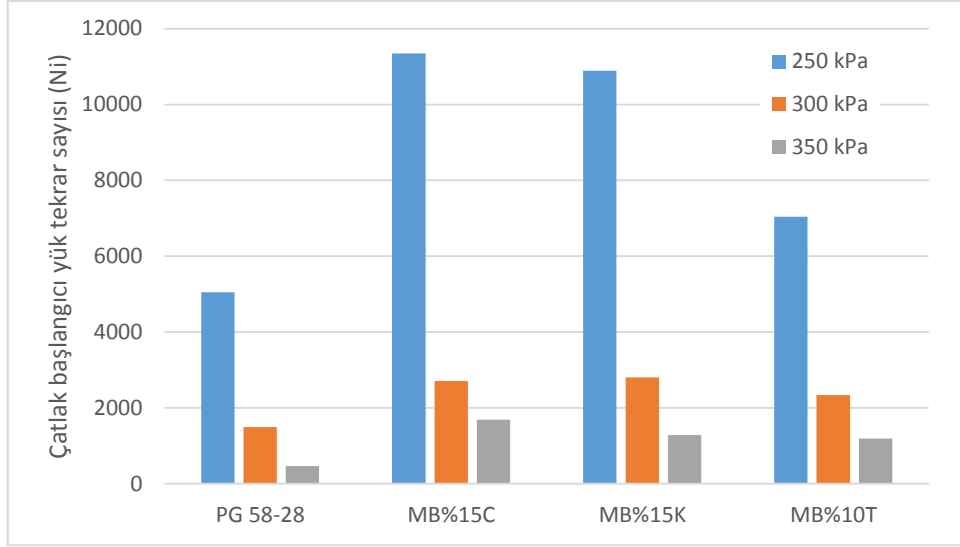
Şekil 6.49. Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 6.50. Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

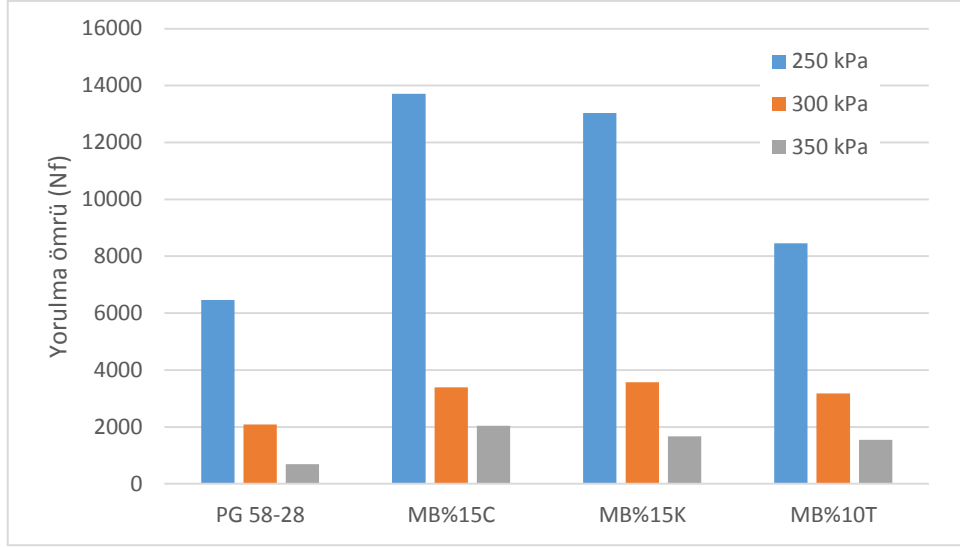
Şekil 6.48-6.50'de görüldüğü üzere numunelerde kırılma meydana gelmesi için en düşük gerekli yük tekrar sayısına PG 58-28 saf karışımı ile hazırlanan karışımların, en yüksek yük tekrarına ise 250 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde MB%15C modifiye bitümü ve 300 kPa gerilme seviyesinde MB%15K ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Uygulanan gerilme arttıkça karışımların yorulma ömürleri sayıları önemli oranda azalmıştır. Deformasyonlar incelendiğinde her gerilme seviyesinde farklı sonuçlar olduğu gerilme seviyesine bağlı olarak düzenli bir değişimin olmadığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra katkı kullanımı ile maksimum yük tekrar sayısındaki deformasyon miktarları azalmıştır. Bu durum, katkı kullanımı ile numunelerin dayanabileceği yük tekrar sayısı artmasına rağmen bitümlü sıcak karışımların esnekliğinin azaldığını dolayısıyla daha gevrek bir kırılmanın olduğunu göstermektedir.

250, 300 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde üç numuneden elde edilen çatlağın oluştuğu yük tekrar sayılarının (N_i) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 6.51'de, yorulma ömrü (N_f) değerlerinin ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 6.52'de, çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı (N_p) değerlerinin ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 6.53'de, maksimum yük tekrar sayılarının (N_{mak}) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 6.54'de verilmiştir.



Şekil 6.51. Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı (N_i) – karışım türü ilişkisi

Şekil 6.51 incelendiğinde bütün gerilme seviyelerinde biyokütlelerin pirolizinden elde edilen biyoçarların katkı malzemesi olarak kullanımı ile çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarının (N_i) arttığı belirlenmiştir. Ayrıca gerilme seviyeleri arttıkça bütün karışımların N_i değerleri azalmıştır. 250 kPa gerilme seviyesinde MB%15C, MB%15K ve MB%10T kullanılması durumunda N_i değerleri saf karışıma göre sırasıyla %124,8; %115,7 ve %39,5 oranlarında artarken, 300 kPa gerilme seviyesinde %80,5; 86,9 ve %56,3 oranlarında artmıştır. 350 kPa gerilme seviyesinde ise ceviz kabuğu, kayısı çekirdeği ve talaş pirolizinden elde edilen biyoçar kullanılan modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların N_i değerlerinde saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların N_i değerlerine göre sırasıyla %258,4; %172,8 ve %153,7 oranlarında artış olduğu görülmüştür. N_i değerlerinden özellikle yüksek gerilme değerlerinde (350 kPa) modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda çatlak oluşması için saf karışıma göre daha fazla yük tekrarı uygulanması gerektiği belirlenmiştir.

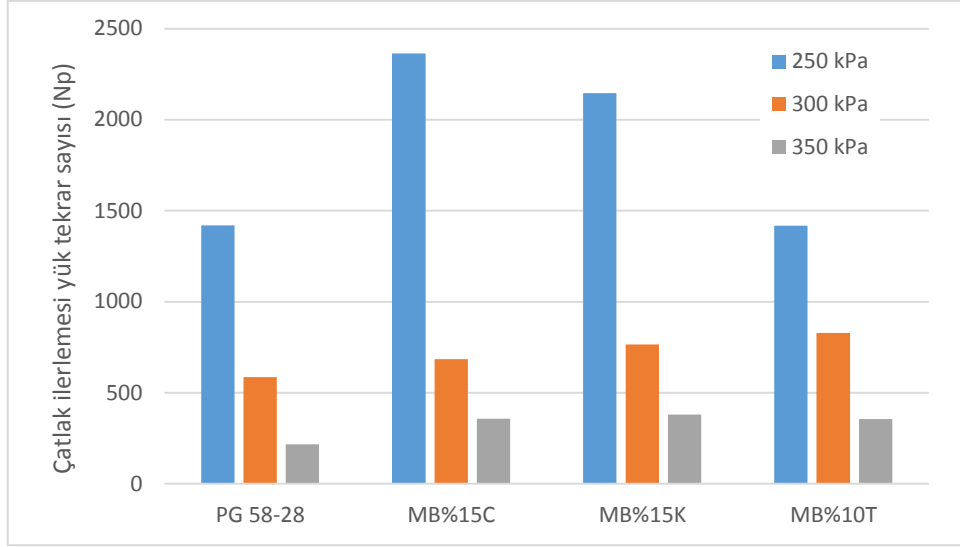


Şekil 6.52. Yorulma ömrü (N_f) – karışım türü ilişkisi

Yük tekrar sayısı deformasyon grafiğinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesim noktalarından elde edilen yorulma ömrü değerlerine göre çizilen grafiklerden, çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarında olduğu gibi katkı kullanımı ile yorulma ömrü (N_f) değerlerinin arttığı, gerilme seviyesi arttıkça ise N_f değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

250 kPa gerilme seviyesinde MB%15C, MB%15K ve MB%10T kullanılması durumunda N_f değerleri saf karışıma göre sırasıyla %112,0; %101,5 ve %30,8 oranlarında artarken, 300 kPa gerilme seviyesinde %62,7; 71,2 ve %52,1 oranlarında artmıştır. 350 kPa gerilme seviyesinde ise ceviz kabuğu, kayısı çekirdeği ve talaş pirolizinden elde edilen biyoçar kullanılan modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların N_f değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın N_f değerinden sırasıyla %197,1; %142,1 ve %125,2 oranlarında artış olduğu görülmüştür.

N_f değerleriyle kıyaslandığında N_f değerleri üzerinde kullanılan katkıların etkinliklerinin azaldığı belirlenmiştir. Katkı maddeleri incelendiğinde etkinliği en az olan katkının bütün gerilme seviyelerinde talaş biyoçarından %10 oranında kullanılması durumunda elde edildiği, etkinliği en fazla olan katkının ise 250 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde ceviz kabuğu biyoçarından %15 oranında, 300 kPa gerilme seviyesinde ise kayısı çekirdeği biyoçarından %15 oranında kullanılması durumunda elde edildiği belirlenmiştir.

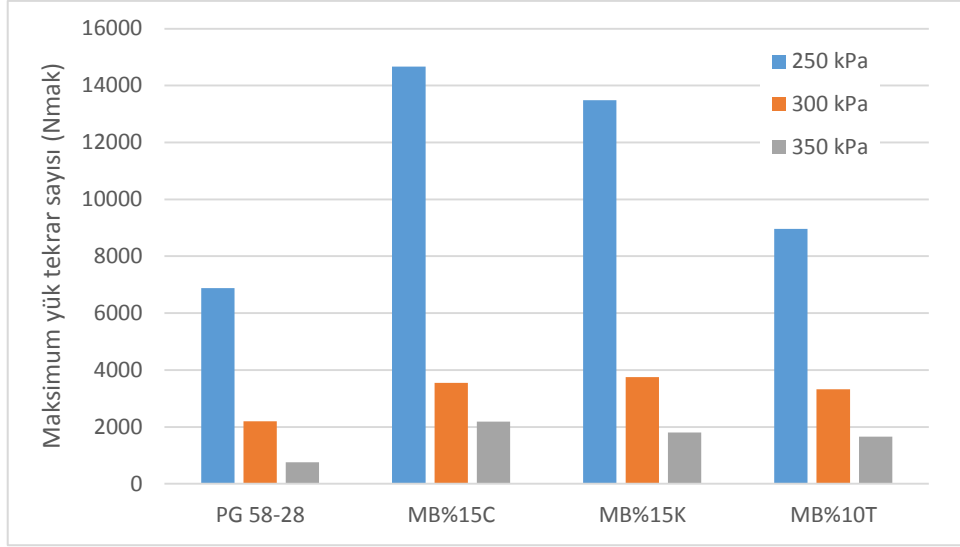


Şekil 6.53. Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N_p) – karışım türü ilişkisi

Şekil 6.53’de görülen çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N_p) değerleri N_f ile N_i değerlerinin farkından elde edilmiştir. 250 kPa gerilme seviyesinde en yüksek N_p değerine MB%15C bağlayıcısı ile hazırlanan karışımın en düşük değerlere ise saf bağlayıcı ve MB%10T bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.

300 kPa gerilme seviyesinde en yüksek değere MB%10T bağlayıcısı ile hazırlanan karışımın, 350 kPa gerilme seviyesinde ise MB%15K bağlayıcısı ile hazırlanan karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. 300 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde en düşük değerlerin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda olduğu gözlenmiştir. 300 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde etkinliği en az olan katkı türünün ise sırasıyla MB%15C ve MB%10T olduğu belirlenmiştir.

Çatlak başlangıcı ile yorulma ömrü arasındaki yük tekrar sayıları incelendiğinde gerilme seviyesi değiştikçe bağlayıcıların etkilerinin değiştiği belirlenmiştir. MB%10T ile hazırlanan karışımların 250 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde en düşük çatlak ilerlemesi yük tekrar sayılarına sahip oldukları tespit edilmiştir.



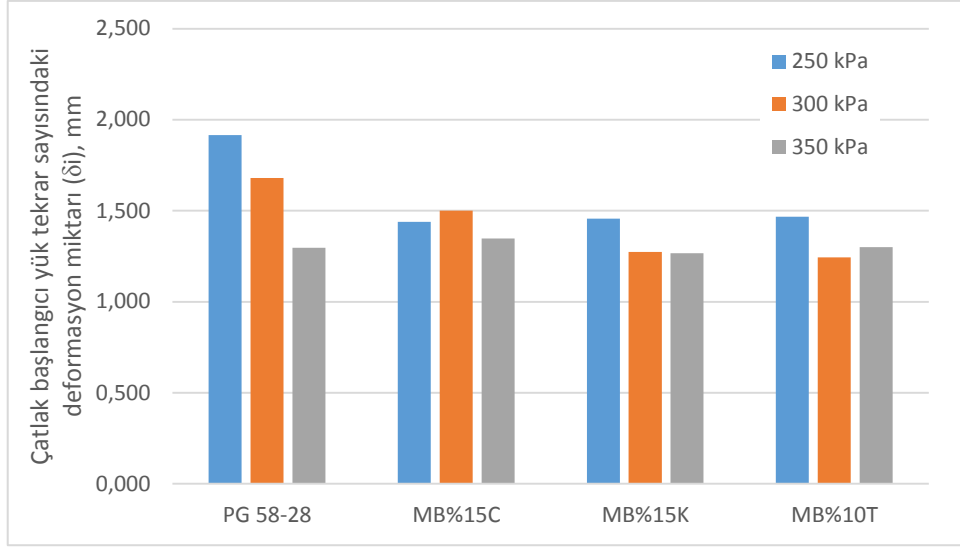
Şekil 6.54. Maksimum yük tekrar sayısı – katkı türü ilişkisi

Şekil 6.54’de görüldüğü üzere, bütün gerilme seviyelerinde katkı kullanımı ile maksimum yük tekrar sayıları artmıştır. 250 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde en etkili bağlayıcıların MB%15C olduğu, 300 kPa gerilme seviyesinde ise MB%15K bağlayıcısı olduğu belirlenmiştir. 250 kPa gerilme seviyesinde MB%15C, MB%15K ve MB%10T kullanılması durumunda N_{mak} değerleri saf karışıma göre sırasıyla %113,3; %96,2 ve %30,3 oranlarında artarken, 300 kPa gerilme seviyesinde %61,9; 70,8 ve %51,5 oranlarında artmıştır.

350 kPa gerilme seviyesinde ise ceviz kabuğu, kayısı çekirdeği ve talaş pirolizinden elde edilen biyoçar kullanılan modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların N_{mak} değerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın N_{mak} değerinden sırasıyla %190,7; %139,0 ve %119,9 oranlarında artış olduğu görülmüştür. Katkı kullanımı ile karışımların N_f değerleri ile N_{mak} değerlerinin değişiminin benzer olduğu belirlenmiştir.

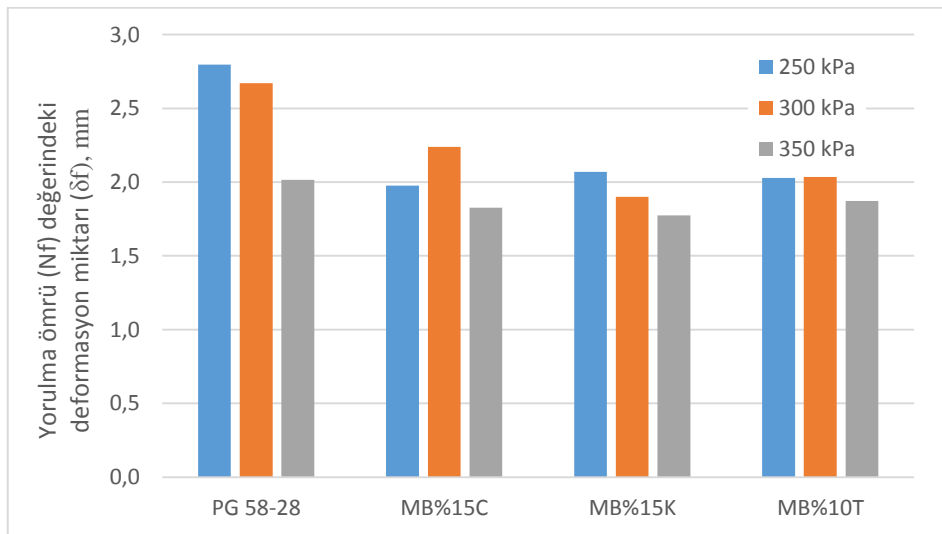
N_i , N_f ve N_{mak} grafikleri birlikte değerlendirildiğinde katkı kullanımı ile karışımların yorulma ömürlerinin arttığı, oranlar değişmesine rağmen 250 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde MB%15C ve 300 kPa gerilme seviyelerinde MB%15K bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların daha yüksek yorulma ömürlerine sahip oldukları, etkinliği en düşük olan katkının ise MB%10T bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çatlak oluşumundaki deformasyon değerlerinin (δ_i) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 6.55’de, yorulma ömrü (N_f) değerindeki deformasyon miktarlarının (δ_f) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 6.56’da, maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarlarının (δ_{mak}) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi ise Şekil 6.57’de verilmiştir.



Şekil 6.55. N_i değerindeki deformasyon miktarı – katkı türü ilişkisi

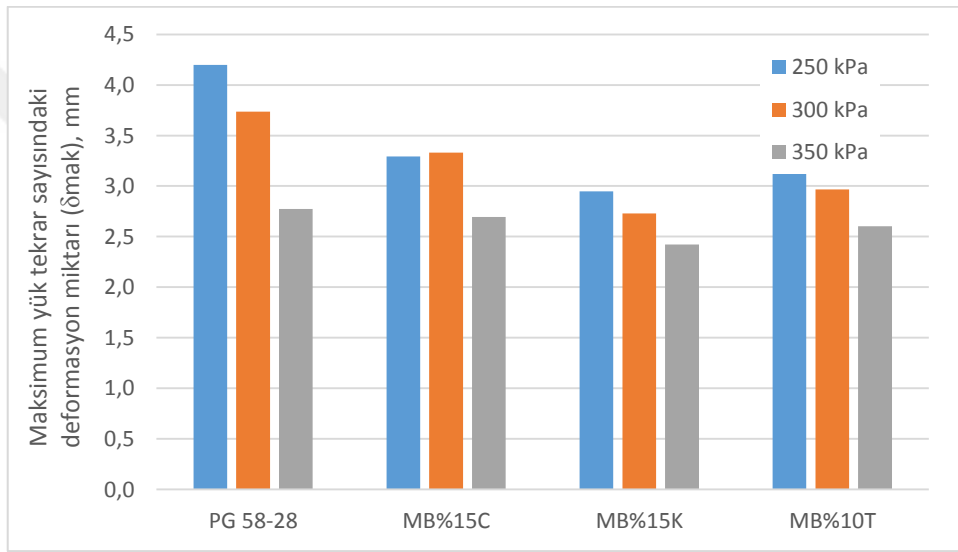
Şekil 6.55’de görüldüğü üzere N_i değerindeki deformasyon miktarlarının (δ_i) katkı kullanımı ile genel olarak azaldığı, gerilme seviyesindeki artış ile düzensiz bir değişimin meydana geldiği gözlenmiştir. 250 ve 300 kPa gerilme seviyelerinde en yüksek δ_i değerlerine saf karışım sahip iken 350 kPa gerilme seviyesinde en yüksek δ_i değerine MB%15C ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük δ_i değerine 250 kPa gerilme seviyesinde MB%15C ile hazırlanan karışımların, 300 kPa gerilme seviyesinde MB%15K ve MB%10T bağlayıcıları ile hazırlanan karışımların, 350 kPa gerilme seviyesinde ise MB%15K bağlayıcısı ile hazırlanan karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle 350 kPa gerilme seviyesinde karışımların δ_i değerlerinin birbirine yakın oldukları gözlenmiştir.



Şekil 6.56. N_f değerindeki deformasyon miktarı – katkı türü ilişkisi

Şekil 6.56’de görülen N_f değerindeki deformasyon miktarları (δ_f) incelendiğinde katkı kullanımı ile δ_i değerlerinde olduğu gibi genel olarak deformasyon miktarlarının azaldığı, gerilme seviyesindeki artış ile düzensiz bir değişimin meydana geldiği gözlenmiştir.

Bütün gerilme seviyelerinde en yüksek δ_f değerine saf karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. En düşük δ_f değerine 250 kPa gerilme seviyesinde MB_{%15C} ile hazırlanan karışımların, 300 kPa ve 350 kPa gerilme seviyelerinde MB_{%15K} bağlayıcıları ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Yorulma ömrü değerlerindeki deformasyon miktarları incelendiğinde katkı kullanımı ile deformasyon değerlerinin azaldığı, özellikle MB_{%15C} ve MB_{%15K} kullanılması ile bu azalmanın daha fazla olduğu belirlenmiştir.



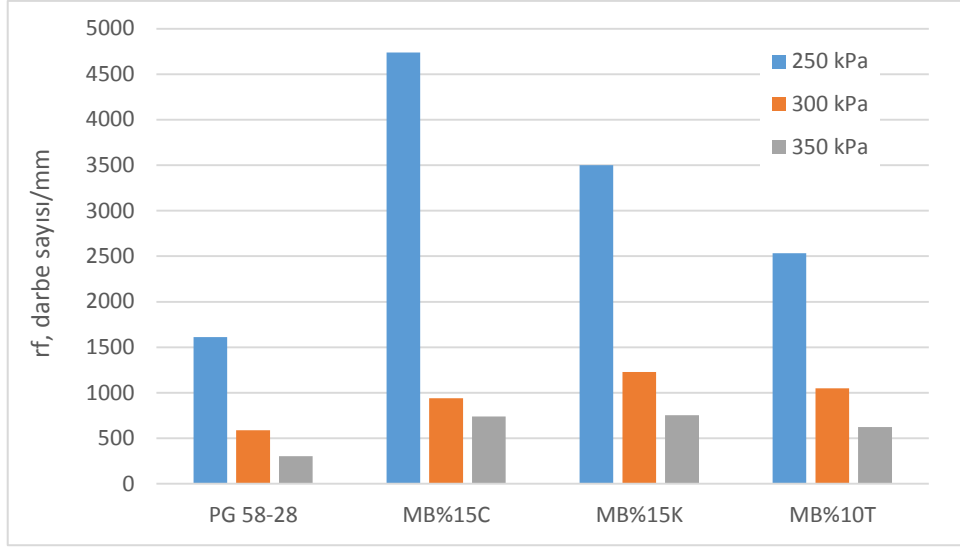
Şekil 6.57. N_{mak} değerindeki deformasyon miktarı – katkı türü ilişkisi

Numunelerin maksimum yük tekrerrür sayısındaki maksimum deformasyon miktarlarının ortalamaları karşılaştırıldığında (Şekil 6.57) katkı kullanımı ile maksimum yük tekrerrür sayısındaki maksimum deformasyon miktarlarının azaldığı belirlenmiştir.

Bütün gerilme seviyelerinde en yüksek δ_{mak} değerine saf karışımın sahip olduğu, en düşük δ_{mak} değerine ise MB_{%15K} kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Gerilmenin değişmesi ile MB_{%15C} ile hazırlanan karışım dışında diğer karışımlarda düzenli bir azalmanın meydana geldiği gözlenmiştir.

Elde edilen δ_i , δ_f ve δ_{mak} değerlerinin katkı kullanımı ile değişimlerinden biyokütlelerden elde edilen tüm biyoçar katkılarının kullanılması ile numunelerde meydana gelen deformasyon miktarlarının azalacağını dolayısıyla daha gevrek bir kırılmanın gözleneceğini göstermektedir.

Çatlak oluşuktan sonra yorulma ömrüne kadar her 1 mm deformasyon için gerekli yük tekrar sayını ifade eden çatlak ilerleme oranı değerlerinin (r_f) katkı kullanımı ile değişimi Şekil 6.58’de verilmiştir.



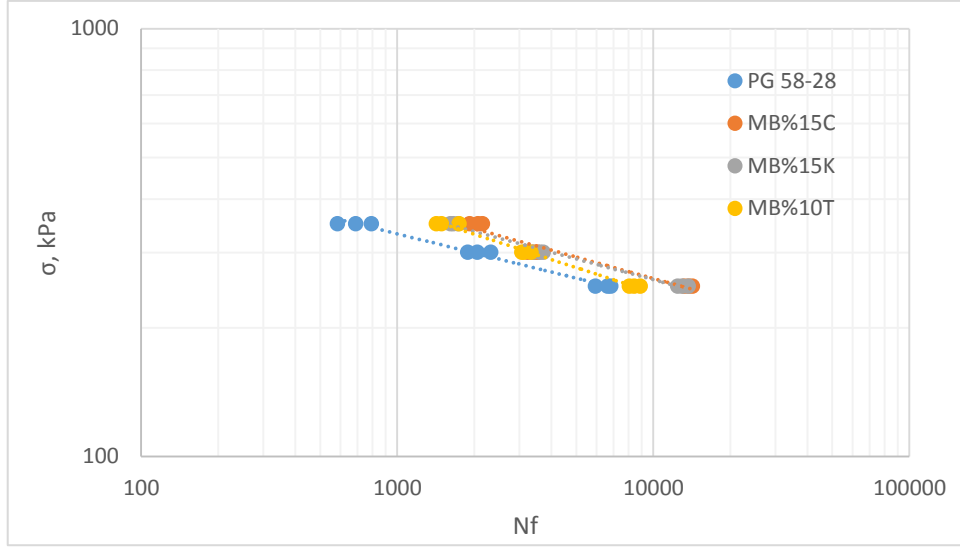
Şekil 6.58. $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı – katkı türü ilişkisi

Şekil 6.58’de görülen $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı (r_f) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi incelendiğinde bütün gerilme seviyelerinde katkı kullanımı ile r_f değerlerinin arttığı, uygulanan gerilmenin artması ile ise bu değer azaldığı belirlenmiştir.

250 kPa gerilme seviyesinde MB_{%15C} içeren karışımların r_f değerinin saf karışımın bu değerine göre %194,1; MB_{%15K} içeren karışımların r_f değerinin saf karışımın bu değerine göre %117,2 ve MB_{%10T} içeren karışımların r_f değerinin saf karışımın bu değerine göre %57,1 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde MB_{%10C}, MB_{%10K} ve MB_{%10T} kullanılan karışımların r_f değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %60,1; %109,5 ve %78,6 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 350 kPa gerilme seviyesinde ise MB_{%10C}, MB_{%10K} ve MB_{%10T} kullanılan karışımların r_f değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %144,1; %148,7 ve %105,7 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlardan gerilmenin artması ile katkılarının etkinliklerinde düzenli bir değişimin oluşmadığını göstermektedir. Çatlak ilerleme oranı değerleri (r_f) göz önünde bulundurulduğunda katkı kullanımı ile karışımların yük tekrarına karşı dayanımlarının artacağı, dolayısıyla BSK’ların yorulma çatlaklarından kaynaklanan yeniden yapım veya rehabilitasyon ihtiyaçlarının geciktirilebileceği söylenebilmektedir.

Yorulma ömrü değerleri kullanılarak ve Wöhler ilişkisinden faydalanılarak çizilen yorulma ömrü eğrileri Şekil 6.58’de gösterilmiştir. Şekil 6.59’daki grafiklerden elde edilen katsayılar Tablo 6.34’te verilmiştir.



Şekil 6.59. Karışımların yorulma ömür diyagramları

Tablo 6.34. Yorulma deneyinden elde edilen değerler

Bağlayıcı türü	Yorulma ömrü, N_f	k_1	k_2	R^2
PG 58-28	$N_f = 6,26E+19 \times \sigma^{-6,66}$	6,26E+19	6,66	0,9878
MB%15C	$N_f = 6,30E+17 \times \sigma^{-5,72}$	6,30E+17	5,72	0,9521
MB%15K	$N_f = 6,60E+18 \times \sigma^{-6,14}$	6,60E+18	6,14	0,9882
MB%10T	$N_f = 1,14E+16 \times \sigma^{-5,06}$	1,14E+16	5,06	0,9912

Şekil 6.59’da görüldüğü üzere MB%15C, MB%15K ve MB%10T modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların yorulma eğrilerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Katkı kullanımı ile yorulma ömürlerinin saf karışıma göre arttığı tespit edilmiştir. Karışımlar içerisinde en düşük yorulma ömrüne saf karışım, en yüksek yorulma ömrüne ise MB%15C modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.

MB%15C ve MB%15K modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların yorulma ömürlerinin çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Yorulma ömür bağıntılarından elde edilen Tablo 6.33’deki veriler incelendiğinde ise karışımlardan elde edilen yük tekrür sayılarının yüksek uyumlulukta olduğu, bütün karışımların belirtme katsayısının (R^2) 0,95’in üzerinde olduğu belirlenmiştir.

6.10. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

Dinamik sünme deneyi, saf karışım, %15 kayısı çekirdeği biyoçarı, %15 ceviz kabuğu biyoçarı ve %10 oranında talaş biyoçarı kullanılarak hazırlanan modifiye bitümler içeren karışımlar üzerinde UMATTA deney aleti kullanılarak uygulanmıştır.

Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların her birinden 3’er adet numune deneye tabi tutulmuştur. Deneyler 50°C deney sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 1., 2. ve 3. kısım

deformasyon bölgelerinin rahatlıkla görülebilmesi amacıyla gerilme seviyesi 500 kPa olarak seçilmiştir [178]. Numunelerin deney sıcaklığına ulaşabilmesi için UTM iklimlendirme kabininin içerisinde deney öncesinde 4 saat koşullandırılmışlardır.

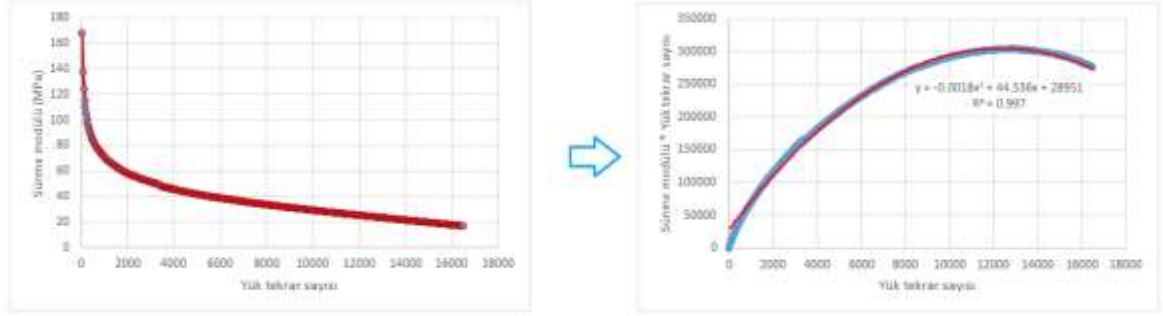
Bu süre sonunda numune, deney aparatına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayar yazılımına girilerek deneye başlanmıştır. Deney numunelere 90 saniye süresince 10 kPa gerilme altında statik bir ön yükleme yapılarak başlamıştır. Yükleme periyodu 1,0 sn olarak alınmıştır. Bu sürenin 500 ms.'si yük etki süresi, 500 ms.'si ise dinlenme süresi olarak seçilmiştir. Numunelerin deneyden sonraki durumları Şekil 6.60'de görülmektedir.



Şekil 6.60. Dinamik sünme deneyi sonrasında numunelerin görünüşü

Dinamik sünme deneyinde numunelerde %5 kalıcı birim şekil değiştirme meydana gelinceye kadar yük tekrarı uygulanmış, toplam kalıcı birim şekil değiştirme, sünme ve esneklik modülü değerleri UMATTA cihazının yazılımı tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır. Akma sayısı değerleri ise Bausano ve Williams tarafından önerilen şekilde hesaplanmıştır [157]. Bausano ve Williams, yapmış oldukları çalışmada 6. derece polinom fonksiyonu uygulandığında “sünme modülü * yük tekrar sayısı – yük tekrar sayısı” grafiğine en uygun denklemin elde edildiğini belirlemişlerdir. Ayrıca çalışmada ikinci derece polinom fonksiyonu uygulandığında da 6. derece polinom fonksiyonundan elde edilen değerlere yakın akma sayısı değerlerinin elde edildiği belirlenmiş ve 2. derece polinom fonksiyonunun da kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu yöntemde düşey ekseninde “sünme modülü * yük tekrar sayısı” yatay ekseninde ise yük tekrar sayısı olacak şekilde grafikler çizilmiştir. Grafiğe 2. derece polinom fonksiyonu uygulanarak eğri modellenmiş

ve modellere uygun denklemler tespit edilmiştir. Denklemin türevi alınıp sıfıra eşitlenerek akma sayısı olarak ifade edilen pik noktaya karşılık gelen yük tekrar sayıları belirlenmiştir. Saf karışımın akma sayısının bulunuşuna bir örnek Şekil 6.61'de görülmektedir.



Şekil 6.61. Saf karışımın akma sayısının bulunmasına bir örnek

Çalışmada %5 kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısı ve akma sayısı dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Karışımlar içerisinde en düşük dayanımı saf karışım göstermiş olup yaklaşık 15.000 yük tekrarında %5 kalıcı birim şekil değiştirme değerine ulaşılmıştır. Bu nedenle bütün karışımları kıyaslayabilmek amacıyla 15.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme, esneklik ve sünme modülü değerleri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6.35'te verilmiştir.

Karışımların %5 ϵ_c değerine kadar kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 6.62'de görülmektedir.

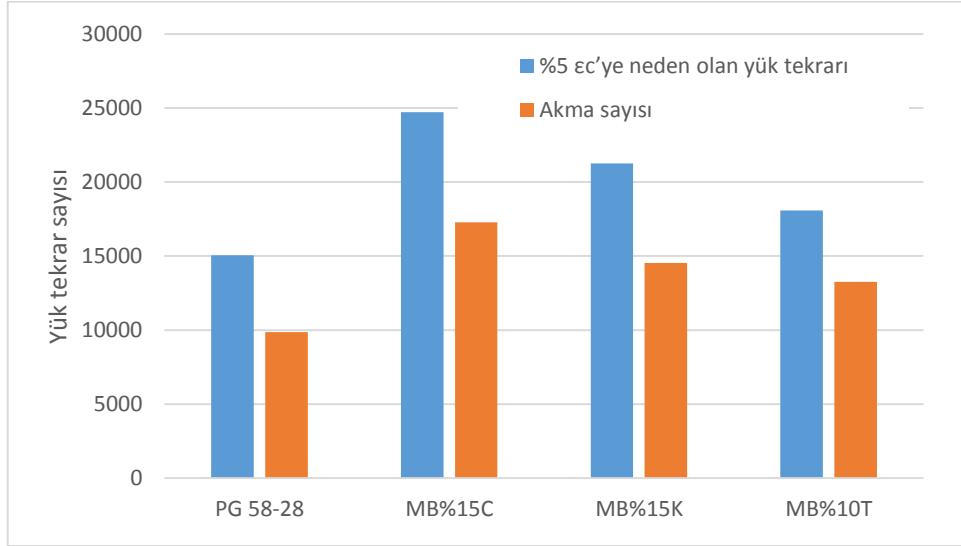
Tablo 6.35. Numunelerin dinamik sünme deney sonuçları

Bağlayıcı türü	Numune No	Akma sayısı denklemi	%5 ϵ_c 'ye Neden Olan Yük Tekrarı	Akma sayısı	15000 yük tekrarındaki ϵ_c , (%)	15000 yük tekrarındaki esneklik modülü (MPa)	15000 yük tekrarındaki sünme modülü (MPa)
PG 58-28	1	$y = -0.0029x^2 + 58.19x + 41573$	15328	10033	4,661	479,8	10,73
	2	$y = -0.0035x^2 + 66.838x + 31541$	14864	9548	5,256	421,8	9,51
	3	$y = -0.0016x^2 + 32.06x + 18430$	14944	10019	5,069	471,6	9,86
	Ort.		15045	9867	4,995	457,7	10,03
MB_{%15C}	1	$y = -0.0017x^2 + 58.967x + 63559$	27040	17343	2,072	583,7	24,13
	2	$y = -0.0008x^2 + 26.531x + 22506$	21248	16582	3,207	537,4	15,59
	3	$y = -0.0008x^2 + 28.649x + 30257$	25856	17906	2,659	569,4	18,80
	Ort.		24715	17277	2,646	563,5	19,51
MB_{%15K}	1	$y = -0.0021x^2 + 60.745x + 75814$	23072	14463	2,298	603,7	21,76
	2	$y = -0.001x^2 + 27.825x + 13223$	19232	13393	3,509	654,9	14,25
	3	$y = -0.0009x^2 + 28.36x + 23692$	21440	15756	3,103	526,4	16,11
	Ort.		21248	14537	2,970	595,0	17,37
MB_{%10T}	1	$y = -0.0023x^2 + 64.524x + 54511$	18624	14027	3,739	574,1	13,37
	2	$y = -0.0018x^2 + 44.536x + 28951$	16480	12371	4,284	515,3	11,67
	3	$y = -0.0016x^2 + 43.947x + 47046$	19136	13373	3,444	538,3	14,52
	Ort.		18080	13257	3,822	542,6	13,19



Şekil 6.62. Karışımların %5 ϵ_c değerine kadar kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi

Karışımların %5 kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısı ve akma sayısı değerleri Şekil 6.63’de, 15.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri Şekil 6.64’te, esneklik modülü değerleri Şekil 6.65’de ve sünme modülü değerleri Şekil 6.66’da görülmektedir.

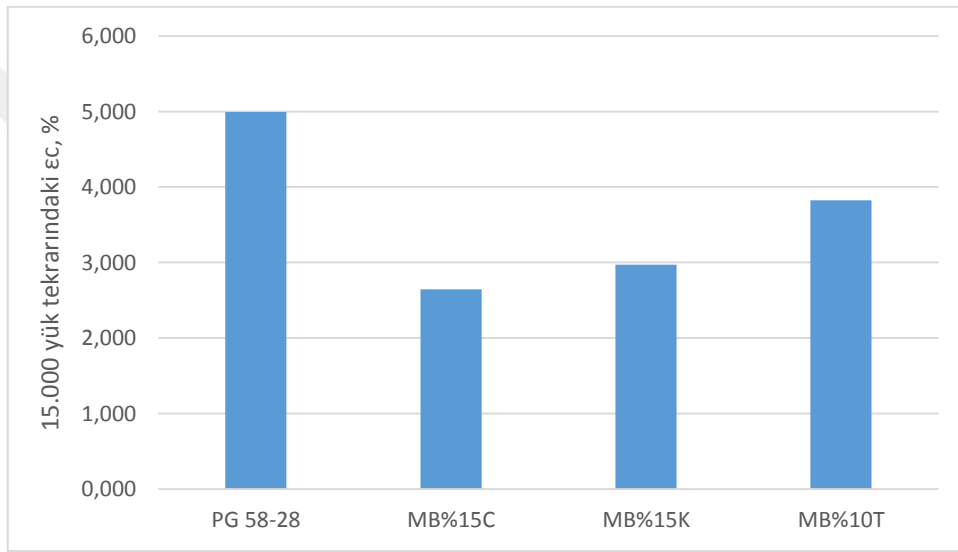


Şekil 6.63. Karışımların %5 kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısı ve akma sayısı değerleri

%5 kalıcı birim şekil değiştirmeye (ϵ_c) neden olan yük tekrarları incelendiğinde katkı kullanımı ile darbe sayısının arttığı, MB%15C modifiye bitümü kullanılan karışımlarda saf karışıma

göre bu değerin %64,3 oranında, MB_{%15K} modifiye bitümü kullanılan karışımlarda %41,2 oranında ve MB_{%10T} modifiye bitümü kullanılan karışımlarda %20,2 oranında arttığı belirlenmiştir.

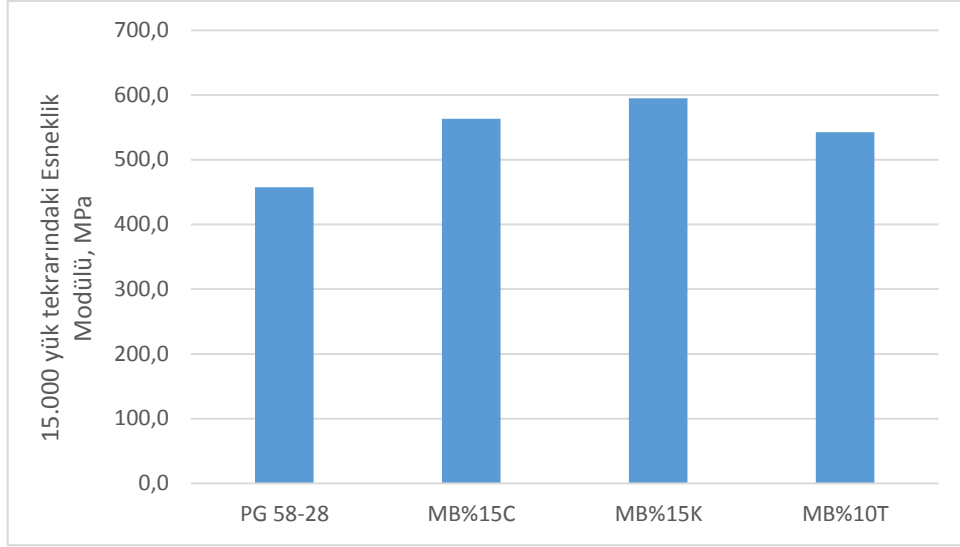
Karışımların akma sayıları incelendiğinde en düşük değere saf karışımın en yüksek değere ise MB_{%15C} kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} bağlayıcıları ile hazırlanan karışımların akma sayısı değerleri saf karışıma göre sırasıyla %75,1; %47,3 ve %34,4 oranında artmıştır. Modifiye bitümler değerlendirildiğinde bütün katkıların bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımlarını artırdığı, etkinliği en yüksek olan modifiye bitümün MB_{%15C} olduğu, etkinliği en düşük olan modifiye bitümün ise MB_{%10T} olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.64. Karışımların 15.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri

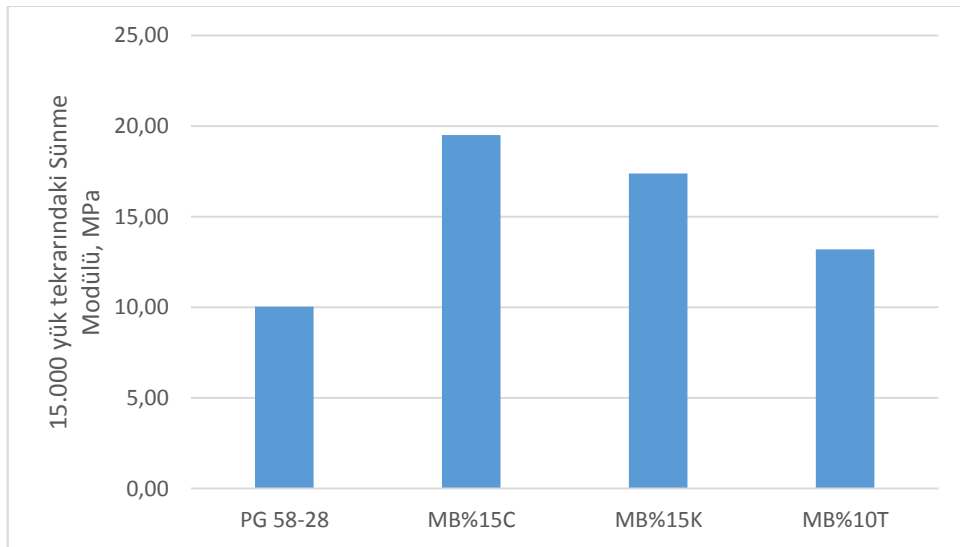
Karışımların 15.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme oranları incelendiğinde katkı kullanımı ile karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. Asfalt karışımlara 15.000 yük tekrarı uygulanması ile en fazla kalıcı birim şekil değiştirme saf karışımda oluşurken en az kalıcı birim şekil değiştirmeye MB_{%15C} modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Katkı maddeleri değerlendirildiğinde en etkili modifiye bitümün MB_{%15C} olduğu, daha sonra MB_{%15K} olduğu ve en az etkili olan modifiye bitümün MB_{%10K} olduğu tespit edilmiştir.

MB_{%15C} ile hazırlanan karışımın 15.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerinin saf karışıma göre %47,0; MB_{%15K} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda bu azalma %40,5 ve MB_{%10T} ile hazırlanan karışımlarda %23,5 oranında meydana gelmiştir.



Şekil 6.65. Karışımların 15.000 yük tekrarındaki esneklik modülü değerleri

Elastikiyetin bir göstergesi olan esneklik modülü değerleri incelendiğinde ise en yüksek esneklik modülü değerine MB_{%15K} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın en düşük esneklik modülü değerine ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların 15.000 yük tekrarındaki esneklik modülü değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %23,1; %30,0 ve %18,5 oranlarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, en düşük elastik davranışı MB_{%15K} ile hazırlanan karışımların sonrasında MB_{%15C} ile hazırlanan karışımın ve MB_{%10T} ile hazırlanan karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. Karışımlar içerisinde en fazla elastik davranışı saf karışımın gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 6.66. Karışımların 15.000 yük tekrarındaki sünme modülü değerleri

Sünme modülü değerleri gerilmenin kalıcı birim şekil değiştirme değerlerine oranlanması ile elde edilmektedir. Bu nedenle Şekil 6.64’de verilen kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin düşük olduğu karışımların sünme modülü değerleri yüksek çıkmıştır. Şekil 6.66’da görüldüğü üzere en yüksek sünme modülü değerine dolayısıyla en yüksek kalıcı deformasyon karşı dayanıma MB_{%15C} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların, en düşük değere dolayısıyla kalıcı deformasyon oluşumuna karşı en düşük dayanıma saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların 15.000 yük tekrarındaki sünme modülü değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %94,4; %73,1 ve %31,4 oranlarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Dinamik sünme deneylerinden elde edilen %5 kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayıları, akma sayıları, sünme modülü değerleri incelendiğinde katkı kullanımı ile karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımının önemli oranda arttığı belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde kalıcı deformasyon oluşumuna karşı en fazla dayanımı arttıran modifiye bitümün ceviz kabuğu biyoçarından %15 oranında kullanılan modifiye bitüm olduğu, en az arttıran katkının ise talaş biyoçarından %10 oranında kullanıldığı modifiye bitüm olduğu belirlenmiştir.

Elastik modül değerlerinden katkı kullanımı ile karışımların elastik davranışının azaldığı belirlenmiştir. Esnekliği en düşük olan karışımın MB_{%15K} modifiye bitümü ile hazırlanan karışım olduğu tespit edilmiştir.

6.11. Karışımların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi

Çalışmada, elastik-plastik kırılma mekaniği (EPKM) prensibine göre deneyler yapılarak karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımları değerlendirilmiştir. EPKM yaklaşımına göre yarım daire numuneler 25°C sıcaklıkta 0,5 mm/dak. deformasyon hızında kırılmıştır. Çalışmada, saf karışım, MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımlar hazırlanarak yoğurmalı pres ile 150 mm çapında, yaklaşık 5 cm yüksekliğe ve % 4±1 boşluk oranına sahip olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Numuneler, döner testere ile yarım daire şekline sahip iki parçaya bölünmüştür (Şekil 6.67). Ardından tezgah tipi testere kullanılarak numunelere 1, 2 ve 3 cm yüksekliğinde çentikler açılmıştır.



Şekil 6.67. Döner testere ile numunelerin yarım daire şeklinde kesilmesi

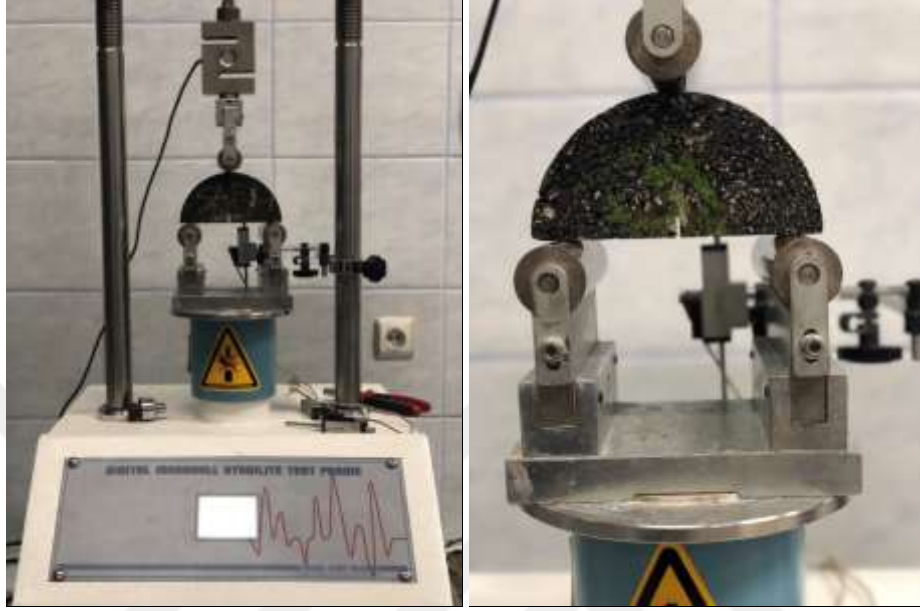
Numuneler kesilirken ısınmayı engellemek amacıyla su ile soğutulduğundan kesme işleminden sonra 2 gün oda şartlarında güneş görmeyecek şekilde kurumaya bırakılmıştır. Ağırlık kontrolü ile 2 günlük beklemenin kuruma için yeterli olduğu belirlenmiştir. 1, 2 ve 3 cm çentik derinliğine sahip numuneler elastik-plastik kırılma mekaniği yaklaşımlarına uygun olarak J-integral deneyine tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin bir kısmı ile 1-2 ve 3 cm çentik içeren numuneler Şekil 6.68’de verilmiştir.



Şekil 6.68. Deney numunelerine çentik açılması ve değişik yükseklikte çentiğe sahip numuneler

Deneylerde hızı ayarlanabilen Marshall stabilite aleti kullanılmıştır. Cihaz 50 kN kapasiteli olup hızı 0,000 ile 75,000 aralığında ayarlanabilmektedir. Dijital ekranı sayesinde hız ayarlanabilmekte, geri kalan bütün kontrol cihazın kendi yazılımından yapılabilmektedir. Cihazda

bulunan veri toplama sistemi sayesinde her bir değerden saniyede yaklaşık 10 veri bilgisayara aktarılabilmektedir. Cihaz ve deney düzeneği Şekil 6.69’da, dijital ekran ise Şekil 6.70’de görülmektedir.



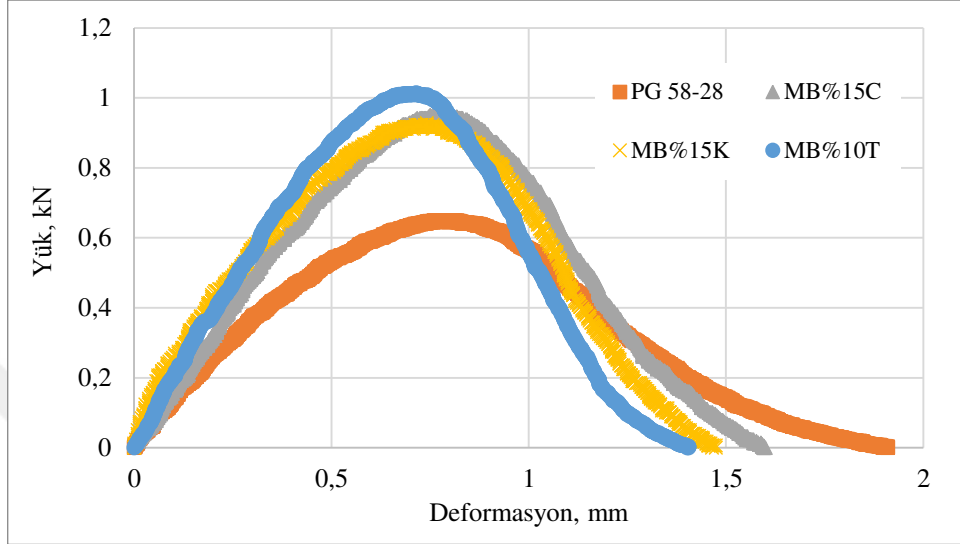
Şekil 6.69. Yarım daire eğilme deney düzeneği



Şekil 6.70. Hızı ayarlanabilir Marshall cihazının dijital göstergesi

Kısa dönem yaşlandırılmış, saf karışım, MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} modifiye bitümleri ile hazırlanan karışım numunelerinden 1, 2 ve 3 cm çentik yüksekliğine sahip üçer numune 4 saat süresince 25°C sıcaklığa sahip hava sirkülasyonlu etüvde bekletilmiştir. Ardından yükleme aletinde 0,5 mm/dak yükleme hızında kırılmıştır. Deney süresince hızı ayarlanabilir Marshall cihazında bulunan veri toplama sistemi sayesinde her saniyedeki düşey deformasyon ve yük değerleri elde edilmiştir. Bu değerler yardımıyla çizilen yük–deformasyon eğrilerinden maksimum yük–

deformasyon eğrisi altında kalan alan (kırılmaya neden olan toplam şekil değiştirme enerjisi) elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen verilere örnek olarak 1 cm çentiğe sahip numunelerin yük–deformasyon eğrileri Şekil 6.71’de verilmiştir.



Şekil 6.71. 1 cm çentiğe sahip numunelerin yük deformasyon ilişkisi

1, 2 ve 3 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelere uygulanan deneylerden elde edilen değerler sırasıyla Tablo 6.36, Tablo 6.37 ve Tablo 6.38’de verilmiştir.

Numunelerden elde edilen maksimum yük değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi Şekil 6.72’de, maksimum yüke ulaşıldığı andaki deformasyon miktarlarının katkı içeriğiyle değişimi Şekil 6.73’de, maksimum yüke kadarki yük–deformasyon eğrisi altındaki alanın katkı içeriğiyle değişimi Şekil 6.74’te, maksimum yükten yük boşalınca kadarki yük-deformasyon eğrisi altındaki alanın katkı kullanımıyla değişimi Şekil 6.75’de, yük boşaldığı andaki deformasyonun katkı kullanımıyla değişimi Şekil 6.76’da ve yük–deformasyon eğrisi altındaki toplam alanın katkı kullanımıyla değişimi Şekil 6.77’de verilmiştir.

Tablo 6.36. Kısa dönem yaşlandırılmış 1 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları

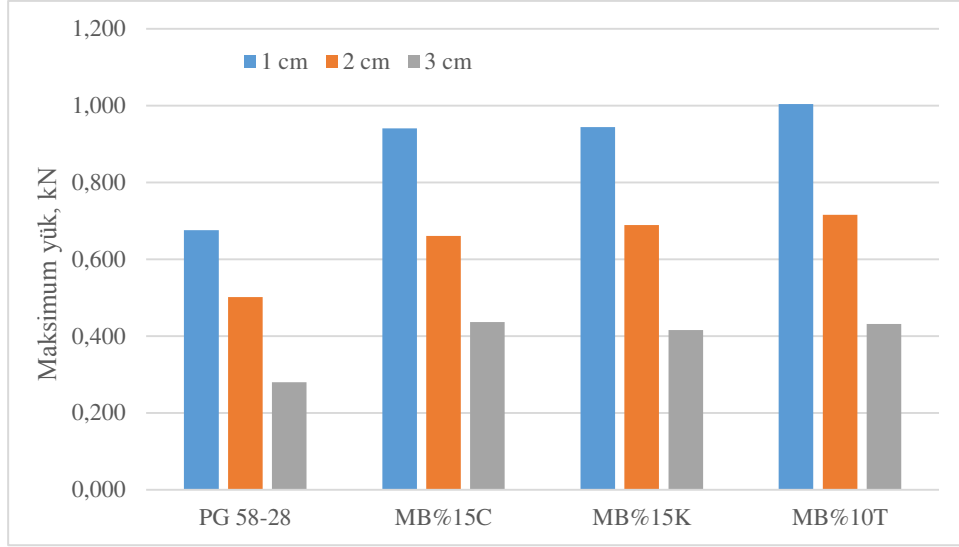
Bağlayıcı türü	Numune no	h_{ort} (mm)	Mak. yük (N)	δ_{mak} (mm)	Maksimum yüke kadarki alan (N.mm)	Maksimum yükten yük boşalınca kadarki alan (N.mm)	Yük boşaldığı andaki deformasyon (mm)	Toplam Alan (N.mm)
Saf	1	49,94	696,56	0,7948	321,99	311,54	2,0600	633,53
	2	50,19	648,14	0,7807	305,33	339,00	1,9099	644,33
	3	50,27	681,37	0,8546	340,76	273,18	1,6810	613,94
	Ort.		675,36	0,8100	322,69	307,91	1,8836	630,60
MB _{%15C}	1	49,92	954,83	0,7804	428,30	394,14	1,5994	822,43
	2	49,84	925,03	0,764	447,12	347,95	1,4810	795,07
	3	49,89	942,43	0,7661	409,76	366,47	1,4286	776,23
	Ort.		940,76	0,7702	428,39	369,52	1,5030	797,91
MB _{%15K}	1	50,31	942,41	0,7474	412,05	328,15	1,4702	740,21
	2	50,53	927,51	0,760412	446,21	347,24	1,4740	793,45
	3	50,32	962,64	0,7857	430,58	360,59	1,4316	791,16
	Ort.		944,19	0,7645	429,61	345,33	1,4586	774,94
MB _{%10T}	1	50,10	964,76	0,7222	409,92	345,62	1,5679	755,54
	2	50,16	1013,18	0,7225	438,86	321,99	1,4047	760,85
	3	49,77	1034,53	0,7294	456,81	356,80	1,5514	813,60
	Ort.		1004,16	0,7247	435,19	341,47	1,5080	776,66

Tablo 6.37. Kısa dönem yaşlandırılmış 2 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları

Bağlayıcı türü	Numune no	h_{ort} (mm)	Mak. yük (N)	δ_{mak} (mm)	Maksimum yüke kadarki alan (N.mm)	Maksimum yükten yük boşalınca kadarki alan (N.mm)	Yük boşaldığı andaki deformasyon (mm)	Toplam Alan (N.mm)
Saf	1	50,23	485,17	0,6457	188,72	163,85	1,8324	352,57
	2	50,54	503,79	0,6640	201,33	124,48	1,6722	325,81
	3	50,36	514,61	0,6324	195,17	145,90	1,5066	341,08
	Ort.		501,19	0,6474	195,08	144,75	1,6704	339,82
MB _{%15C}	1	50,05	670,80	0,6743	271,75	242,85	1,3287	514,60
	2	49,77	651,96	0,6876	269,06	224,74	1,3022	493,80
	3	50,12	659,62	0,6727	266,18	219,74	1,2763	485,92
	Ort.		660,79	0,6782	269,00	229,11	1,3024	498,11
MB _{%15K}	1	49,85	691,18	0,6459	268,05	217,14	1,2895	485,19
	2	50,35	678,99	0,6247	255,16	233,13	1,3056	488,29
	3	49,88	696,26	0,6433	268,29	202,31	1,2949	470,59
	Ort.		688,81	0,6380	263,83	217,53	1,2967	481,36
MB _{%10T}	1	49,91	707,05	0,6156	261,28	203,57	1,3020	464,85
	2	50,23	719,44	0,6100	263,34	218,10	1,2934	481,44
	3	50,34	721,13	0,6097	264,04	216,68	1,2869	480,72
	Ort.		715,87	0,6118	262,89	212,78	1,2941	475,67

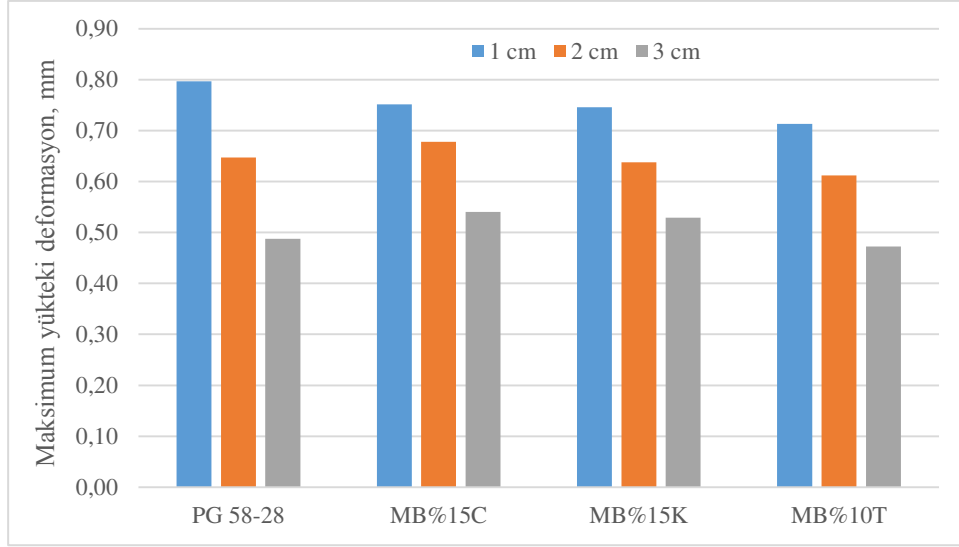
Tablo 6.38. Kısa dönem yaşlandırılmış 3 cm. çentik yüksekliğine sahip numunelerin EPKM deney sonuçları

Bağlayıcı türü	Numune no	h_{ort} (mm)	Mak. yük (N)	δ_{mak} (mm)	Maksimum yüke kadarki alan (N.mm)	Maksimum yükten yük boşalınca kadarki alan (N.mm)	Yük boşaldığı andaki deformasyon (mm)	Toplam alan (N.mm)
Saf	1	50,34	279,16	0,4865	81,57	83,07	1,4236	164,64
	2	49,96	274,36	0,4932	81,12	75,45	1,4005	156,57
	3	50,08	285,71	0,4821	82,83	75,39	1,3298	158,22
	Ort.		279,74	0,4873	81,84	77,97	1,3846	159,81
MB _{%15C}	1	50,32	441,52	0,5386	142,70	106,19	1,2564	248,89
	2	50,12	437,21	0,5311	139,43	110,32	1,2213	249,75
	3	50,11	429,79	0,5503	141,82	93,65	1,3041	235,47
	Ort.		436,18	0,5400	141,32	103,39	1,2606	244,70
MB _{%15K}	1	50,36	410,77	0,5184	128,06	98,87	1,2649	226,93
	2	50,15	421,51	0,5320	134,55	96,26	1,1896	230,81
	3	50,24	415,05	0,5371	133,86	91,78	1,2368	225,64
	Ort.		415,78	0,5292	132,16	95,63	1,2304	227,79
MB _{%10T}	1	50,09	437,19	0,4798	125,92	106,67	1,1764	232,59
	2	50,19	431,45	0,4652	120,35	96,86	1,1965	217,21
	3	50,14	425,61	0,4723	120,67	88,21	1,2063	208,87
	Ort.		431,41	0,4724	122,31	97,24	1,1931	219,56



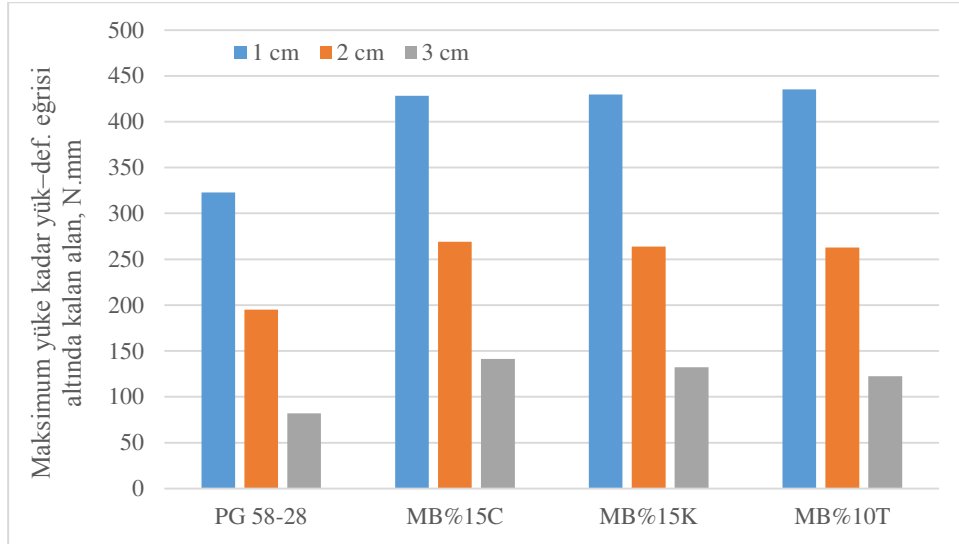
Şekil 6.72. Maksimum yük – katkı türü ilişkisi

Şekil 6.72’de görüldüğü üzere bütün çentik derinliklerinde katkı kullanımı ile elde edilen maksimum yük değerleri artmıştır. Ayrıca çentik yüksekliği arttıkça maksimum yük değerleri azalmıştır. 1 cm çentik derinliğinde MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} bağlayıcı kullanılması durumunda saf karışıma göre %39,3; %39,8 ve %48,7 yük artışı meydana gelmiştir. 2 cm çentik derinliğinde ise MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} bağlayıcı kullanılması durumunda saf karışıma göre %31,8; %37,4 ve %42,8 artış meydana gelmiştir. 3 cm çentik derinliğinde ise MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} bağlayıcı kullanılması durumunda saf karışıma göre %55,9; %48,6 ve %54,2 artış meydana gelmiştir. 1 ve 2 cm çentik derinliğinde en etkin katkının talaş biyoçarından %10 oranında kullanılması durumunda elde edildiği, 3 cm çentik derinliğinde ise ceviz kabuğu biyoçarından %15 oranında kullanılması durumunda elde edildiği belirlenmiştir.



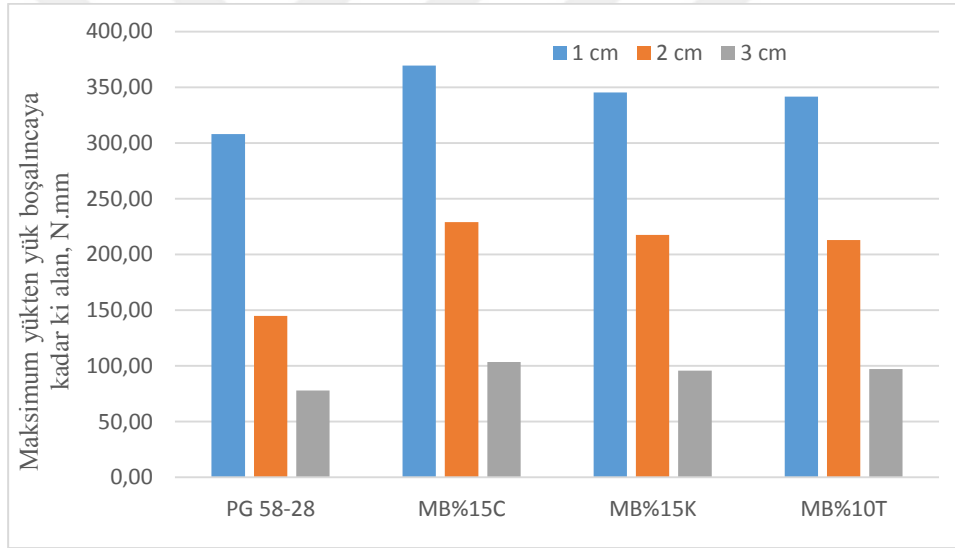
Şekil 6.73. Maksimum yük anındaki deformasyon – katkı türü ilişkisi

Şekil 6.73’de görülen maksimum yükteki deformasyon değerleri incelendiğinde 1 çentik derinliğinde en yüksek maksimum yükteki deformasyon değerlerine saf karışımın, 2 ve 3 cm çentik derinliklerinde MB%15C ile hazırlanan karışımların sahip olduğu görülmektedir. Bütün çentik derinliklerinde en düşük maksimum yük anındaki deformasyon değeri MB%10T bağlayıcısı ile hazırlanan karışımdan elde edilmiştir.



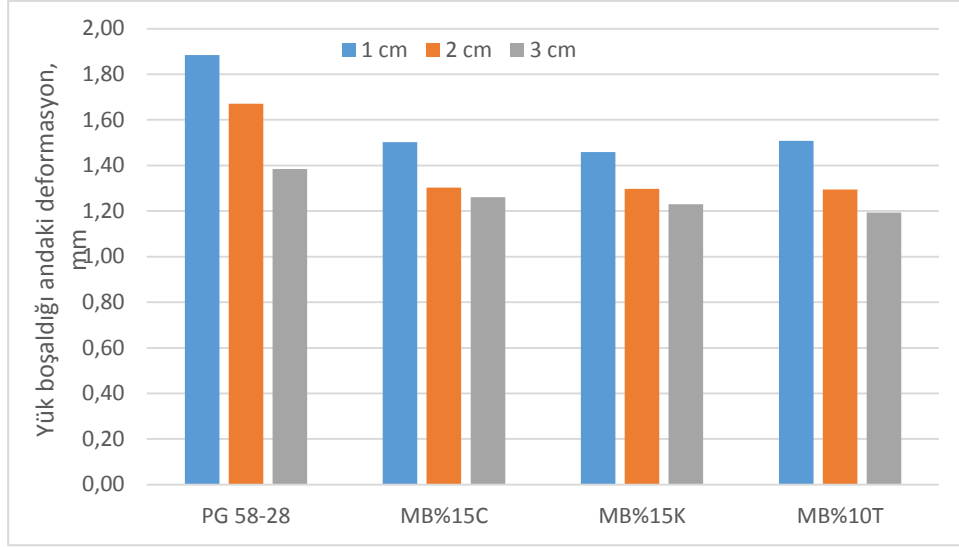
Şekil 6.74. Maksimum yüke kadar yük–deformasyon eğrisi altında kalan alan–katkı türü ilişkisi

Maksimum yük değerine kadar yük–deformasyon eğrisi altında kalan alanın katkı kullanımı ile değişimi incelendiğinde bütün çentik derinliklerinde en düşük alan değerine saf bağlayıcı kullanılan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 1 cm çentik derinliğinde bütün modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların benzer değere sahip olduğu, 2 ve 3 cm çentik derinliklerinde en yüksek değere MB_{%15C} kullanılan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. 1 cm çentik derinliğinde MB_{%15C}, MB_{%15C} ve MB_{%10T} bağlayıcı kullanılması durumunda maksimum yüke kadar yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan değeri saf karışıma göre %32,8; %33,1 ve %34,9 artış meydana gelmiştir. 2 cm çentik derinliğinde ise MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} bağlayıcı kullanılması durumunda saf karışıma göre %37,9; %35,2 ve %34,8 artış meydana gelmiştir. 3 cm çentik derinliğinde ise MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} bağlayıcı kullanılması durumunda saf karışıma göre %72,7; %61,5 ve %49,4 artış meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlardan çentik derinliği arttıkça katkıların etkinliğinin arttığı belirlenmiştir.



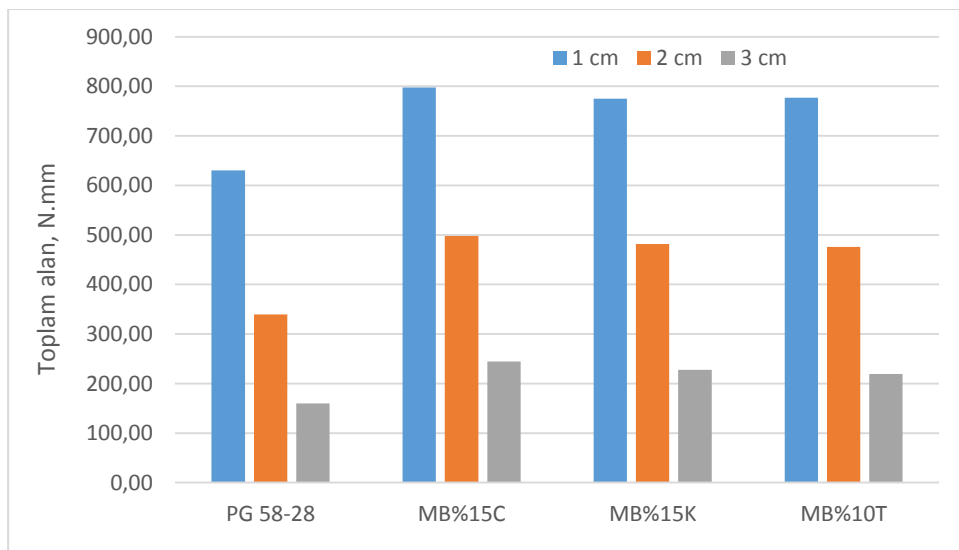
Şekil 6.75. Maksimum yükten yük boşalınca kadar yük – deformasyon eğrisi altında kalan alan – katkı türü ilişkisi

Şekil 6.75’de görülen maksimum yükten sonraki alan değerleri incelendiğinde bütün çentik derinliklerinde en yüksek değere MB_{%15C} bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların, en düşük değere ise saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum maksimum taşıma gücünden sonra depolanan enerji değerlerinin MB_{%15C} ile hazırlanan karışımlarda en fazla olacağını, saf karışımda ise en düşük oranda olacağını göstermektedir.



Şekil 6.76. Yüken boşaldığı andaki deformasyon – katkı türü ilişkisi

Yüken boşaldığı andaki deformasyon değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi (Şekil 6.76) incelendiğinde bütün çentik yüksekliklerinde katkı kullanımı ile deformasyon miktarlarının azaldığı, en yüksek deformasyon değerine saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük deformasyon değerine ise 1 cm çentik yüksekliğinde MB%15K bağlayıcısı ile hazırlanan karışımın, 2 ve 3 cm çentik yüksekliklerinde MB%10T bağlayıcısı ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum saf karışımın daha yüksek deformasyon değerinde yük taşımaya devam etmesine rağmen daha düşük deformasyon değerlerinde katkı içeren karışımların yük taşıma kapasitesinin sonlandığını göstermektedir.



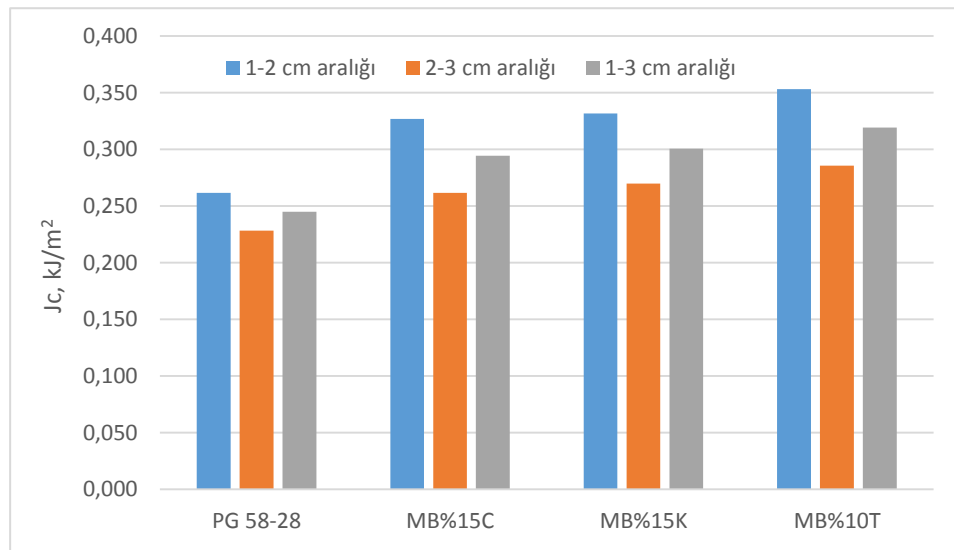
Şekil 6.77. Yük – deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan – katkı türü ilişkisi

Yük-deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan değerleri incelendiğinde en yüksek toplam alan değerlerine bütün çentik yüksekliklerinde MB_{%15C} bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların, en düşük değerlere ise saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. 1 cm çentik derinliğinde MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} bağlayıcı kullanılması durumunda yük-deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan değerlerinde saf karışıma göre %26,5; %22,9 ve %23,2 artış meydana gelmiştir. 2 cm çentik derinliğinde ise MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} bağlayıcı kullanılması durumunda saf karışıma göre %46,6; %41,7 ve %40,0 artış meydana gelmiştir. 3 cm çentik derinliğinde ise MB_{%15C}, MB_{%15K} ve MB_{%10T} bağlayıcıları kullanılması durumunda saf karışıma göre %53,1; %42,5 ve %37,4 artış meydana gelmiştir. Bu durum modifiye bağlayıcı içeren karışımların daha düşük deformasyon değerlerinde yük taşıma kabiliyetleri sonlanmasına rağmen daha fazla depolanan enerjiye sahip olduklarını dolayısıyla çatlak ilerleyişi için daha fazla enerji gerektiğini ifade etmektedir.

Denklemler yardımıyla kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri belirlenmiştir. Çalışmada 1–2 cm çentik yükseklikleri, 2–3 cm çentik yükseklikleri ve 1–3 cm çentik yükseklikleri aralıkları kullanılarak kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen değerler Tablo 6.39’da ve Şekil 6.77’de verilmiştir.

Tablo 6.39. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanmış numunelerin J_c değerleri

Bağlayıcı Türü	1–2 cm arası J_c değerleri (kJ/m ²)	2–3 cm arası J_c değerleri (kJ/m ²)	1–3 cm arası J_c değerleri (kJ/m ²)
PG 58-28	0,261	0,228	0,245
MB _{%15C}	0,327	0,262	0,294
MB _{%15K}	0,331	0,270	0,301
MB _{%10T}	0,353	0,286	0,319



Şekil 6.78. Karışımların J_c değerleri

Şekil 6.78 incelendiğinde bütün çentik aralıklarında en yüksek J_c değerine MB_{%10T} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın, en düşük J_c değerine ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 1-2 cm çentik derinliğinde MB_{%10T} ile hazırlanan karışımın J_c değerinin saf karışımdan %35,00; 2-3 cm çentik derinliğinde MB_{%10T} ile hazırlanan karışımın J_c değerinin saf karışıma göre %25,10 ve 1-3 cm çentik derinliğinde MB_{%10T} ile hazırlanan karışımın J_c değerinin saf karışımdan %30,39 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Karışım numunelerinin kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri incelendiğinde biyokütlelerin pirolizinden elde edilen biyoçarların bitüm modifikasyonunda kullanılması ile karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarının artacağı söylenebilmektedir. Maksimum yük ve alan değerlerinde talaş biyoçarından %10 oranında kullanılan modifiye bitümün etkinliğinin az olmasına rağmen J_c değerleri üzerinde bu modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların daha olumlu sonuç vermesine sadece J_c hesaplanmasında numune yüksekliklerinin dikkate alınması neden olmuştur. Her ne kadar bütün numuneler yaklaşık 50 mm kalınlığında hazırlanmasına rağmen MB_{%10T} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların kalınlıklarının daha az olması bu katkının daha etkin olmasına neden olmuştur. Elde edilen bütün sonuçlar değerlendirildiğinde bitüm modifikasyonunda biyoçar kullanılması ile karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarının artacağı, en etkin katkının talaş biyoçarından %10 oranında kullanılması durumunda elde edileceği tespit edilmiştir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, üç farklı biyokütlenin (öğütülmüş kayısı çekirdeği kabuğu, öğütülmüş ceviz kabuğu ve talaş) pirolizinden elde edilen biyoçarların bitümlü bağlayıcı ve bitümlü sıcak karışımların performanslarına etkileri araştırılmıştır. Temin edilen biyoküteller No.50 (0.30 mm) elekten elenmiş ve elek altında kalan malzeme piroliz işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmada, ÖYP desteği ile özel tasarlanarak yaptırılan yavaş piroliz sistemi kullanılmıştır. Piroliz şartları biyoçarın kimyasal yapısına etki ettiğinden öncelikle 400°C, 500°C ve 600°C sıcaklıklarda piroliz işlemi gerçekleştirilmiş, elde edilen biyoçarlar ile modifiye bitümler hazırlanarak reolojik özellikleri DSR deneyi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan 400°C'nin piroliz işlemi için en uygun sıcaklık olduğu tespit edilmiştir. Ön çalışmada biyoçarlar bitüm ağırlığınca %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılmış yapılan DSR ve bağlayıcı deneyleri sonucunda öğütülmüş ceviz kabuğu ve kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarından %15, talaş biyoçarından ise %10 oranında bitümlü sıcak karışım deneylerinde kullanılmasına karar verilmiştir.

Superpave yöntemine göre bağlayıcıların aynı performans seviyesine sahip olacak şekilde katkı oranları belirlenmiş olmasına rağmen, biyoçar modifikasyonunun bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerine etkisini daha geniş bir aralıkta değerlendirebilmek amacıyla bağlayıcı deneylerinde %5, %10 ve %15 biyoçar modifiyeli bağlayıcılar hazırlanarak deneylere tabi tutulmuştur. Bağlayıcı deneyleri sonucunda modifikasyondaki biyoçar içeriğinin artması ile penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında ayrıca DSR deney aleti kullanılarak bağlayıcıların farklı frekans ve sıcaklıklardaki reolojik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan her ne kadar Superpave yöntemine göre tek bir frekansta (10 rad/s) uygulanan deneyler sonucunda ceviz kabuğu ve kayısı çekirdeği kabuğu biyoçarından %15 ve talaş biyoçarından %10 kullanılması ile aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılar elde edildiği görülse bile farklı frekanslarda ve sıcaklıklarda uygulanan deneyler sonucunda daha farklı sonuçlar elde edilmiştir. Dinamik mekanik analiz sonucunda modifiye bitümler içerisinde en iyi sonuca ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların, en düşük sonuca ise talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcıların sahip olduğu tespit edilmiştir. BBR deneyleri sonucunda biyoçarın bitüm modifikasyonunda kullanılması ile rijitlik değerlerinin arttığı ve m-değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Superpave şartnamesine göre modifiye bitümlerin düşük sıcaklık performansının saf bağlayıcıya göre bir seviye daha düşük olduğu belirlenmiştir (saf bağlayıcı PG 58-28, modifiye bağlayıcılar PG 64-22). Depolama stabilitesi deneyleri sonucunda bütün biyoçar modifiyeli bitümlerin depolama stabilitesi açısından uygun olmadığı, modifiye bitümlerin hazırlanmasından sonra kısa süre içerisinde bu modifiye

bitümlerin kullanılmasının uygun olacağı belirlenmiştir. Depolama stabilitesi deneyleri sonucunda en olumsuz katkının talaş biyoçarı olduğu belirlenmiştir.

Bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki davranışını karakterize etmek amacıyla yapılan MSCR deneylerinden 52°C’de saf ve modifiye bağlayıcıların benzer performans göstererek ağır taşıt trafiği durumunda tekerlek izine karşı dirençli olduklarını göstermişlerdir. 58°C’de yapılan deneyde modifiye bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre tekerlek izine karşı daha iyi direnç göstermişlerdir. 64°C’deki deney sonuçlarına göre ise saf ve %10T modifiyeli bağlayıcı maksimum %75 J_{nr_diff} şartname kriterini sağladığı buna karşın diğer bağlayıcıların şartname kriterini sağlamadıkları ve bu sıcaklıkta tekerlek izine karşı dayanım açısından olumsuz sonuç gösterdikleri belirlenmiştir.

Saf ve biyoçar modifiyeli bağlayıcılar üzerine yapılan elastik geri dönme ve kuvvet ölçümlü düktilite deneyleri ile bağlayıcıların elastiklik ve kohezyon özellikleri değerlendirilmiştir. Yapılan her iki deney benzer sonuçlar göstermiş ve saf bağlayıcının biyoçar modifiyeli bağlayıcılara göre daha elastik ve kohezyon açısından daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Elastik geri dönme deneyine göre saf bağlayıcıdan sonra en iyi geri dönme yüzdesine talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcının, en düşük değere ise ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcının sahip olduğu tespit edilmiştir. Kuvvet ölçümlü düktilite deneyine göre ise saf bağlayıcıdan sonra en yüksek deformasyon enerjisine talaş biyoçarı modifiyeli bağlayıcının en düşük değere ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bağlayıcının sahip olduğu belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında bitümlü sıcak karışım tasarımı Superpave yöntemine göre yapılmış olup saf bağlayıcı, %15 ceviz kabuğu biyoçarı, %15 kayısı çekirdeği biyoçarı ve %10 talaş biyoçarı modifiye bağlayıcılar için ayrı ayrı tasarım bitüm içerikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan biyoçarların bitüm modifikasyonunda kullanılması ile tasarım bitüm içeriklerinin arttığı tespit edilmiştir. Saf ve modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma, çekme dayanımı oranı, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma, çatlak ilerleyişine karşı dayanım ve dinamik sünme deneyleri uygulanarak biyoçarların BSK’ların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri geniş bir aralıkta değerlendirilmiştir.

Marshall stabilite ve akma deney sonuçları değerlendirildiğinde katkı kullanımı ile stabilite ve MQ değerlerinin arttığı, akma değerlerinin önemli oranda değişmediği belirlenmiştir. Katkı türleri değerlendirildiğinde stabilite ve MQ değerleri üzerinde en etkin katkının ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümle hazırlanan karışımın olduğu belirlenmiştir. Nem hasarına karşı dayanım deney sonuçlarında biyoçar modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanan karışımlarda nem hasarına karşı dayanımda genel olarak düşüş meydana geldiği bunlardan kayısı çekirdeği biyoçarıyla modifiye edilen bağlayıcıların dayanımı en düşük karışımlar oldukları görülmüştür. İndirekt çekme rijitlik modülü deneylerinden katkı kullanımı ile rijitlik değerlerinin arttığı en etkin katkının ceviz kabuğu biyoçarı modifiyeli bitümle hazırlanan karışımlar olduğu, etkinliği en

az olan modifiye bitümün ise genel olarak %10 oranında talaş biyoçarı içeren bağlayıcı olduğu tespit edilmiştir.

İndirekt çekme yorulma deneyinde biyokütlelerden elde edilen biyoçarların kullanılması ile karışımların çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesi yük tekrar sayılarının ayrıca yorulma ömürlerinin ve maksimum yük tekrar sayılarının önemli oranda arttığı, gerilmenin artması ile bu değerlerin azaldığı belirlenmiştir. Katkı malzemesi olarak biyoçar kullanımı ile deformasyon değerlerinin genel olarak azaldığı, karışımların daha gevrek davranış sergiledikleri gözlenmiştir. Çatlak ilerleme oranı değerleri (r_p) göz önünde bulundurulduğunda biyoçarların katkı olarak kullanımı ile karışımların yük tekrarına karşı dayanımlarının artacağı, dolayısıyla BSK'ların yorulma çatlaklarından kaynaklanan yeniden yapım veya rehabilitasyon ihtiyaçlarının geciktirilebileceği söylenebilmektedir. Wöhler ilişkisinden faydalanılarak çizilen yorulma ömrü eğrilerinden katkıların yorulma ömrü üzerinde etkisinin yüksek olduğu, katkılar karşılaştırıldığında en yüksek değerlere MB_{%15C} ve MB_{%15K} modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların sahip olduğu ve bu karışımların yorulma ömürlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Dinamik sünme deney sonuçlarından biyokütlelerden elde edilen biyoçarların bitüm modifikasyonunda kullanımı ile kalıcı deformasyona karşı dayanımın bir göstergesi olan akma sayısı değerlerinin arttığı, kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Esneklik modülü değerlerinden katkı kullanımı ile esneklik modülü değerlerinin arttığı bu nedenle karışımların elastikiyetinin azaldığı tespit edilmiştir. Karışımlar içerisinde en yüksek kalıcı deformasyona karşı dayanıma MB_{%15C} ile hazırlanan karışımın sahip olduğu, en düşük kalıcı deformasyona karşı dayanıma ise saf bağlayıcının sahip olduğu belirlenmiştir.

Elasto-plastik kırılma mekaniğine göre karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımları incelendiğinde katkı kullanımı ile karışımların dayanımlarının arttığı, çatlak derinliği arttıkça bu değerlerin azaldığı tespit edilmiştir. Yorulma deneyinde olduğu gibi katkı olarak biyoçar kullanılması ile karışımların deformasyon değerlerinin azaldığı, karışımların daha gevrek kırılma gösterdikleri belirlenmiştir. Maksimum yüke kadar yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan ve toplam alan değerleri karşılaştırıldığında katkı kullanımı ile bu alan değerlerinin arttığı dolayısıyla karışımların daha fazla enerjiye sahip oldukları tespit edilmiştir. Karışım numunelerinin kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri incelendiğinde biyokütlelerin pirolizinden elde edilen biyoçarların bitüm modifikasyonunda kullanılması ile karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarının artacağı, en etkin katkının talaş biyoçarından %10 oranında kullanılması durumunda elde edileceği belirlenmiştir.

Nem hasarı deneylerinde biyoçarların bitüm katkı maddesi olarak kullanılmasının olumsuzluğa neden olduğu belirlenmiş olup bu durumu gidermek amacıyla bitüm veya karışıma nem hasarına karşı olumlu etkileri bilinen malzemelerin (kireç gibi) ilave edilmesinin fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Biyoçarlarla modifikasyon durumunda karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarındaki artış bunların kullanımları durumunda daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulması gerektirmektedir. Fakat biyokütlelerin pirolizi sonucu elde edilen diğer bir ürün olan biyoyağların veya biyoyağlardan sentezlenen biyopolimerlerin biyoçarlarla beraber kullanılması durumunda bu olumsuzlukların azaltılabileceği düşünülmektedir. Son yıllarda dünyada biyoyağların geri kazanılmış asfalt malzemelerde gençleştirici olarak kullanımı bunun bir göstergesidir.

Çalışma kapsamında yapılan tüm bağlayıcı ve karışım deneyleri ile kayısı çekirdeği kabuğu, ceviz kabuğu ve talaşın pirolizi sonucunda elde edilen biyoçarların karayolu üstyapı tabakalarında bitüm katkı maddesi olarak kullanılabileceği ortaya koyulmuştur. Piroliz işleminde ana amaç atık veya artık malzemelerden biyogaz, biyoyağ ve biyoçar gibi çeşitli kullanım alanına sahip ürünler elde etmektir. Piroliz işlemi sonucunda ortaya çıkan yan ürünlerden biri olan biyoçarın farklı bir alanda kullanımı ekonomik kazanç sağlanmasının yanısıra çevresel fayda açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu durum dünyanın en büyük ve sınırsız kaynaklarından biri olan biyokütlelerden farklı bir alanda fayda ve ekonomik katkı sağlanacağını göstermiştir.

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de yenilenebilir biyokütle kaynaklarından enerji üretilmek amacıyla biyokütle dönüşüm tesisleri kurulmaya başlanmıştır. Bunlar arasında piroliz tabanlı biyokütle dönüşüm tesisleri de mevcuttur. Özellikle piroliz tabanlı atık araç lastiği dönüşüm tesisleri bunlar arasında en bilinenlerindendir. Bu gibi tesislerin yaygınlaşması atık veya artık biyokütle kaynaklarının bertaraf edilmesi amacıyla yakılarak hava kirliliğine sebep olmasının önüne geçecek ve biyokütle dönüşüm teknolojileri sayesinde karayolu sektörü gibi çok farklı alanlarda kullanılabilecek değerli ürünler elde edilmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Strateji Geliştirme Başkanlığı, Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü, 2017. http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FEnerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü%2FSayi_15.pdf.
- [2] Bureau of Labor Statistics, (n.d.). <https://www.bls.gov/opub/reports/> (accessed November 20, 2019).
- [3] Karayolları Genel Müdürlüğü Devlet ve İl Yolları Envanteri, (n.d.). <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/DevletIIYolEnvanter/SatihYolAgiUzunlugu.pdf> (accessed November 20, 2019).
- [4] B.B. Uzun, N. Sarioğlu, Rapid and catalytic pyrolysis of corn stalks, *Fuel Process. Technol.* 90 (2009) 705–716. doi:10.1016/j.fuproc.2009.01.012.
- [5] R.N. Hunter, J. Read, A. Self, *The Shell Bitumen Handbook*, Sixth edit, Shell Bitumen by ICE Publishing, London, 2015.
- [6] J. Romberg, S. Nesmitts, R. Traxler, Some chemical aspects of the components of asphalt, *J. Chem. Eng. Data.* 4(2) (1959) 159–161.
- [7] R. Traxler, The physical chemistry of asphaltic bitumen, *Chem. Rev.* 19(2) (1936) 119–143.
- [8] R.N. Traxler, C.E. Coombs, The colloidal nature of asphalt as shown by its flow properties, *J. Phys. Chem.* 40(9) (1936) 1133–1147.
- [9] G.B. Crump, Black but such as in esteem – the analytical chemistry of bitumen, in: *Proc. Chairman's Retiring Address to NW Reg. Anal. Div. R. Soc. Chem.*, London, 1981.
- [10] J.L. Goodrich, J.E. Goodrich, W.J. Kari, Asphalt composition tests: their application and relation to field performance, *Transp. Res. Rec.* 1096 (n.d.) 146–167.
- [11] R.N. Traxler, H.E. Schwyer, How to make component analysis. Increase of viscosity of asphalts with time, *Oil Gas J.* 52 (1953) 133–158.
- [12] J. Marcusson, Der chemische aufbau der naturasphalte, *Angew. Chemie.* 29(73) (1916) 346–351.
- [13] M. Halladay, The strategic highway research program: An investment that has paid off, *Public Roads.* 1(5) (1998) 11–17.
- [14] L.W. Corbett, R.E. Swarbick, Clues to asphalt composition, *Proc. Am. Asph. Paving Technol.* 27 (1958) 107–115.
- [15] H.E. Schwyer, H. Chelton, H.H. Brenner, A chromatographic study of asphalt, *Proc. Assoc. Asph. Paving Technol.* 24 (1955) 3–8.
- [16] D. Lesueur, The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, *Adv. Colloid Interface Sci.* 145(1–2) (2009) 42–82.
- [17] J.F. Schabron, J.F. Rovani, M.M. Sanderson, Asphaltene determinator method for automated on-column precipitation and redissolution of pericondensed aromatic asphaltene components, *Energy and Fuels.* 24 (2010) 5984–5996.
- [18] E.H. Chipperfield, *IARC Review on Bitumen Carcinogenicity: Bitumen Production Properties and Uses in Relation to Occupational Exposures*, London, UK, 1984.
- [19] J.F. Branthaver, J.C. Petersen, R.E. Robertson, *Binder Characterization and Evaluation*, in: *Strateg. Highw. Res. Program, Natl. Res. Council.*, Washington, D.C., 1993.
- [20] R.B. Girdler, Constitution of asphaltenes and related studies, *Proc. Assoc. Asph. Paving Technol.* 34 (1965) 45–79.
- [21] J.P. Dickie, T.F. Yen, Macrostructures of asphaltic fractions by various instrumental methods, *Anal. Chem.* 39(14) (1967) 1847–1852.
- [22] O.C. Mullins, The modified Yen model, *Energy and Fuels.* 24(4) (2010) 2179–2207.
- [23] M.R. Gray, R.R. Tywinski, J.M. Stryker, X. Tan, Supramolecular assembly model for aggregation of petroleum asphaltenes, *Energy and Fuels.* 25(7) (2005) 3125–3134.

- [24] J. Long, Z. Xu, J.H. Masliyah, Role of colloidal interactions in oil sand tailings treatment, *Langmuir*. 52(1) (2006) 371–383.
- [25] R.L. Griffin, T.K. Miles, Relationship of asphalt properties to chemical constitution, *J. Chem. Eng. Data*. 6(3) (1961) 426–429.
- [26] R.L. Griffin, W.C. Simson, T.K. Miles, Influence of composition of paving asphalt on viscosity, viscosity–temperature, susceptibility and durability, *J. Chem. Eng. Data*. 4(4) (1959) 349–354.
- [27] J.R. McKay, P.J. Amend, T.G. Cogswell, Petroleum asphaltenes: chemistry and composition. In: *Analytical Chemistry of Liquid Fuel Sources*, Am. Chem. Soc. (1978) 128–142.
- [28] H. Reerink, Size and shape of asphaltene particles in relationship to high temperature viscosity, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.* 12(1) (1973) 82–88.
- [29] M.S. Lin, J.M. Chaffin, M. Liu, The effect of asphalt composition on the formation of asphaltenes and their contribution to asphalt viscosity, *Fuel Sci. Technol. Int.* 14(1–2) (1996) 139–162.
- [30] J.M. Goppel, J. Knoterus, Fundamentals of bitumen blowing, in: 4th World Pet. Congr., Rome, Italy, 1955.
- [31] R.H. Lewis, J.Y. Welborn, Report on the physical and chemical properties of petroleum asphalts on the 50-60 and 85-100 penetration grades, *Proc. Assoc. Asph. Paving Technol.* 11 (1940) 86–92.
- [32] R.J. Schmidt, L.E. Santucci, The effect of asphalt properties on the fatigue cracking of asphalt concrete on the Zaca–Wigmore test project, *Proc. Assoc. Asph. Paving Technol.* 38 (1969) 39–45.
- [33] X. Lu, U. Isacsson, Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology, *Constr. Build. Mater.* 16(1) (2002) 15–22.
- [34] J.C. Petersen, A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation: Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships, in: *Transp. Res. Board*, Washington, D.C., 2009.
- [35] T.C. Davis, J.C. Petersen, An inverse GLC study of the asphalts used in the Zaca–Wigmore experimental test road, *Proc. Assoc. Asph. Paving Technol.* 36 (1967) 1–10.
- [36] K.L. Martin, K.K. Davidson, C.J. Glover, J.A. Bullin, Asphalt ageing in Texas roads and test section, *Transp. Res. Rec.* 1269 (1990) 9–18.
- [37] J.C. Petersen, J.F. Branthaver, R.E. Robertson, Effect of physicochemical factors on asphalt oxidation kinetics, *Transp. Res. Rec.* 1391 (1993) 1–10.
- [38] K.G. Martin, Laboratory evaluation of antioxidants in bitumen, in: *Proc. 4th Conf. Aust. Road Res. Board*, Melbourne, Australia, 1968; pp. 1–14.
- [39] Biyokütle Enerjisi Nedir?, Türk Stand. Enstitüsü. (2009). <https://statik.tse.org.tr/upload/tr/dosya/icerikyonetimi/3537/25032015105828-2.pdf>.
- [40] R. Azargohar, K.L. Jacobson, E.E. Powell, A.K. Dalai, Evaluation of properties of fast pyrolysis products obtained, from Canadian waste biomass, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 104 (2013) 330–340. doi:10.1016/j.jaap.2013.06.016.
- [41] J. Heinimö, M. Junginger, Production and trading of biomass for energy - An overview of the global status, *Biomass and Bioenergy*. 33 (2009) 1310–1320. doi:10.1016/j.biombioe.2009.05.017.
- [42] N. Saraçoğlu, Küresel İklim Değişimi, Biyoenerji ve Enerji Ormancılığı, Efil Yayın Evi, Ankara, 2010.
- [43] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı - Biyokütle, (n.d.). <https://enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Biyokutle> (accessed November 22, 2019).
- [44] Biyokütle Enerji Potansiyeli Atlası, T.C. Enerj. ve Tabii Kaynaklar Bakanl. Yenilenebilir Enerj. Genel Müdürlüğü. (2019). <http://bepa.yegm.gov.tr/PrintFormInfo.aspx?PG=A4&A=G> (accessed November 20, 2019).
- [45] Türkiye’ nin Enerji Sorunları ve Çözüm Önerileri, in: TÜGİAD, Ajans-Türk Basın ve Basım A., Ankara, Turkey., 2004.
- [46] H.M. ŞEN, Türkiye’ nin Genel Enerji Durumu, in: İTÜ Enerj. Çalıştay ve Sergisi, Enerji Enstitüsü Yayınları, 2006.

- [47] H.N. Bayraç, B. Özarslan, Biyokütle Enerjisi ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkinin Ampirik Bir Analizi: Türkiye Örneği, (2018) 1–17.
- [48] M.R. Ünal, Kayısı Araştırma Raporu, (2010) 1–63.
- [49] TERSUN Kayısı Çekirdeği İşleme Sanayi, (2019). <https://www.tersun.com.tr/urunbilgisi.html> (accessed November 22, 2019).
- [50] Türkiye İstatistik Kurumu Bitkisel Üretim İstatistikleri, (2019). http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1001 (accessed November 22, 2019).
- [51] Türkiye Ziraat Odaları Birliği, (n.d.). <https://www.tzob.org.tr/basin-odasi/haberler/cevizin-en-kalitelisi-bizde-ama-ithalattan-kurtulamıyoruz...> (accessed November 22, 2019).
- [52] S. Bayaz, İ.T.H. Tefek, Ç.Ş. Kan, Türkiye’de Ceviz (*Juglans regia* L.) Araştırmaları, Ziraat Fakültesi Derg. 11 (2016) 169–179.
- [53] Alesta Naturel Granül; Ceviz, fındık, mısır koçanı granülleri., (2019). <http://www.alestonaturel.com/granul/granul.html> (accessed November 22, 2019).
- [54] Ceviz Kabuğu Satışı ve Fiyatları, (2019). <https://www.organikyakit.com/urun-detaylari/ceviz-kabuğu-satışı-fiyatı/> (accessed November 22, 2019).
- [55] O. Kahveci, Orman Biyokütlesinden Yakıt ve Enerji Üretimi, (2019). <https://docplayer.biz.tr/14643892-Orman-biyokutlesinden-yakit-ve-enerji-uretimi.html> (accessed November 22, 2019).
- [56] N. Saraçoğlu, Orman Hasılat Bilgisi, 2017.
- [57] Fordaq – Orman Ürünleri, (2019). <https://ahsap.fordaq.com/> (accessed November 22, 2019).
- [58] H. Olgun, M. Doğru, C.R. Howart, Katı Atıkların Enerji Dönüşümünde Kullanılması ve Gazlaştırıcılar, IV. Ulus. Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi. (1999) 835–853.
- [59] S. Kırımhan, Organik Atıklardan Biyo-gaz Üretimi, Çevre Sorunları Araştırma Enstitüsü. (1981).
- [60] D. Chen, L. Yin, H. Wang, P. He, Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review, Waste Manag. 34 (2014) 2466–2486. doi:10.1016/j.wasman.2014.08.004.
- [61] A.H. Demirbaş, Yields and heating values of liquids and chars from spruce trunkbark pyrolysis, Energy Sources. 27 (2005) 1367–1373. doi:10.1080/009083190523208.
- [62] N. Tippayawong, J. Kinorn, S. Thavornun, Yields and gaseous composition from slow pyrolysis of refuse-derived fuels, Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff. 30 (2008) 1572–1580. doi:10.1080/15567030701258550.
- [63] H.B. Goyal, D. Seal, R.C. Saxena, Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review, Renew. Sustain. Energy Rev. 12 (2008) 504–517. doi:10.1016/j.rser.2006.07.014.
- [64] D. Mohan, C.U. Pittman, P.H. Steele, Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review, Energy and Fuels. 20 (2006) 848–889. doi:10.1021/ef0502397.
- [65] A.V. Bridgwater, Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook, CRL Press, Newbury, 2002.
- [66] A. V. Bridgwater, The production of biofuels and renewable chemicals by fast pyrolysis of biomass, Int. J. Glob. Energy Issues. 27 (2007) 160–203. doi:10.1504/IJGEI.2007.013654.
- [67] M. Mohamed Metwally, Development of non-petroleum binders derived from fast pyrolysis bio-oils for use in flexible pavement, 2010. <http://lib.dr.iastate.edu/etd/11604%5Chttp://lib.dr.iastate.edu/etd/11604/>.
- [68] Pyrolysis Process Development Unit, (2019). <https://www.cset.iastate.edu/research/current-research/pyrolysis-process-development-unit/> (accessed November 23, 2019).
- [69] X.S. Zhang, G.X. Yang, H. Jiang, W.J. Liu, H.S. Ding, Mass production of chemicals from biomass-derived oil by directly atmospheric distillation coupled with co-pyrolysis, Sci. Rep. 3 (2013) 1–7. doi:10.1038/srep01120.
- [70] D.R. Hill, Bioasphalt and Biochar from Pyrolysis of Urban Yard Waste, Case Western Reserve

University, 2012.

- [71] Syn Gaz MCE Alternatif Enerji A.Ş, (n.d.). <http://www.alternatifpower.com.tr/tr/gazlar/syngas-17/> (accessed November 23, 2019).
- [72] Biochar - Avello Bioenergy, (n.d.). <http://www.avellobioenergy.com/en/products/biochar/> (accessed November 23, 2019).
- [73] Environment- İnhabitat, (2019). <https://inhabitat.com/environment/> (accessed November 23, 2019).
- [74] Biochar Feedstocks - biochar-international, (2019). <https://biochar-international.org/biochar-feedstocks/> (accessed November 23, 2019).
- [75] R.C. Williams, M.A. Raouf, M. Metwally, R.C. Brown, Bio-Oil Formulation as as Asphalt Subsitute, 2015.
- [76] G.D. Airey, M.H. Mohammed, Rheological properties of polyacrylates used as synthetic road binders, *Rheol. Acta.* 47 (2008) 751–763. doi:10.1007/s00397-007-0250-3.
- [77] E.H. Fini, I.L. Al-Qadi, Z. You, B. Zada, J. Mills-Beale, Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: Characterisation and modification, *Int. J. Pavement Eng.* 13 (2012) 515–522. doi:10.1080/10298436.2011.596937.
- [78] C.P. Tan, Y.B. Che Man, Comparative differential scanning calorimetric analysis of vegetable oils: I. Effects of heating rate variation, *Phytochem. Anal.* 13 (2002) 129–141. doi:10.1002/pca.633.
- [79] D.L. Kaplan, *Biopolymers from Renewable Resources*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1998. doi:10.1007/978-3-662-03680-8.
- [80] D.C.W. Tsang, J. Hu, M.Y. Liu, W. Zhang, K.C.K. Lai, I.M.C. Lo, Activated carbon produced from waste wood pallets: Adsorption of three classes of dyes, *Water. Air. Soil Pollut.* 184 (2007) 141–155. doi:10.1007/s11270-007-9404-2.
- [81] D. O'Connor, T. Peng, J. Zhang, D.C.W. Tsang, D.S. Alessi, Z. Shen, N.S. Bolan, D. Hou, Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: A review of in situ field trials, *Sci. Total Environ.* 619–620 (2018) 815–826. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.132.
- [82] L. Wang, I.K.M. Yu, D.C.W. Tsang, K. Yu, S. Li, C. Sun Poon, J.G. Dai, Upcycling wood waste into fibre-reinforced magnesium phosphate cement particleboards, *Constr. Build. Mater.* 159 (2018) 54–63. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.107.
- [83] J.C. Seidel, J.E. Haddock, *Soy Fatty Acids as Sustainable Modifier for Asphalt Binders*, Washington, D.C., 2012. doi:10.17226/22725.
- [84] J. Peralta, R.C. Williams, M. Rover, H.M.R.D. Silva, Development of Rubber-Modified Fractionated Bio-Oil for Use as Noncrude Petroleum Binder in Flexible Pavements, *Transp. Res. Circ. E-C 165 Altern. Bind.* (2012) 23–36.
- [85] R.C. Williams, J. Satrio, M. Rover, R.C. Brown, S. Teng, Utilization of Fractionated Bio-Oil in Asphalt, *J. Transp. Res. Board.* 09 (2008) 1–19.
- [86] R.C. Williams, J. Satrio, M. Rover, R.C. Brown, S. Teng, Utilization of Fractionated Bio-Oil in Asphalt, *Transp. Res. Board 88th Annu. Meet.* (2009) 1–19.
- [87] E. Andersen, J. Vasudevan, D. Stoker, E. Hagen, R. Bragstad, B.O. Lerfald, Road trials with vegetable oil based bitumen in Norway, in: *Proc. 4th Eurasphalt Eurobitume Congr. Held May 2008*, Copenhagen, Denmark, European Asphalt Pavement Association (EAPA), Copenhagen, Denmark, 2008.
- [88] X. Yang, Z. You, Q. Dai, Performance evaluation of asphalt binder modified by bio-oil generated from waste wood resources, *Int. J. Pavement Res. Technol.* 6 (2013) 431–439. doi:10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(4).431.
- [89] Walters, Enhancing Asphalt Rheological Behavior and Aging Susceptibility Using Bio-Char and Nano-Clay, *Am. J. Eng. Appl. Sci.* 7 (2014) 66–76. doi:10.3844/ajeassp.2014.66.76.
- [90] T. Dizhbite, G. Telysheva, V. Jurkane, U. Viesturs, Characterization of the radical scavenging activity of lignins - Natural antioxidants, *Bioresour. Technol.* 95 (2004) 309–317. doi:10.1016/j.biortech.2004.02.024.

- [91] C. Ouyang, S. Wang, Y. Zhang, Y. Zhang, Improving the aging resistance of asphalt by addition of Zinc dialkyldithiophosphate, *Fuel*. 85 (2006) 1060–1066. doi:10.1016/j.fuel.2005.08.023.
- [92] R.E. Robertson, S.W. Bishara, D. Mahoney, Lignin as Antioxidant: Limited Study on Asphalts Frequently Used on Kansas Roads, in: *Transp. Res. Board 85th Annu. Meet.*, Washington, D.C., 2006.
- [93] N.S. McCready, The utilization of agriculturally derived lignin as an antioxidant in asphalt binder, Iowa State University, 2007.
- [94] Y. Chen, C. Ji, H. Wang, Y. Su, Evaluation of crumb rubber modification and short-term aging on the rutting performance of bioasphalt, *Constr. Build. Mater.* 193 (2018) 467–473. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.192.
- [95] S. Zhao, B. Huang, P. Ye, Development of a Carbon-Based BioModifier for Asphalt Cement, in: *50th Petersen Asph. Res. Conf. Laramie, Wyo.*, July 15–17, 2013.
- [96] S. Zhao, B. Huang, X.P. Ye, X. Shu, X. Jia, Utilizing bio-char as a bio-modifier for asphalt cement: A sustainable application of bio-fuel by-product, *Fuel*. 133 (2014) 52–62. doi:10.1016/j.fuel.2014.05.002.
- [97] S. Zhao, B. Huang, X. Shu, P. Ye, Laboratory investigation of biochar-modified asphalt mixture, *Transp. Res. Rec.* 2445 (2014) 56–63. doi:10.3141/2445-07.
- [98] S. Zhao, B. Huang, P. Ye, Laboratory evaluation of asphalt cement and mixture modified by bio-char produced through fast pyrolysis, *Geotech. Spec. Publ.* (2014) 140–149. doi:10.1061/9780784413418.015.
- [99] M. Bostancıoğlu, Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler İle Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2012.
- [100] N. Atasağun, Piroliz Yöntemi Kullanılarak Sıvılaştırılmış Çörekotu Kuspesi ile Modifiye Edilen Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri, Selçuk Üniversitesi, 2009.
- [101] O.N. Çelik, N. Atasağun, M.A. Lorasokkay, Rheological Properties of Bituminous Binder Modified with Waste Plastic Polypropylene Liquefied by Pyrolysis Method, in: *10th Int. Congr. Adv. Civ. Eng. Middle East Tech. Univ.*, Ankara, Turkey., 2012.
- [102] O.N. Çelik, M.A. Lorasokkay, N. Atasağun, Marshall Stability in Hot Bituminous Mixture Modified By Liquefied Waste Vehicle Tires with Pyrolysis Method, in: *10th Int. Congr. Adv. Civ. Eng. Middle East Tech. Univ.*, Ankara, Turkey., 2012.
- [103] T. Alataş, M. Yılmaz, B.V. Kök, M.E. Çeloğlu, M. Akpolat, Ö. Erdoğan Yamaç, E. Yalçın, Öğütülmüş Araç Lastiğinin ve Piroliz İşleminde Sonra Oluşan Karbon Siyahının Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, *Uludağ Univ. J. Fac. Eng.* 23 (2018) 311–328. doi:10.17482/uumfd.333510.
- [104] A. Kumar, R. Choudhary, R. Narzari, R. Kataki, S.K. Shukla, Evaluation of bio-asphalt binders modified with biochar: a pyrolysis by-product of Mesua ferrea seed cover waste, *Cogent Eng.* 5 (2018) 1–15. doi:10.1080/23311916.2018.1548534.
- [105] R. Zhang, Q. Dai, Z. You, H. Wang, C. Peng, Rheological performance of bio-char modified asphalt with different particle sizes, *Appl. Sci.* 8 (2018) 1–15. doi:10.3390/app8091665.
- [106] X. Zhou, S. Adhikari, Flow-induced crystallization of biochar in bio-asphalt under various aging conditions, *Sci. Total Environ.* 695 (2019) 133943. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.133943.
- [107] TS EN-12591, (2009). Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-Kaplama sınıfı bitümler-Özellikler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [108] TS EN-1426, (2015). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [109] TS EN-1427, (2015). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilye yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [110] TS EN-12593, (2015). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Fraas kırılma/kesilme noktası tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015.

- [111] TS EN-13589, (2018). Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Kuvvet uygulamalı süneklik yöntemiyle modifiye bitümün gerilme özelliklerinin belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2018.
- [112] TS EN 12607-1, 2003. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini – Bölüm 1: RTFOT (Etüvde Hareket Halinde İnce Film Deneyi) Yöntemi, Ankara, n.d.
- [113] A.S. Karakas, N. Kuloglu, B.V. Kok, M. Yilmaz, The evaluation of the field performance of the neat and SBS modified hot mixture asphalt, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 678–684. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.140.
- [114] TS EN 1097-2, (2010). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2 : Parçalanma direncinin tayini için metotlar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [115] TS EN 1097-1, (2011). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (mikro- Deval), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2011.
- [116] TS EN 1367-4, (2009). Agregaların ısı ve yıpranma özellikleri için deneyler - Bölüm 4: Kuruma büzülmesinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [117] TS EN 933-9, (2014). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 9: İnce malzeme tayini - Metilen mavisi deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [118] AASHTO R28, (2012). Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV), American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), USA, 2012.
- [119] J.P. Zaniewski, M.. Pumphrey, Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, in: *Asph. Technol. Progr.*, Morgantown, West Virginia, 2004: p. 107.
- [120] J.C. Petersen, R.E. Robertson, J.F. Branthaver, P.M. Harnsberger, J.J. Duvall, S.S. Kim, D.A. Anderson, D.W. Christensen, H.U. Bahia, R. Dongre, C.E. Antle, M.G. Sharma, Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, Strategic Highway Research Program, SHRP A-370, in: *Natl. Res. Coun.*, Washington, D.C., 1994: p. 197.
- [121] R.B. McGennis, S. Shuler, H.U. Bahia, Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, in: *U.S. Dep. Transp. Fed. Highw. Adm. FHWA-SA-94-069*, Washington, D.C., 1994: p. 104.
- [122] TS EN-13399, (2018). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Modifiye bitümün depolama stabilitesinin belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2018.
- [123] TS EN-13398, (2018). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Modifiye bitümün elastik geri kazanımının belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2018.
- [124] American Association of State and Highway Transportation Officials, AASHTO Standard M320, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder, 2010.
- [125] AASHTO T350, (2012). Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer(DSR), AASHTO, Washington, D.C., 2012.
- [126] AASHTO T315, (2019). Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), AASHTO, USA, 2019.
- [127] D. Singh, D. Sawant, Understanding effects of RAP on rheological performance and chemical composition of SBS modified binder using series of laboratory tests, *Int. J. Pavement Res. Technol.* 9 (2016) 178–189. doi:10.1016/j.ijprt.2016.06.002.
- [128] AASHTO M332, (2015). D8239 Standard specification for Performance-Graded Asphalt Binder using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, AASHTO, Washington, D.C., 2015.
- [129] A. Behnood, J. Olek, Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA), *Constr. Build. Mater.* 151 (2017) 464–478. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.115.
- [130] T.L.J. Wasage, J. Stastna, L. Zanzotto, Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test, *Int. J. Pavement Eng.* 12 (2011) 561–568. doi:10.1080/10298436.2011.573557.
- [131] A. Behnood, A. Shah, R.S. McDaniel, M. Beeson, J. Olek, High-Temperature Properties of Asphalt Binders: Comparison of Multiple Stress Creep Recovery and Performance Grading Systems, *Transp.*

Res. Rec. J. Transp. Res. Board. 2574 (2016) 131–143. doi:10.3141/2574-15.

- [132] AASHTO T 316, (2019). Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer, AASHTO, USA, 2019.
- [133] AASHTO T 240, (2013). Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test), AASHTO, USA, 2013.
- [134] AASHTO T 313, (2019). Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR), AASHTO, USA, 2019.
- [135] A. Tunç, Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2004.
- [136] TS EN 12697-34, (2004). Bitümlü karışımlar - Deney metotları - Sıcak karışimli asfalt için - Bölüm 34: Marshall deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2004.
- [137] BS EN 12697-44:2010 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test, British Standart, London, 2010.
- [138] S.E. Zoorob, L.B. Suparma, Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt), Cem. Compos. 22 (2000) 233–242.
- [139] S. Hınıslioğlu, E. Açar, Use of the Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix, Mater. Lett. 58 (2004) 267–271.
- [140] K.M. Çolak, Asfalt Kaplamalarda Sinerjetik Fayda Konusunun Anlaşılmasında Marshall Oranı Yaklaşımının Kullanılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
- [141] M. Yılmaz, B.V. Kök, Effects of Ferrochromium Slag with Neat and Polymer Modified Binders in Hot Bituminous Mix, Indian J. Eng. Mater. Sci. 16(5) (2009) 310–318.
- [142] AASHTO T 283, (2014). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, AASHTO, USA, 2014.
- [143] B.V. Kök, Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ., 2007.
- [144] BS DD 213, (1993). Method for Determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures, British Standart, London, 1993.
- [145] L. Francken, Bituminous Binders and Mixes, Rilem Reports, E&FN Spon, London and New York, 1998.
- [146] D.B. Ghile, Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures, Delfth University of Technology, Delfth., 2006.
- [147] A.A.A. Molenaar, T.O. Medani, Rational Testing Methods for Performance Based Specifications, in: Proc. 1st Int. Conf. World Asph. Pavements, Sydney, Australia, 2000: pp. 484–500.
- [148] S.A. Simms, Use of Coal Fly Ash in Asphalt Concrete Mixes, Dalhousie University, Daltech, Canada, 1998.
- [149] TS EN 12697-24, (2018). Bitümlü Karışımlar - Test Metotları - Bölüm 24: Yorulma Direnci, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2018.
- [150] R.H. Subagio, B.S. Siswosoebrotho, B.I. Karsaman, Development of Laboratory Performance of Indonesian Rock Asphalt (Asbuton) in Hot Rolled Asphalt Mix, Proc. East. Asia Soc. Transp. Stud. 4 (2003) 436–449.
- [151] F.T.S. Aragão, J. Lee, Y.-R. Kim, P. Karki, Material-specific effects of hydrated lime on the properties and performance behavior of asphalt mixtures and asphaltic pavements, Constr. Build. Mater. 24 (2010) 538–544. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.005.
- [152] S. Tayfur, H. Ozen, A. Aksoy, Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers, Constr. Build. Mater. 21 (2007) 328–337. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.014.
- [153] A. Khodaii, A. Mehrara, Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test, Constr. Build. Mater. 23 (2009) 2586–2592.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.015.

- [154] A.H. Alavi, M. Ameri, A.H. Gandomi, M.R. Mirzahosseini, Formulation of flow number of asphalt mixes using a hybrid computational method, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 1338–1355. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.010.
- [155] M.W. Witczak, K.E. Kaloush, T. Pellinen, M. El-Basyouny, H. Von Quintus, Witczak, M.W., Kaloush, K.E., Pellinen, T., El-Basyouny, M., Von Quintus, H., Washington, D.C., 2002.
- [156] S.W. Goh, Z. You, A simple stepwise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 3398–3405. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.020.
- [157] J. Bausano, C. Williams, A new Approach to Calculating Flow Number, Unpublished Paper, (2007).
- [158] A. Özdemir, Seramik Malzemelerin kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu elemanlar Yöntemi ile Teorik Olarak Belirlenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
- [159] K.E. Alyamaç, Kendiliğinden Yerleşen Betonun Lineer Olmayan Kırılma Mekanik Prensipleriyle İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
- [160] R. İnce, Betonarme Yapı Elemanlarında Basınç Kesme Kırılmasının ve Boyut Etkisinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 1998.
- [161] E.Y. Hajj, P.E. Sebaaly, L. Loria, Reflective Cracking of Flexible Pavements Phase II: Review of Analysis Models and Evaluation Tests, Nevada Department of Transportation, Carson City, Nevada, 2008.
- [162] J.M.M. Molenaar, Performance Related Characterisation of the Mechanical Behaviour of Asphalt Mixtures, Delft, Netherlands, 2003.
- [163] M.P. Wagnoner, W.G. Buttlar, G.H. Paulino, Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture, *Exp. Mech.* 45 (2005) 270–277. doi:10.1007/BF02427951.
- [164] B. Huang, X. Shu, Y. Tang, Comparison of Semi-Circular Bending and Indirect Tensile Strength Tests for HMA Mixtures, in: *Adv. Pavement Eng., American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2005*: pp. 1–12. doi:10.1061/40776(155)14.
- [165] M.O. Marasteanu, X. Li, T.R. Clyne, V.R. Voller, D.H. Timm, D.E. Newcomb, Low Temperature Cracking of Asphalt Concrete Pavements, 2004.
- [166] I.L. Lim, I.W. Johnston, S.K. Choi, Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending, *Eng. Fract. Mech.* 44 (1993) 363–382. doi:10.1016/0013-7944(93)90030-V.
- [167] R. Hoffman, B. Oosterbaan, S.M.J.G. Erkens, J.V.D. Kooij, Semi-Circular Bending Test to Assess the Resistance Against Crack Growth, in: *Perform. Test. Eval. Bitum. Mater. Proc. 6. Int. RILEM Symp., Zurich, 2003*: pp. 257–263.
- [168] M. Bakker, SCB Test Results, Statistical Analysis, Netherlands, 2001.
- [169] R. İnce, Çimento Bazlı Malzemelerin Kırılmasında Boyut Tesirinin (Non-Lineer Kırılma Mekanik) Yapay Sinir Ağları ile İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 1994.
- [170] A. Uğuz, Kırılma Mekanikine Giriş, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa, 1996.
- [171] I. Haryanto, O. Takahashi, Crack Initiation Assessment of Wearing Course Asphalt Mixtures Using Aggregate Gradation Characteristic, *ITB J. Eng. Sci.* 39 (2007) 28–42. doi:10.5614/itbj.eng.sci.2007.39.1.3.
- [172] M.S. Kabir, Effect of Hydrated Lime on the Laboratory Performance of Superpave Mixtures, Louisiana State University, Louisiana, 2007.
- [173] L.F. Walubita, V. Umashankar, X. Hu, B. Jamison, F. Zhou, T. Scullion, A.E. Martin, S. Dessouky, New Generation Mix Designs: Laboratory Testing and Construction of the APT Test Sections, Texas, 2010.
- [174] TS EN-14023, (2018). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Polimer modifiye bitüm şartnameleri için genel esaslar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2018.

- [175] AASHTO T 209, (2019). Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Asphalt Mixtures, AASHTO, USA, 2019.
- [176] AASHTO TP4, (2000). Standard Method for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (Hma) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor, AASHTO, USA, 2000.
- [177] AASHTO T166, (2016). Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens, AASHTO, USA, 2016.
- [178] S. Tapkın, Ü. Uşar, A. Tuncan, M. Tuncan, Repeated Creep Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Bituminous Mixtures, J. Transp. Eng. 135 (2009) 240–249. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:4(240).



ÖZGEÇMİŞ

Adı SOYADI

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri : Pertek
Doğum Yılı : 22.06.1982
Uyruğu : T.C.
Adres : Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
E-posta : meceloglu@firat.edu.tr, mertugrulceloglu@gmail.com
Yabancı Diller : İngilizce (Düzey: C1)

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans : “Farklı Doğal Asfaltların Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkileri”
Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2014
Danışman: Unvan Prof. Dr. Mehmet YILMAZ
Lisans : Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2010
Lise : Mehmet Akif Ersoy Lisesi, ELAZIĞ, 1999

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

✓ Bitümlü ve Bitümlü Sıcak Karışım Deneylerinde Kullanılan Tüm Laboratuvar Cihazları

İŞ DENEYİMİ

2010– 2013 : Bingöl Üniversitesi Müh. Mim. Fak. İnşaat Müh. Bölümü Arş. Gör.
2014- Devam ediyor : Fırat Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Müh. Bölümü Arş. Gör.

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Çeloğlu, M.E., Yalçın, E., Kök, B.V., Alataş, T., Contreras, J.N., Garcia, A., Yılmaz, M., (2018). Effects of Different Bitumen Modifiers on the Rutting and Cracking Resistance of Hot Mix Asphalts. International Journal of Pavement Engineering, 1-10.
2. Yalçın, E., Çeloğlu, M.E., Yılmaz, M., Kök, B.V., Alataş, T., (2018). Determination of Resistance to Creep Permanent Deformation of Hot Mix Asphalts Prepared with Various Additives. Civil Engineering Journal, 4(7),1553.
3. Alataş, T., Yılmaz, M., Kök, B.V., Çeloğlu, M.E., Akpolat, M., Erdoğan, Ö., Yalçın, E., (2018). Öğütülmüş Araç Lastiğinin Ve Piroлиз İşleminde Sonra Oluşan Karbon Siyahının Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri Üzerindeki Etkisi. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 23(1),311-328.
4. Çeloğlu, M.E., Yılmaz, M., (2013). Effects of SBS and Different Natural Asphalts on the Properties of Bituminous Binders and Mixtures. Construction and Building Materials, 44, 533-540.

Bildiriler:

5. Çeloğlu, M.E., Yılmaz, M., (2018). Evaluation of the Rheological Properties of Bituminous Binders Modified with Biochars Obtained from Various Biomasses by Pyrolysis Method, ICPE 2018 : International Conference on Pavement Engineering, March 15-16, 2018, Paris, France (**Doktora tezinden üretilen uluslararası bildiri**).
6. Çeloğlu, M.E., Yılmaz, M., Kök, B.V., Yalçın, E., (2016). Effects of various biochars on the high temperature performance of bituminous binder. 6th Eurasphalt and Eurobitume Congress, (2016).
7. Yalçın, E., Seyrek, E.Ş., Yılmaz, M., Kök, B.V., Arslanoğlu, H., Çeloğlu, M.E., (2018). Effects of Recycle Polymer Waste on the Properties of Bituminous Binders. 13th INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCES IN CIVIL ENGINEERING, (2018).

8. Yalçın, E., Yılmaz, M., Kök, B.V., Çeloğlu, M.E., (2016). Effects of Nanoclay Modification on The Rheological Properties of Bituminous Binders. 6th Eurasphalt and Eurobitume Congress, (2016)..
9. Çeloğlu, M.E., Yılmaz, M., Kök, B.V., Yalçın, E., (2016). Rheological Evaluation of Bitumen Modified by Various Biochars. 6th Eurasphalt and Eurobitume Congress, (2016).

Projeler:

10. Dinamik Kayma Reometresi Aleti Kullanılarak Elastik Geri Dönme (MSCR) Deneyinin İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında Yapılabilirliğinin Araştırılması, 22.04.2016-29.03.2017.
11. Öğütülmüş Araç Lastiğinin Pirolizinden Elde Edilen Bioçarın Bitümlü Bağlayıcılarla Birlikte Kullanılabilirliğinin Araştırılması, 20.11.2015-29.03.2017
12. Farklı Modifiye Bitümlerle Hazırlanmış Bitümlü Sıcak Karışımların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının İncelenmesi, 05.07.2017-19.12.2017