

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BİTKİSEL ATIKLARDAN ELDE EDİLEN KİMYASAL ÜRÜNLER  
İLE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş.Yük.Müh. Murat BOSTANCIOĞLU**

**TEMMUZ 2012  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BİTKİSEL ATIKLARDAN ELDE EDİLEN KİMYASAL ÜRÜNLER  
İLE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**İnş. Yük. Müh. Murat BOSTANCIOĞLU**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.04.2012**

**Tezin Savunma Tarihi : 05.07.2012**

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

**Trabzon 2012**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında**  
**Murat BOSTANCIOĞLU Tarafından Hazırlanan**

**BİTKİSEL ATIKLARDAN ELDE EDİLEN KİMYASAL ÜRÜNLER**  
**İLE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MEKANİK**  
**ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**Başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 10/04/2012 gün ve 1452 sayılı**  
**kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**DOKTORA TEZİ**  
**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

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

**Üye : Prof.Dr. Fazıl ÇELİK .....**

**Üye : Prof.Dr. Ömer DALMAN .....**

**Üye : Doç.Dr. Gençğa PÜRÇEK .....**

**Üye : Doç.Dr. Şeref ORUÇ .....**

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

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında emek ve desteğini benden esirgemeyen, değerlendirmeleri ve tespitleriyle çalışmama büyük katkı sağlayan tez danışmanım sayın Doç.Dr. Şeref ORUÇ'a, doktora eğitimim boyunca ders aldığım ve kendilerinden gerek akademik gerekse insani olarak çok şey öğrendiğim sayın hocalarım Prof.Dr. Fazıl ÇELİK ve Yrd.Doç.Dr. Muhammet Vefa AKPINAR'a, tez konunun belirlenmesinde ve ileriki aşamalarda görüşleriyle destek veren değerli hocam sayın Doç.Dr. Kemal SANCAK'a öncelikle teşekkür ederim. Tez savunma sınavımda yer alarak tezime değer katan çok değerli hocalarım sayın Prof.Dr. Abdullah Hilmi LAV'a ve sayın Prof.Dr. Ömer DALMAN'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tezimin kimyasal aşamasına büyük destek sağlayan sayın Yrd.Doç.Dr. Elvan ÜSTÜN'e, Doç.Dr. Genççağa PÜRÇEK'e ve Arş.Gör. Neslihan ŞAHİN'e, Superpave bağlayıcı deneylerinin yapımında bana laboratuvarlarını açan ve tezime önemli katkı ve zenginlik katan değerli hocalarım sayın Yrd.Doç.Dr. Baha Vural KÖK'e ve Dr. Mehmet YILMAZ'a, deneyler için gerekli malzemelerin sağlanması ve karışım deneylerinde numunelerin hazırlanması sırasında çok önemli desteklerini gördüğüm Karayolları 16.Bölge Müdürlüğü personellerinden sayın İnş. Yük. Müh. Celil GÜMÜŞER'e ve başta sayın Sami GEMİCİ ve sayın Yusuf YELMEN olmak üzere tüm laboratuvar çalışanlarına göstermiş oldukları ilgi ve sağduyu için teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım sırasında ellerinden gelen her türlü imkânı ve kolaylığı bana sağlayan Cumhuriyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki değerli hocalarıma, çalışma arkadaşlarıma ve değerli arkadaşım Bahadır YILMAZ'a şükranlarımı sunuyorum.

Son olarak çalışmalarım sırasında bana her zaman destek olan ve varlıklarıyla güç veren eşim Muhsine Sanem BOSTANCIOĞLU'na, kızım Duha BOSTANCIOĞLU'na ve tüm aileme sevgilerimi sunarım.

Murat BOSTANCIOĞLU

TRABZON 2012



## TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “BİTKİSEL ATIKLARDAN ELDE EDİLEN KİMYASAL ÜRÜNLER İLE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Şeref ORUÇ’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 05 /04 / 2012

Murat BOSTANCIOĞLU

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No</u></b>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ .....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Konunun Özgeçmişi.....	3
1.3. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol.....	10
1.4. Bitümlü Bağlayıcılar.....	12
1.4.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi, Yapısı ve Reolojisi.....	14
1.4.1.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi ve Yapısı.....	14
1.4.1.2. Bitümün Reolojisi.....	16
1.4.2. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler.....	18
1.4.2.1. Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri.....	19
1.4.2.2. Superpave Bağlayıcı Deneyleri.....	23
1.5. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar.....	31
1.5.1. Agregalarda Minerolojik Sınıflandırma.....	32
1.5.2. Agregalarda Boyut Sınıflandırması.....	32
1.5.3. Agregalarda Gradasyon Sınıflandırması.....	33
1.5.4. Agregalarda Biçim ve Yüzey Yapısı.....	34
1.5.5. Agregalarda Porozite, Yüzey Alanı ve Boşluk.....	35
1.5.6. Agregalarda Özgül Ağırlık.....	36
1.5.7. Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	37
1.6. Bitümlü Sıcak Karışımlar.....	38

1.6.1.	Bitümlü Sıcak Karışımların Özellikleri.....	40
1.6.1.1.	Stabilite.....	40
1.6.1.2.	Rijitlik.....	41
1.6.1.3.	Dayanıklılık (Durabilite).....	42
1.6.1.4.	Yorulma Mukavemeti.....	42
1.6.1.5.	Esneklik (Fleksibilite).....	43
1.6.1.6.	Geçirimsizlik.....	43
1.6.1.7.	Kayma Direnci.....	43
1.6.1.8.	İşlenebilirlik.....	44
1.6.2.	Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar.....	44
1.6.2.1.	Deformasyonlar.....	45
1.6.2.1.1.	Tekerlek İzi Oluşumu.....	45
1.6.2.1.2.	Oturmalar ve Çökmeler.....	47
1.6.2.1.3.	Ondülasyonlar (Dalgalanmalar veya Yığılmalar) ve Kabarmalar....	48
1.6.2.2.	Ayrışmalar.....	48
1.6.2.2.1.	Sökülmeler.....	49
1.6.2.2.2.	Soyulmalar.....	49
1.6.2.3.	Çatlaklar.....	49
1.6.2.3.1.	Timsah Sırtı Çatlaklar.....	50
1.6.2.3.2.	Düşük Isı Çatlakları.....	51
1.6.2.3.3.	Diğer Çatlaklar.....	52
1.6.3.	Bitümlü Sıcak Karışımların Dizayn Yöntemleri.....	52
1.6.4	Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler.....	53
1.6.4.1.	Marshall Metodu ile Karışım Dizaynı.....	53
1.6.4.2.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi.....	58
1.6.4.3.	Su Hasarı (Modifiye Lottman) Deneyi.....	59
1.6.4.4.	Dolaylı Çekme Deneyi.....	62
1.6.4.5.	Nicholson Soyulma Deneyi.....	64
1.7.	Bitümün ve Bitümlü Karışımların Modifiye Edilmesi.....	65
1.7.1.	Bitüm Katkı Maddelerinde ve Modifiye Bitümlerde Aranılan Özellikler.....	67
1.7.2.	Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması.....	67
1.8.	Bitkisel Atıklardan Aktif Karbon ve Furfural Üretimi.....	71

1.8.1.	Aktif Karbon Üretimi, Özellikleri ve Karakterizasyonu.....	73
1.8.1.1.	Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR).....	76
1.8.1.2.	Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM).....	77
1.8.2.	Furfural Üretimi.....	77
2.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	80
2.1.	Fındık Kabuklarından Aktif Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu...	80
2.2.	Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması.....	83
2.3.	Orijinal ve Modifiye Bitüm Özelliklerinin Belirlenmesi.....	85
2.4.	Modifiye Edilmiş Bağlayıcılar ile Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması.....	86
2.5.	Bitümlü Sıcak Karışım Özelliklerinin Belirlenmesi.....	89
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	91
3.1.	FTIR ve TEM Analizi Sonuçları.....	91
3.2.	Optimum Modifiyer Boyutu ve Oranlarının Belirlenmesi.....	96
3.3.	Penetrasyon, Yumuşama Noktası, Düktilite ve Parlama Noktası Deney Sonuçları.....	97
3.4.	TFOT Sonuçları.....	100
3.5.	DSR Deney Sonuçları.....	102
3.6.	RV Deney Sonuçları.....	108
3.7.	Modifiye Bağlayıcıdan Süzülen C <sub>A</sub> 'nın FTIR Analizi Sonuçları....	112
3.8.	Bitümlü Sıcak Karışım Deney Sonuçları.....	113
3.8.1.	Marshall Stabilite Deney Sonuçları.....	113
3.8.2.	Dolaylı Çekme Mukavemeti ve Modifiye Lottman Deneyi Sonuçları.....	116
3.8.3.	Dolaylı Çekme Deney Sonuçları.....	117
3.8.4.	Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları.....	121
3.8.5.	Karışımların Ekonomik Analizi.....	122
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	125
5.	KAYNAKLAR.....	130
6.	EKLER.....	137
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

BİTKİSEL ATIKLARDAN ELDE EDİLEN KİMYASAL ÜRÜNLER İLE BİTÜMLÜ  
SICAK KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Murat BOSTANCIOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç.Dr. Şeref ORUÇ  
2012, 136 Sayfa, 22 Ek Sayfalar

Bu çalışmada fındık kabuğu atıklarından kimyasal aktivasyon yöntemi ile elde edilen aktif karbonun ve bitkisel atıkların asidik hidrolizi ile elde edilen furfuraldan üretilmiş furan reçinesinin bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla 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 geleneksel bağlayıcı deneyleri, İnce Film Halinde Isıtma (TFOT), Dinamik Kayma Reometresi (DSR) ve Dönel Viskozimetre (RV) deneyleri uygulanarak bağlayıcı özellikleri belirlenmiştir. 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), Su Hasarı (Modifiye Lottman), Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) ve Nicholson deneyleri uygulanmıştır. Karışım deneylerinden elde edilen sonuçlara göre her iki modifiyede karışımların tekerlek izinde oturmaya karşı direncini artırmış, tekrarlı yükler altında yorulma dayanımını geliştirmiştir. Nem hasarına karşı direnç dikkate alındığında ise furan reçinesinin aktif karbona kıyasla çok daha etkin bir katkı malzemesi olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fındık kabuğu, Aktif karbon, Furan reçinesi, Bitüm modifikasyonu, Bitümlü sıcak karışım

PhD. Thesis

SUMMARY

DEVELOPING THE MECHANICAL PROPERTIES OF HOT MIX ASPHALT BY  
CHEMICAL PRODUCTS OBTAINED FROM VEGETIVE WASTES

Murat BOSTANCIOĞLU

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Şeref ORUÇ  
2012, 136 Pages, 22 Pages Appendix

In this study, using of activated carbon produced from hazelnut shells by the chemical activation method and the furan resin produced from furfural which obtained by the acid-catalysed hydrolysis of vegetive residues were investigated for bitumen modification. For this purpose activated carbon obtained in different activation conditions in laboratuary was characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscope (SEM) methods. Conventional tests and Thin Film Oven (TFOT), Dynamic Shear Rheometer (DSR) and Rotational Viscosimeter (RV) tests were studied for detemining of modified binder specifications which prepared with activated carbon and furan resin in different size, percentage and mixing conditions. Experimental results indicated that either activated carbon or furan resin increased the bitumen stiffness, decreased the temperature susceptibility and developed the rheologic properties. Marshall Stability, Indirect Tensile Strength (ITS), Water Damage (Modified Lottman), Indirect Tensile Strength Modulus and Nicholson tests were studied for determining of mechanical properties of mixtures which prepared by modified binders. According to mixture test results, both of the modifiers increased the rutting resistance of mixtures and developed the fatigue resistance under repeated loads. Considering the moisture damage resistance, it was determined that furan resin is more effective modifier than the activated carbon.

**Key Words:** Hazelnut shell, Activated carbon, Furan resin, Bitumen modification, Hot mix asphalt

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.	Bitüm ile agrega arasındaki adezyon-kohezyon davranışı..... 13
Şekil 2.	Ham petrolden bitüm elde edilme süreci..... 14
Şekil 3.	Viskoelastik davranış ve yay-amortisör modeli..... 18
Şekil 4.	25°C su banyosunda deney numuneleri ve penetrason deney aleti... 19
Şekil 5.	Yumuşama noktası deneyi..... 20
Şekil 6.	Düktilite deney aleti..... 21
Şekil 7.	Yarı-otomatik Cleveland parlama noktası deney aleti..... 22
Şekil 8.	İnce film halinde ısıtma deneyi..... 22
Şekil 9.	Dönel ince film etüvü ve deney öncesi ve sonrasında şişelerin durumu..... 24
Şekil 10.	PAV deney aleti..... 25
Şekil 11.	DSR deneyinde deformasyon yönleri..... 26
Şekil 12.	Bohlin DSRII dinamik kayma reometresi..... 26
Şekil 13.	Viskoelastik davranış..... 27
Şekil 14.	Visko-elastik malzemelerin gerilme deformasyon ilişkisi..... 28
Şekil 15.	Brookfield viskozimetresi..... 29
Şekil 16.	BBR deney aleti ve asfalt kirış numune..... 30
Şekil 17.	Sünme oranı değerinin belirlenmesi..... 31
Şekil 18.	Agrega gradasyon tipleri ve görsel dağılımı..... 34
Şekil 19.	Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimleri 36
Şekil 20.	Tipik bir üstyapı enkesiti..... 39
Şekil 21.	Akma tekerlek izi oluşumu..... 46
Şekil 22.	Yapısal tekerlek izi oluşumu..... 47
Şekil 23.	Kaplamada oturma (a) ve çökme (b)..... 48
Şekil 24.	Timsah sırtı çatlak..... 51
Şekil 25.	Bitüm ve agreganın karıştırılması..... 56
Şekil 26.	Kalıplara dökülen karışımın sıkıştırılması..... 56
Şekil 27.	Briketlerin su banyosunda kür edilmesi ve Marshall deneyi..... 57
Şekil 28.	Dolaylı çekme mukavemeti deneyi..... 59
Şekil 29.	Numunelerin suya doyurulması..... 61

Şekil 30.	Numunelerin -18°C ve 60°C’de kür edilmeleri.....	61
Şekil 31.	ITSM deney düzeneği.....	63
Şekil 32.	Nicholson soyulma deneyinin yapılışı.....	65
Şekil 33.	Bitkisel hammadeden kimyasal ürün elde edilmesi.....	72
Şekil 34.	Kimyasal aktivasyon ile aktif karbon üretimi.....	75
Şekil 35.	Furfural üretimi.....	79
Şekil 36.	1-2 mm arasında öğütülmüş fındık kabukları.....	81
Şekil 37.	Karbonizasyon deney düzeneği.....	82
Şekil 38.	FTIR analizinde kullanılan pelletleme cihazı (a) ve FTIR spektrometresi (b).....	82
Şekil 39.	KBr ile hazırlanmış C <sub>A</sub> pelletleri.....	83
Şekil 40.	Üç farklı boyutta elenmiş C <sub>A</sub> numuneleri.....	84
Şekil 41.	Furan reçinesi ve sertleştiricisi.....	84
Şekil 42.	C <sub>A</sub> ’nın modifiye karışım içinden süzülmesi ve kurutulması.....	85
Şekil 43.	Karışımlarda kullanılan agrega gradasyon eğrisi.....	87
Şekil 44.	Marshall briketlerinin hazırlanması.....	89
Şekil 45.	Nicholson soyulma deneyi için hazırlanan numuneler.....	90
Şekil 46.	TFK FTIR grafiği.....	91
Şekil 47.	C <sub>A</sub> 0 FTIR grafiği.....	91
Şekil 48.	C <sub>A</sub> 1 FTIR grafiği.....	92
Şekil 49.	C <sub>A</sub> 2 FTIR grafiği.....	92
Şekil 50.	C <sub>A</sub> 3 FTIR grafiği.....	92
Şekil 51.	C <sub>A</sub> 4 FTIR grafiği.....	93
Şekil 52.	C <sub>A</sub> 5 FTIR grafiği.....	93
Şekil 53.	TEM fotoğrafları a) C <sub>A</sub> 0 b) C <sub>A</sub> 1 c) C <sub>A</sub> 2 d) C <sub>A</sub> 3 e) C <sub>A</sub> 4 f) C <sub>A</sub> 5...	94
Şekil 54.	Penetrasyon değerleri değişimi.....	98
Şekil 55.	Yumuşama noktası değerleri değişimi.....	99
Şekil 56.	PI değerleri.....	99
Şekil 57.	TFOT sonrası ağırlık kayıpları.....	101
Şekil 58.	TFOT sonrası PI değerleri.....	101
Şekil 59.	76°C’deki tekerlek izi dayanım parametreleri.....	104
Şekil 60.	Orijinal bitümün G*/sinδ - sıcaklık ilişkisi.....	105
Şekil 61.	0.063-0.125 mm boyutlu C <sub>A</sub> modifikasyonu için G*/sinδ - sıcaklık ilişkisi.....	105



Şekil 62.	0.125-0.25 mm boyutlu $C_A$ modifikasyonu için $G^*/\sin\delta$ - sıcaklık ilişkisi.....	105
Şekil 63.	Reçine modifikasyonu için $G^*/\sin\delta$ - sıcaklık ilişkisi.....	106
Şekil 64.	0.063 mm'den küçük boyutlu $C_A$ modifikasyonu için $G^*/\sin\delta$ - sıcaklık ilişkisi.....	106
Şekil 65.	70°C'deki faz açıları.....	107
Şekil 66.	70°C'deki $G^*$ değerleri.....	107
Şekil 67.	Bağlayıcıların 135 ve 165°C'deki viskozite değerleri.....	108
Şekil 68.	Sıcaklık-viskozite grafiği (1,2,3 ve 4 no'lu karışımlar).....	109
Şekil 69.	Sıcaklık-viskozite grafiği (5 ve 6 no'lu karışımlar).....	110
Şekil 70.	Sıcaklık-viskozite grafiği (7,8 ve 9 no'lu karışımlar).....	110
Şekil 71.	Sıcaklık-viskozite grafiği (10,11,12 ve 13 no'lu karışımlar).....	110
Şekil 72.	Ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	111
Şekil 73.	Orijinal ve süzüntü $C_A$ FTIR grafiği.....	112
Şekil 74.	Marshall stabilite değerleri.....	115
Şekil 75.	Marshall oranları.....	115
Şekil 76.	Koşullu ve koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti değerleri.....	116
Şekil 77.	Dolaylı çekme mukavemeti oranları.....	117
Şekil 78.	Orijinal karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri.....	118
Şekil 79.	%4 reçine katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri.....	118
Şekil 80.	%5 reçine katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri.....	119
Şekil 81.	%6 reçine katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri.....	119
Şekil 82.	%10 $C_A$ katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri.....	119
Şekil 83.	%15 $C_A$ katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri.....	120
Şekil 84.	%20 $C_A$ katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme zaman grafikleri.....	120
Şekil 85.	Esneklik modülü değerleri.....	121
Şekil 86.	Nicholson soyulma değerleri.....	122
Ek Şekil 1.	Orijinal karışım için Marshall grafikleri.....	139
Ek Şekil 2.	%4 reçine katkılı karışım için Marshall grafikleri.....	141
Ek Şekil 3.	%5 reçine katkılı karışım için Marshall grafikleri.....	143
Ek Şekil 4.	%6 reçine katkılı karışım için Marshall grafikleri.....	145

Ek Şekil 5.	%10 $C_A$ katkılı karışım için Marshall grafikleri.....	147
Ek Şekil 6.	%15 $C_A$ katkılı karışım için Marshall grafikleri.....	149
Ek Şekil 7.	%20 $C_A$ katkılı karışım için Marshall grafikleri.....	151

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.	Dört farklı bitümün kimyasal kompozisyonu..... 15
Tablo 2.	Superpave bağlayıcı deneyleri..... 23
Tablo 3.	Aşınma tabakası için gradasyon limitleri..... 54
Tablo 4.	Karışımın tolerans sınırları..... 54
Tablo 5.	Malzemelerin karıştırma sıcaklıkları..... 55
Tablo 6.	Asfalt betonu dizayn kriterleri..... 58
Tablo 7.	Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması..... 68
Tablo 8.	Polimer olan ve polimer olmayan katkı maddeleri..... 69
Tablo 9.	Yaygın olarak kullanılan bazı modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkisi..... 69
Tablo 10.	Yaygın olarak kullanılan asfalt modifiyerlerin muhtemel olumlu etkileri..... 70
Tablo 11.	Yaygın lignoselülozik maddelerin selüloz, hemiselüloz ve lignin içerikleri..... 72
Tablo 12.	Bazı hammaddelerin furfural verimleri..... 78
Tablo 13.	Orjinal bitüme ait özellikler..... 80
Tablo 14.	Furan reçinesine ait özellikler..... 80
Tablo 15.	Asit derişimleri..... 81
Tablo 16.	Kalker agrega özellikleri..... 86
Tablo 17.	Agrega elek analizleri ve kullanılan gradasyon..... 88
Tablo 18.	Farklı karışım koşulları için yumuşama noktası deney sonuçları (°C/°K)..... 96
Tablo 19.	Optimum karışımlar..... 97
Tablo 20.	Farklı karıştırma süreleri için yumuşama noktası deney sonuçları (°C/°K)..... 97
Tablo 21.	Penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama noktası ve PI değerleri..... 98
Tablo 22.	TFOT sonuçları..... 101
Tablo 23.	DSR deney sonuçları..... 103
Tablo 24.	RV deney sonuçları..... 108
Tablo 25.	Modifiye bitümlere ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları..... 111
Tablo 26.	Karışım deneylerinde kullanılan kodlar ve modifiyer tipleri..... 113
Tablo 27.	Marshall stabilite deneyi sonuçları..... 114

Tablo 28.	Dolaylı çekme mukavemeti ve modifiye Lottman deneyi sonuçları.....	116
Tablo 29.	Dolaylı çekme deney sonuçları.....	120
Tablo 30.	Nicholson soyulma değerleri.....	122
Tablo 31.	Ekonomik analizde kullanılan birim fiyatlar.....	123
Tablo 32.	Karışımlara ait ekonomik analiz sonuçları.....	124
Ek Tablo 1.	Marshall stabilite düzeltme katsayıları.....	137
Ek Tablo 2.	Orijinal karışıma (K1) ait Marshall f6yü.....	138
Ek Tablo 3.	%4 furan reğinesini katkılı karışıma (K2) ait Marshall f6yü.....	140
Ek Tablo 4.	%5 furan reğinesini katkılı karışıma (K3) ait Marshall f6yü.....	142
Ek Tablo 5.	%6 furan reğinesini katkılı karışıma (K4) ait Marshall f6yü.....	144
Ek Tablo 6.	%10 C <sub>A</sub> katkılı karışıma (K5) ait Marshall f6yü.....	146
Ek Tablo 7.	%15 C <sub>A</sub> katkılı karışıma (K6) ait Marshall f6yü.....	148
Ek Tablo 8.	%20 C <sub>A</sub> katkılı karışıma (K7) ait Marshall f6yü.....	150
Ek Tablo 9.	Orijinal karışıma (K1) ait dolaylı çekme mukavemeti f6yü.....	152
Ek Tablo 10.	%4 furan reğinesini katkılı karışıma (K2) ait dolaylı çekme mukavemeti f6yü.....	153
Ek Tablo 11.	%5 furan reğinesini katkılı karışıma (K3) ait dolaylı çekme mukavemeti f6yü.....	154
Ek Tablo 12.	%6 furan reğinesini katkılı karışıma (K4) ait dolaylı çekme mukavemeti f6yü.....	155
Ek Tablo 13.	%10 C <sub>A</sub> katkılı karışıma (K5) ait dolaylı çekme mukavemeti f6yü.....	156
Ek Tablo 14.	%15 C <sub>A</sub> katkılı karışıma (K5) ait dolaylı çekme mukavemeti f6yü.....	157
Ek Tablo 15.	%20 C <sub>A</sub> katkılı karışıma (K5) ait dolaylı çekme mukavemeti f6yü.....	158

## SEMBOLLER DİZİNİ

c	: Kohezyon
d	: Numune çapı
D <sub>p</sub>	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
D <sub>T</sub>	: Gevşek kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı
E <sub>m</sub>	: Esneklik modülü
G*	: Kompleks kayma modülü
G <sub>b</sub>	: Bitüm özgül ağırlığı
G <sub>ef</sub>	: Agregada efektif özgül ağırlığı
G <sub>fa</sub>	: Filler zahiri özgül ağırlığı
G <sub>ia</sub>	: İnce agregada zahiri özgül ağırlığı
G <sub>ib</sub>	: İnce agregada hacim özgül ağırlığı
G <sub>ka</sub>	: Kaba agregada zahiri özgül ağırlığı
G <sub>kb</sub>	: Kaba agregada hacim özgül ağırlığı
G <sub>sa</sub>	: Agregada karışımının zahiri özgül ağırlığı
G <sub>sb</sub>	: Agregada karışımının hacim özgül ağırlığı
h	: Numune yüksekliği
H <sub>y</sub>	: Toplam yatay deformasyon
ı	: Isı
mdeğer	: Sünme oranı
P	: Yük
P <sub>ba</sub>	: Absorbe edilen bitüm
P <sub>be</sub>	: Efektif bitüm
Pen <sub>25</sub>	: Bitümün 25°C'deki penetrasyon değeri
PI	: Penetrasyon indeksi
R <sub>m</sub>	: Rijitlik modülü

S	: Sünme sertliği
t	: Zaman
V <sub>d</sub>	: Düşey deformasyon
V <sub>f</sub>	: Asfaltla dolu boşluk
V <sub>h</sub>	: Toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşluğu
VMA	: Agregalar arası boşluk yüzdesi
YN	: Yumuşama noktası
W <sub>a</sub>	: Kuru agregaya yüzdesi olarak bitüm
%K	: Kaba agregaya yüzdesi
%İ	: İnce agregaya yüzdesi
%F	: Filler yüzdesi
δ	: Faz açısı
Δt	: Zaman aralığı
τ	: Kayma mukavemeti
σ	: Gerilme
φ	: İçsel sürtünme açısı
ε	: Şekil değiştirme
υ	: Poisson oranı

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Araç tekerleklerinin direkt olarak temas ettiği dolayısıyla en büyük gerilmelere maruz kalan, güvenli ve konforlu bir sürüşten birinci derecede sorumlu olan esnek kaplama tabakası, üstyapının en önemli kısmını teşkil etmektedir. Kaplama tabakası, üzerine etki eden yüklere karşı bozulmadan direnç gösterebilecek ve yükü alt tabakalara iletebilecek, suların altyapıya sızmasına engel teşkil edecek, bölgenin olumsuz iklim koşullarında kararlılığını yitirmeyecek, pürüzsüz ve konforlu bir sürüş temin edecek nitelikte olmalıdır [1,2].

Ülkemizde kullanılan esnek kaplama çeşitleri, bitümlü sathi kaplama, soğuk karışım asfalt kaplama ve bitümlü sıcak karışım kaplama olarak üçe ayrılmaktadır [3]. Sağladığı konfor ve dayanıklılık sebebiyle pek çok gelişmiş ülkede kullanılan bitümlü sıcak karışımlar (BSK) son yıllarda ülkemiz karayollarının yapımında da diğer kaplama tiplerine nazaran daha sıklıkla tercih edilen bir esnek kaplama tipidir. 2006 yılında 59350 km uzunluktaki kaplamalı yolların 7204 km devlet ve il yolu, 1987 km otoyol olmak üzere toplam 9191 km'si BSK iken 2012 yılı itibariyle 61596 km uzunluktaki kaplamalı yolların 11572 km devlet ve il yolu, 2199 km otoyol olmak üzere toplam 13771 km'si BSK olarak üretilmiştir. Buna göre 2006 yılında BSK, toplam kaplamalı yolların %15,49'unda kullanılırken bu oran 2012 yılında %22,36'ya çıkmıştır [1,4,5].

Ekonomik kalkınma ve yaşam standartlarının yükselmesine bağlı olarak artan trafik hacmi, dingil yükleri ve lastik basınçları ile birlikte yol yapımında meydana gelen üretim hataları, yetersiz bakım ve iklim koşulları etkisi altında esnek üstyapı kaplamalarında tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları, düşük ısı çatlakları ve suya karşı hassasiyet gibi bozulmalar oluşmaktadır, bu da yolun proje ömrünü ve konfor düzeyini düşürmektedir. Bu durum mevcut kaplama malzemelerinin özelliklerinin geliştirilmesini gerektirmektedir.

Esnek kaplamalar mineral agregası, filler, bitüm ve havadan oluşan çok fazlı karmaşık bir yapı malzemesidir [6-11]. Esnek üstyapı kaplamalarında bağlayıcı olarak kullanılan bitüm, %5-7 gibi düşük oranlarda kullanılmasına rağmen kaplamanın performansı ve davranışı açısından büyük öneme sahiptir. Esnek bir üstyapı kaplamasının uzun süre yüksek seviyede performans göstermesi beklenir ancak klasik bağlayıcılar ile

sağlanamayan bu performansın elde edilebilmesi için klasik bitüm özelliklerinin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi gerekmektedir. Katkı maddeleri bitümlü bağlayıcıya eklenebildiği gibi hazırlama esnasında doğrudan karışıma da eklenebilmektedir [1,12,13].

Bitüm modifikasyonu ve özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla çeşitli polimerler [14,15], karbon bazlı malzemeler [6,16-19] ve farklı hammaddelerden üretilmiş çeşitli modifiyerler ve atık malzemeler [9,12,13,20-31] kullanılmaktadır.

Enerji ihtiyacımızın büyük bir bölümünü karşılayan fosil enerji kaynaklarının rezervlerinin azalması ve artan fiyatları, yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarının yaygın olarak kullanımını gerektirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş, rüzgar, hidrolik, jeotermal, dalga ve biyokütle enerji kaynakları şeklinde sıralanabilir. “Biyokütle” temel bileşenleri karbonhidrat bileşikleri olan, kısa sürede yenilenebilen bitkisel ve hayvansal kökenli tüm doğal maddeler olarak tanımlanabilir. Termokimyasal bozundurma süreçleri ile biyokütle aktif karbon, etanol, asetik asit, formik asit, metanol ve furfural gibi ürünlere dönüştürülmekte ve bu ürünler enerji üretiminde ve çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılabilir [32-34].

Aktif karbon ( $C_A$ ), yüksek poroz yapısı sebebiyle gazların ve çözücü içindeki çözünümlü maddelerin absorblanmasında kullanılan amorf ve geniş iç yüzey alanına sahip bir malzeme olup elde edilmesi için sıklıkla kömür ve bitkisel kaynaklı lignoselülozik hammaddeler (meyve kabukları, çekirdekleri vb.) kullanılmaktadır.  $C_A$  üretiminde fiziksel ve kimyasal aktivasyon olarak iki tip üretim teknolojisi mevcuttur. Fiziksel aktivasyon iki basamaktan oluşmaktadır. İlk basamakta karbonize edilen hammaddeye ait karbonizasyon katı ürünü (char), ikinci basamakta  $800-1100^{\circ}C$ 'de karbondioksit veya buhar ile aktive edilir. Kimyasal aktivasyonda ise karbonizasyon işleminden önce hammadde kimyasal ajanlar ile aktifleştirilir. Kimyasal ajan bir dehidrasyon ajanı olarak görev yapar ve karbonizasyon sırasında katran oluşumunu sınırlar. Bu aşamada en çok kullanılan kimyasal ajanlar fosforik asit ( $H_3PO_4$ ), çinko klorür ( $ZnCl_2$ ), potasyum hidroksit (KOH) ve sülfirik asittir ( $H_2SO_4$ ) [35-38].

Furfural, renksiz bir sıvı aldehit olup pentozan içeren lifli bitkisel atıkların asit katalizörlüğünde hidrolizi ile elde edilmektedir. Başlıca kullanım alanı petrokimya sanayidir. Petrol arıtımında seçici çözügen olarak kullanılmakta, gaz yağı ve dizel yakıtlarda doymuş hidrokarbonları doymamış hidrokarbonlardan ayırmaktadır. Furfural içeren termoset reçineler korozyona karşı direnç, yüksek karbon verimi, yüksek sıcaklıkta



kararlılık, düşük yangın tehlikesi ve mükemmel fiziksel dayanıklılık göstermektedir [33,34].

Son yıllarda Türkiye’de endüstriyel üretime, tarıma ve evsel faaliyetlere dayalı birçok atık malzeme oluşmuştur. Bu atıklar, depolama alanlarının ve geri dönüşüm olanaklarının sınırlı olması sebebiyle çevre kirliliği ve depolama maliyeti bakımından büyük bir problem teşkil etmektedir [21,30]. Bu durum atıkların geri dönüşümü şeklinde bir sektör oluşturmuş ve asfalt modifikasyonu çalışmalarında da çüruf, atık cam, atık araç lastiği ve atık plastik gibi maddeler kullanılarak bitüm ve bitümlü karışımlara olan etkileri değerlendirilmiştir [23,30]. Fındık kabuğu da özellikle ülkemiz için atık potansiyeli yüksek olan bir biyokütle kaynağıdır. Dünya fındık üretiminin yaklaşık %60-70’ini karşılayan ülkemizde 2010 yılında yaklaşık 600000 ton fındık üretilmiştir (TÜİK,2012) [32,33].

## 1.2. Konunun Özgeçmişi

Günümüzde bitümlü bağlayıcıların ve BSK’nın modifiye edilmesi ve kaplama özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla pek çok çalışma yapılmakta ve bu çalışmalarda değişik modifiyer malzemeler kullanılmaktadır. Literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalar, kullanılan malzemeler ve sağlanan iyileştirmeler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Bitüm modifikasyonunda son yıllarda sıklıkla kullanılan Stiren-Butadien-Stiren (SBS) polimerinin bağlayıcıların yüksek sıcaklık performanslarına ve işlenebilirliklerine etkisinin değerlendirildiği bir çalışmada orijinal bağlayıcı içerisine %2, 4 ve 6 oranlarında SBS katılmıştır. SBS’nin bağlayıcı içerisine homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla 170°C sıcaklıkta 500 rpm hızda 90 dk karıştırma işlemi uygulanmıştır. Modifiye edilen bağlayıcılara ait özellikler Dönel İnce Film Halinde Isıtma deneyi (RTFOT), Dinamik Kayma Reometresi (DSR) ve Dönel Viskozimetre (RV) deneyleri ile belirlenmiştir. Çalışmada modifiye edilmiş bağlayıcıların tekerlek izinde oturma performanslarının orijinal bağlayıcıya oranla arttığı işlenebilirliklerinin ise azaldığı gözlenmiştir [3].

%2-6 oranlarında SBS ve %3-7 oranlarında Etilen-Vinil-Asetat (EVA) polimerleri ile yapılan başka bir çalışmada polimer malzemeler bağlayıcı içerisine 185°C’de 125 rpm ve 1100 rpm şeklinde iki farklı hızda karıştırılmıştır. Karıştırma süresi ise en yüksek sıcaklığa ulaşıldıktan sonra iki saat olarak belirlenmiştir. Her iki polimer ile yapılan modifikasyonunun penetrasyon, yumuşama noktası ve sıcaklık hassasiyeti gibi geleneksel

bağlayıcı özelliklerini geliştirdiği ayrıca artan polimer oranı ile Marshall stabilite değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. SBS ve EVA ile modifiye edilmiş karışımların akma değerleri orijinal karışıma oranla yüksek çıkmasına rağmen modifiye karışımlar tekerlek izinde oturmaya karşı daha yüksek direnç göstermişlerdir [39].

SBS kullanılarak yapılan bir diğer modifikasyon çalışmasında SBS'nin ekonomik ve teknik açılardan kullanımının limitli olmasına karşın bitüm modifikasyonuna en uygun polimer olduğu ancak düşük ısılarda elastikliği artıran bu polimerin yüksek sıcaklıklarda penetrasyon ve mukavemet kaybına yol açtığı belirtilmiştir [14]. Kullanım maliyeti yüksek olan bu polimerin daha ekonomik olarak değerlendirilmesi amacıyla yapılan bir çalışmada yalnız SBS kullanılarak modifiye edilen bağlayıcılara ait reolojik özellikler, SBS ve gilsonitin değişik oranlarda beraber kullanıldığı modifiye bağlayıcıların reolojik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar %1 oranında daha az SBS kullanılması için gereken gilsonit miktarının normalden 3-4 kat daha fazla olmasına rağmen gilsonitin SBS maliyetini azaltacak bir modifiyer olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur [40].

BSK'nın soyulma potansiyeli ve suya karşı hassasiyeti üzerinde SBS ve EVA polimerlerinin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada bahsedilen özelliklerin değerlendirilmesi amacıyla Nicholson soyulma deneyi ve Modifiye Lottman deneyinden elde edilen bulgular mikroskopik görüntüler yardımıyla değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları incelendiğinde kullanılan farklı tipte agrega karışımları için her iki modifiyerin de agrega-bitüm adezyonunu geliştirdiği, soyulma potansiyelini azalttığı ve suya karşı hassasiyetini düşürdüğü belirtilmiştir. Modifiyerlerin performansları karşılaştırıldığında ise SBS'nin EVA'ya oranla daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [41].

SBS kullanımının bitümün yaşlanma özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada %1.5-6.0 arasında değişen oranlarda SBS ile modifiye edilen karışımlar üzerinde İnce Film Halinde Isıtma deneyi (TFOT) ve RTFOT yaşlandırma deneyleri uygulanmıştır. Çalışmada, bahsedilen iki yaşlandırma yöntemi de karşılaştırılmış olup TFOT yönteminde bağlayıcının sadece üst yüzeyinin yaşlanmaya maruz kaldığı ve bu yaşlanmanın tüm numuneyi temsil etmediği belirtilmiş, TFOT yöntemindeki bu olumsuzluğun RTFOT yönteminde bitümün bir cam şişe içerisine tamamen yayılması sağlanarak ortadan kaldırıldığı ifade edilmiştir. Modifiye bağlayıcılar malzemelerin 170°C'de 500 rpm hızda ve 90 dk karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Çalışma sonuçları SBS oranı arttıkça bağlayıcıların yumuşama noktalarının arttığını, penetrasyon ve sıcaklık

hassasiyetlerinin azaldığını ayrıca yaşlanmadan ötürü meydana gelen kütle kayıplarının azaldığını göstermiştir [42].

Tektaş Ulaştırma Enstitüsünde yapılan bir çalışmada Stiren-Butadien-Rubber (SBR) modifiyerinin BSK'nın Hveem ve Marshall standartlarına göre belirlenen stabilite değerlerini artırdığı, çekme mukavemeti, rijitlik modülü ve nem hassasiyeti özelliklerini geliştirdiği belirtilmiştir [14].

SBS modifikasyonu ile öğütülmüş atık lastik modifikasyonun bitüm ve bitümlü karışımlar üzerindeki etkilerini karşılaştırmak için yapılan bir çalışmada SBS ve öğütülmüş atık lastik kullanılarak hazırlanan bağlayıcılara geleneksel bağlayıcı deneyleri ile birlikte RV ve DSR deneyleri uygulanmış ayrıca modifiye karışımların kalıcı deformasyon ve yorulma karakteristikleri ile rijitlik modülleri belirlenmiştir. Karışımların hazırlanmasında %2-6 oranları arasında SBS ve %3-15 oranları arasında atık lastik kullanılmıştır. Malzemeler 180°C'de bir saat 1000 rpm hızda karıştırılarak modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde SBS modifikasyonu ile aynı performansı gösterebilmesi için kullanılması gereken öğütülmüş lastik miktarının SBS miktarından daha fazla olduğu belirtilmiş ve hem bağlayıcı hem de karışım modifikasyonunda kullanılacak optimum öğütülmüş lastik oranı %8 olarak tespit edilmiştir [2011-4]. Öğütülmüş atık araç lastikleri kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada atık lastiğin asfalt betonunun yorulma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiş ve %5 oranındaki atık lastiğin 50 penetrasyon bitümün yorulma dayanımını 2 kat, 100 penetrasyon bitümün yorulma dayanımını ise 23 kat artırdığı tespit edilmiştir [31].

Soda külü üretiminde yan ürün olarak elde edilen atık kirecin mineral filler olarak kullanıldığı bir modifikasyon çalışmasında atık kireç, geleneksel filler malzemesinin %25, 50, 75 ve 100'ü oranlarında karışıma katılmış ve atık kirecin geri dönüşüm olanağı değerlendirilmiştir. Modifiye karışımların Marshall stabilitesi, indirek çekme mukavemeti, esneklik modülü, kalıcı deformasyon karakteristiği, nem hassasiyeti ve yorulma direnci gibi mühendislik özellikleri incelenerek atık kireç ile modifiye edilmiş BSK'nın kalıcı deformasyon karakteristiklerinin geliştiği, rijitliğinin ve yorulma dayanımının arttığı ve soyulmaya karşı direncinin yükseldiği saptanmıştır [28].

Atık plastik çantaların 20x3 mm boyutunda kesilerek bitüm modifiyeri olarak kullanıldığı bir çalışmada bitüm ağırlığına oranla %0.1 ile %0.9 arasında değişen oranlarda atık plastik ile modifikasyon yapılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları, modifikasyonda kullanılması gereken optimum atık plastik oranının %0.5 olduğunu göstermiştir.

Bağlayıcılara ait yumuşama noktası, penetrasyon, duktilite, Marshall stabilitesi ve tekerlek izinde oturma parametrelerinin modifikasyon ile birlikte geliştiği, atık plastik modifikasyonun asfalt betonu maliyetini %9.91 oranında artırdığı ancak atık plastiklerin bu şekilde kullanımının atık yönetimi açısından etkili bir çözüm yolu olacağı vurgulanmıştır [43].

Asfaltitin bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla yapılan bir çalışmada %2, 4, 6 ve 8 oranlarında asfaltit kullanılarak modifiye edilen bağlayıcılar üzerinde klasik bağlayıcı deneyleri, DSR ve RV deneyleri uygulanmıştır. Bağlayıcı deneyleri sonucunda penetrasyonun azaldığı, viskozite ve kompleks kayma modülü değerlerinin arttığı gözlenirken yumuşama noktası ve faz açısı değerlerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Asfaltit katkılı bağlayıcılar ile hazırlanan Marshall briketlerine uygulanan deneyler sonucunda ise Marshall dayanımında, dolaylı çekme oranlarında, rijitlik modüllerinde ve yorulma ömürlerinde olumlu gelişmeler sağlandığı ve optimum asfaltit oranının %4 olduğu bildirilmiştir [44].

İran doğal bitümü gilsonitin bağlayıcı modifiyeri olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada %4, 8 ve 12 oranlarında gilsonit kullanılarak modifiye edilen bağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklık performansları RV, DSR ve BBR deneyleri ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları gilsonitin, bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını artırdığını ancak düşük sıcaklık performansı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir [45].

Yüksek yoğunluklu atık polietilenin bitüm modifiyeri olarak kullanılabilirliğinin değerlendirildiği bir çalışmada Marshall yöntemi ile bulunan optimum bitüm miktarına oranla %4, 6 ve 8 oranlarında atık polietilen kullanılarak bağlayıcı modifikasyonu yapılmıştır. Modifiye bağlayıcıların hazırlanması için atık polietilen orijinal bağlayıcı içerisine 145, 155 ve 165°C sıcaklıklarda ve 5, 15 ve 30 dk karıştırma sürelerinde karıştırılmıştır. Modifiye edilmiş bağlayıcılar ile hazırlanan karışımların Marshall stabilitesi ve kalıcı deformasyon dirençleri ölçülmüş, polietilen modifiyeli karışımlarda kontrol karışımına kıyasla kalıcı deformasyon direnci bakımından %50'ye varan iyileşmeler gözlenmiş ve polietilenin bitüm ile optimum karıştırma koşulları 165°C karıştırma sıcaklığı, 30 dk karıştırma süresi ve %4 polietilen oranı olarak belirtilmiştir [21].

Düşük yoğunluklu polietilen, EVA ve akrilat polimerler kullanılarak yapılan bir çalışmada, asfaltın reolojik özelliklerinin geliştiği, EVA ve akrilat polimerler kullanıldığında sıcaklık hassasiyetinde azalma olduğu, özellikle EVA'nın asfaltı

sertleştirdiği ve akrilat polimerlerin yüksek sıcaklıklarda PE'den daha sert olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu maddelerin özellikle PE'nin, asfalt modifikasyonunda kullanıldıklarında iyi depolama stabilitelerine sahip oldukları tespit edilmiştir. Aynı maddelerin karışımda kullanılması durumunda PE'nin tekerlek izi direncinin düşük olduğu, en iyi tekerlek izi direncine sahip karışımın ise akrilat polimer ile modifiye edilmiş karışım olduğu görülmüştür [1].

Laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenen trietilen glikol tabanlı poliboron kullanılarak yapılan bir çalışmada bitüm ağırlığına oranla %1, 2, 3 ve 5 oranlarında poliboron kullanılarak bitüm modifikasyonu yapılmış ve modifiye bitümün ve modifiye karışımların özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yumuşama noktası, Marshall stabilitesi, Nicholson soyulma deneyi, RV, DSR ve Kiriş Eğme Reometresi (BBR) deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda bitüm içerisinde kullanılması gereken optimum poliboron oranı RV deneyine göre %2 olarak belirlenmiş ve kullanılan modifiyerin, bağlayıcının yumuşama noktasını, tekerlek izinde oturma dayanımını ve Marshall stabilitesini artırırken sünme ve soyulma özelliklerine olumsuz bir etki yapmadığı belirlenmiştir [46].

Atık malzemelerin bitüm modifikasyonunda değerlendirilmesi konusunda yapılan bir çalışmada bitümlü bağlayıcı masaüstü yazıcılardan geri kazanılan atık toner ile modifiye edilmiştir. Atık tonerin bağlayıcı içerisine homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla sabit sıcaklıkta 500 rpm hızında 30, 60, 90 ve 120 dk sürelerde karıştırma işlemi uygulanmıştır. Modifiye bağlayıcılara ait karakteristikler DSR, RV, BBR, RTFOT ve Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) deneyleri ile belirlenmiştir. Ayrıca etkin karıştırma süresi, toner oranının performans derecesi üzerindeki etkisi, depolama stabilitesi ve karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları konusunda da gözlemler yapılmıştır. Deney sonuçları bitümün sertliğinin toner oranına bağlı olarak arttığını, özellikle yüksek oranda kullanılan tonerin sertlik üzerinde daha etkili olduğunu göstermiştir. BBR deney sonuçlarına göre sünme sertliğinin arttığı tespit edilmiş ve buna göre toner modifikasyonunun bağlayıcının soğuk hava çatlaklarına karşı hassasiyetini artırdığı belirtilmiştir. Tonerin bitüm ile homojen bir karışım sağlaması için gerekli süre 120 dk olarak tespit edilmiş ve modifiye bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının toleranslar içinde kaldığı vurgulanmıştır. Depolama stabilitesi konusunda yapılan çalışmalar atık tonerin yeterli depolama stabilitesi sağlayamadığını ve agrega ile karıştırılmadan önce bir ön karıştırma işlemi gerektirdiğini ortaya koymuştur [29].

Atık malzemelerin ekonomiye ve çevreye duyarlı olarak değerlendirilmesi amacıyla yapılan diğer bir çalışmada çatı kaplaması polyester atıkları bitüm modifiyeri olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmada toplam karışım ağırlığının %0.35 ve 0.50'si oranlarında polyester fiber kullanılmış ve karışımların dolaylı çekme mukavemetleri ile nem hassasiyetleri değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda modifiye edilmiş karışımların daha yüksek koşullu çekme mukavemeti ve çekme mukavemeti oranı sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca polyester fiber katkılı karışımların hem kuru hem de koşullu tokluk değerleri gelişmiş, boşluk oranları, optimum bitüm içerikleri, birim ağırlıkları, Marshall stabiliteleri ve optimum bitüm içerikleri artmıştır [30].

Geri dönüştürülmüş polietilen ve kullanılmış lastiklerin pirolizinden elde edilmiş pirolitik yağ kullanılarak yapılan bir araştırmada bahsedilen her iki modifiyerinde yüksek sıcaklıkta üstün performans gösterdiği ayrıca %10 pirolitik yağ modifiyeli bitümün düşük sıcaklık performansının da yüksek olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada modifiye bitümlerin Superpave bağlayıcı deneylerine göre belirlenen ve minimum 1 kPa olması gereken tekerlek izinde oturma parametresini sağladıkları en yüksek sıcaklık değerleri ile halka ve top yöntemi ile belirlenmiş yumuşama noktası değerleri arasında bir korelasyon kurulmuş ve iki değer arasında sistematik olarak 20°C fark olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, kullanılan modifiyerlerin geri dönüştürülmüş atık malzeme olması sebebiyle hem ekonomiye hem de çevreye duyarlı olduğu da vurgulanmıştır [18].

Pirolitik yağ ile yapılan başka bir çalışmada öğütülmüş otomobil lastiklerinin 450°C'de vakumlu pirolizi ile elde edilen yağ, bitüm modifiyeri olarak kullanılmıştır. Elde edilen pirolitik yağın düşük oranda aromatik hidrokarbon içerdiği, yüksek yumuşama noktasına ve düşük dinamik viskoziteye sahip olduğu belirlenmiştir. Modifiye bağlayıcıların hazırlanması amacıyla malzemeler 100-110°C'de 15 dk süreyle karıştırılmıştır. Modifikasyonda kullanılan pirolitik yağ oranları %5, 10, 15 ve 30 olarak alınmıştır. Modifiye edilmiş bağlayıcıların tekerlek izinde oturma ve ısıtmada kütle kaybı özellikleri değerlendirilmiş ve pirolitik yağın bitümün sıcaklık hassasiyetini düşürerek yüksek sıcaklık performansını artırdığı tespit edilmiştir. Optimum pirolitik yağ oranının ise karışım ağırlığına oranla %10 olduğu ifade edilmiştir [47].

Bitüm modifiyeri olarak SBR, kömür ve siyah karbonun kullanıldığı bir çalışmada siyah karbonun bitüm modifikasyonunda etkili bir malzeme olduğu ifade edilmiştir. Düzensiz şekli, geniş yüzey alanı ve çeşitlilik gösteren yüzey fonksiyonel grupları ile siyah karbonun bitüm içerisinde yüksek dereceli bağ yapıları oluşturarak bağlayıcıların sıcaklık

hassasiyetlerini düşürdüğü ve düşük sıcaklıktaki esneklik yeteneğini değiştirmeksizin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi performansını artırdığı belirtilmiştir. Çalışmada siyah karbon oranı %2 olarak sabit tutulmuş ve bitüm-siyah karbon karışımına değişik oranlarda kömür ve SBR eklenerek farklı özellikte karışımlar elde edilmiştir. Modifiye bağlayıcıların hazırlanması için malzemeler 175°C sıcaklıkta 3000-4000 rpm hızda ve 50 dk süresince karıştırılmıştır [16].

Buzlanma ile mücadelede kullanılan çözeltilerin ve suyun nano boyutlu kil ve karbon mikrofiber ile modifiye edilmiş asfalt karışımlar üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla yapılan bir çalışmada modifiye edilmiş karışımlara dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulanmıştır. Hazırlanan karışımlar su veya NaCl, MgCl<sub>2</sub> ve CaCl<sub>2</sub> gibi çözeltiler kullanılarak koşullandırılmış ve yedi kez donma çözünme döngüsüne maruz bırakılmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde hem nano kil hem de karbon mikrofiber modifiyeli karışımların su hasarına karşı dirençlerinin arttığı gözlenmiştir. Nano kil oranının artmasının koşullandırılmamış (kuru) dolaylı çekme mukavemetini düşürdüğü ancak koşullu dolaylı çekme mukavemetini ise artırdığı belirtilmiştir [48].

Ticari siyah karbon ve odun hammadesinin 500°C'de vakumlu pirolizi yoluyla elde edilen siyah karbonun %5-15 arasında değişen oranlarda bitüm modifiyeri olarak değerlendirildiği bir araştırmada, 45µm'den daha ince boyutlu olarak elenen modifiyerlerin bağlayıcı içerisine karıştırma sıcaklığı 100-110°C ve karıştırma süresi 13 dk olarak alınmıştır. Yapılan deneyler sonucunda piroliz yoluyla elde edilen siyah karbonun ticari siyah karbona oranla sıcaklık hassasiyeti üzerinde daha etkili olduğu ve tekerlek izinde oturma direnci bakımından da önemli bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan her iki modifiyerinde yüksek sıcaklıkta uzun süren depolama periyotlarında düşük çökelme direnci gösterdikleri belirlenmiştir [17].

Siyah karbonun asfalt betonunda filler olarak kullanılabilirliğinin değerlendirildiği bir çalışmada siyah karbon katkılı ve kontrol karışımlarının mekanik özellikleri Marshall stabilitesi, dolaylı çekme rijitlik modülü, sünme sertliği ve dolaylı çekme mukavemeti deneyleri ile değerlendirilmiştir. Çalışmada siyah karbon filler ile hazırlanan karışımların kalker filler ile hazırlanan karışımlara oranla daha iyi Marshall stabilitesi, akma ve sünme sertliği değerleri sağladığı, 40°C'deki rijitlik modülü değerlerinin de daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca siyah karbon modifikasyonun şartlandırılmış ve şartlandırılmamış dolaylı çekme mukavemeti değerlerini de yükselttiği tespit edilmiştir [6].

Bitüm modifiyeri olarak epoksi reçinenin değerlendirildiği bir çalışmada modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, DSR, Fark Tarama Kalorimetresi (DSC), RTFOT, PAV, BBR ve yüzey gerilme enerjisi deneyleri uygulanmıştır. Modifiye bağlayıcılar ile hazırlanan karışımların adezyon ve stabilite özellikleri ise Nicholson soyulma ve Marshall stabilite deneyleri ile belirlenmiştir. Epoksi reçine bitüme %1-6 arasında değişen oranlarda 150°C sıcaklıkta eklenmiş ve 1 saatlik karıştırma süresi uygulanmıştır. Çalışmada optimum epoksi reçine oranı %2 olarak tespit edilmiş ve bu oranda kullanılan epoksi reçinenin viskozite, yumuşama noktası camsı geçiş sıcaklığı ve stabilite değerlerini artırdığı, sıcaklık hassasiyeti, yüzey enerjisi, penetrasyon ve soyulma değerlerini ise azalttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre epoksi reçine modifikasyonun tekerlek izinde oturma direncini artırdığı, nem hassasiyetini, çatlama, kuma ve soyulma potansiyelini düşürdüğü belirtilmiştir [9].

Asfalt çimentosuna belirli oranlarda Astragalus (kitre zankı) ilave edilerek hazırlanan sıcak karışımlara Marshall deneyi uygulanarak stabilite özelliklerinin incelendiği bir çalışmada %2 astragalus ilavesinin katkısız numunelere göre Marshall stabilite değerini %59 oranında arttırdığı görülmüştür [1].

Polyester reçinenin bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki performansları üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışmada %0.75-3.0 arasında değişen oranlarda polyester reçine ile hazırlanan karışımlar RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmıştır. Yaşlanmış ve yaşlanmamış bağlayıcılar 64°C'de DSR deneyine tabi tutularak kompleks kayma modülleri ve faz açıları elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre artan polyester reçine oranı bağlayıcıların kompleks kayma modüllerini artırırken faz açılarını düşürmüştür. Buna göre polyester reçinenin bağlayıcıların elastiklik özelliklerini ve tekerlek izinde oturma dayanımlarını geliştiren bir katkı maddesi olduğu tespit edilmiştir [12].

### **1.3. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol**

Asfalt kaplamaların, üzerinden geçen trafik yüklerine, çevre ve iklim koşullarına dayanıklı, yüksek performanslı, hizmet ömrü uzun, bakım-onarım maliyeti çok daha düşük olması istenmektedir. Sağladıkları yüksek konfor ve bazı avantajları nedeniyle halen yüksek oranda kullanılmakta olan asfalt kaplamaların ana bileşenleri asfalt ve agregadır. Dolayısıyla, kaplamalardan daha yüksek performans alınabilmesi amacıyla kaplamayı oluşturan ana bileşenlerden asfaltın yeni malzemelerle modifiye edilmesi yönündeki



çalışmalar hızla devam etmektedir. Bu bağlamda, bir taraftan bitkisel atıklardan elde edilen kimyasal ürünlerle asfaltın modifiye edilerek reolojik özelliklerinin iyileştirilmesi ve kaplama performansının artırılması amaçlanmış, diğer taraftan da her yıl binlerce ton atık madde olarak ortaya çıkan fındık kabuğunun değerlendirilmesi esas alınmıştır.

Fındık kabuğu ülkemiz için atık potansiyeli çok yüksek olan ve üretildiği Karadeniz Bölgesi'nde genellikle ısınma amaçlı olarak yakılan tarımsal bir atıktır [36]. Bu çalışmada fındık kabuğu atıklarından farklı karbonizasyon koşullarında elde edilen aktif karbon ve bitkisel atıkların asidik hidrolizi yoluyla elde edilen furfuraldan üretilmiş furan reçinesi ile bitüm modifikasyonu yapılması, bu sayede bitümlü bağlayıcıların kıvamlılığının ve sertliğinin artırılması, sıcaklık ve yaşlanmaya karşı hassasiyetinin azaltılması, BSK'da ise iyi bir kohezyon ve adezyon sağlayarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve böylece tekerlek izinde oturma ve su hasarına karşı direncinin artırılmasına yönelik bir dizi araştırma yapılmıştır.

Giresun Bölgesinden temin edilen atık fındık kabukları aktif karbon elde etmek amacıyla oksijensiz ortamda değişik koşullarda karbonize edilmiş ve elde edilen aktif karbonların Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) yöntemleri ile karakterizasyonu yapılmıştır.

Furan reçinesi ve laboratuvar ortamında üretilen aktif karbon orijinal bağlayıcı içerisine değişik oranlarda katılarak 150°C'de 45 dk karıştırılmış ve modifiyerlerin bağlayıcı içerisinde homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır. Modifiyerlerin bağlayıcı içerisine katılma oranlarını, boyutlarını ve karıştırma sürelerini optimize etmek amacıyla farklı pek çok alternatif denenerak en iyi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

Aktif karbon ve furan reçinesinin, bitümlü bağlayıcıların kıvamlılığı, yumuşama noktası, sıcaklık hassasiyeti ve kohezyonu üzerindeki etkileri geleneksel bağlayıcı deneyleri ile, yaşlanma karakteristiklerine olan etkileri TFOT deneyi ile, tekerlek izinde oturma parametreleri ve yüksek sıcaklıktaki işlenebilirlik ve pompalanabilirlik karakteristikleri ise Superpave bağlayıcı deneylerinden DSR ve RV deneyleri ile belirlenmiştir. Modifiye edilmiş bağlayıcılar ile hazırlanan BSK'nın stabilite, akma ve tekerlek izinde oturma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Marshall stabilite deneyi, su hasarına karşı dayanımını belirlemek amacıyla dolaylı çekme mukavemeti ve modifiye Lottman yöntemine göre nem hasarına karşı direnç deneyi, kaplamanın dinamik yükler altındaki esnekliğini değerlendirmek amacıyla dolaylı çekme deneyi ve agrega-bitüm

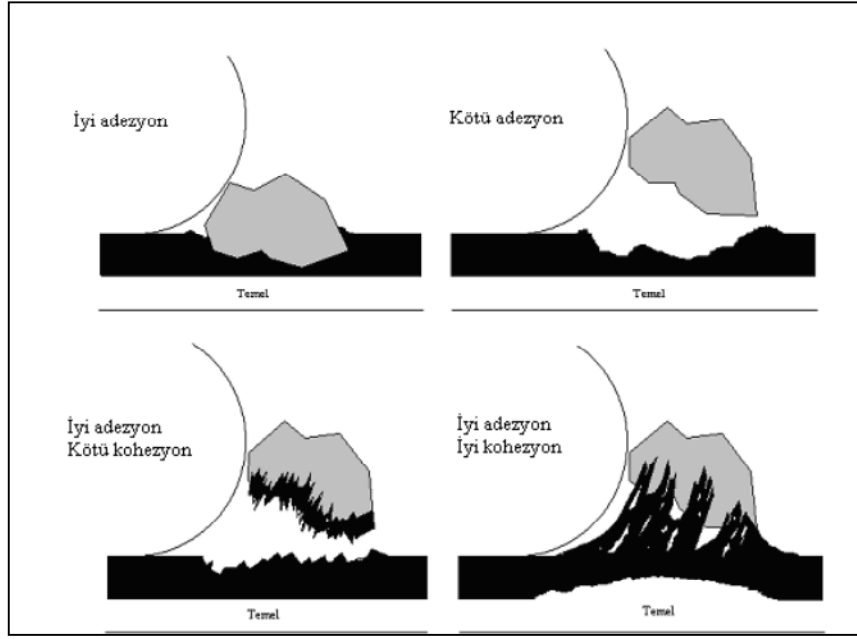
arasındaki adezyonun su etkisiyle ne derecede bozulduğunu belirlemek amacıyla Nicholson soyulma deneyi uygulanmıştır.

Deneylelerden elde edilen sonuçlar, aktif karbon ve furan reçinesinin asfaltın reolojik özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Hem aktif karbon hem de furan reçinesi orijinal bağlayıcının kıvamlılığını artırmış, sıcaklık hassasiyetini düşürmüştür. Özellikle aktif karbonun orijinal bağlayıcının yaşlanma karakterisitiklerini önemli ölçüde geliştirdiği gözlenmiştir. Uygun boyut ve oranda kullanılan aktif karbon ve furan reçinesi, bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını artırmıştır. Ayrıca, her iki modifiyerin de karışım stabilitesini ve tekerlek izinde oturma dayanımını artırdığı ve bu artışın %25 oranlarına kadar çıkabildiği gözlenmiştir. Furan reçinesinin soyulmayı önleyici ve bitüm-agrega arasındaki adezyonu artırıcı önemli bir katkı maddesi olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen bulgular, çalışmanın hedeflenen amaca uygun olarak tatmin edici sonuçlara ulaşıldığını ortaya koymaktadır.

#### **1.4. Bitümlü Bağlayıcılar**

BSK'nın performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan bitümlü bağlayıcılar karışım içerisinde ağırlıkça %5-7, hacimce %13-15 oranlarında kullanılsa da esnek kaplamaların en önemli bileşenidir. Bitümlü bağlayıcılar BSK içerisinde agrega danelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmasını önlemekte, oluşturdukları düzgün yüzeyler ile sürüş konforu sağlamakta, kohezyonu ile karışımın stabilitesini artırmakta ve karışım içerisindeki boşlukları doldurarak kaplamanın geçirimsizliğini sağlamaktadır [1,49,50].

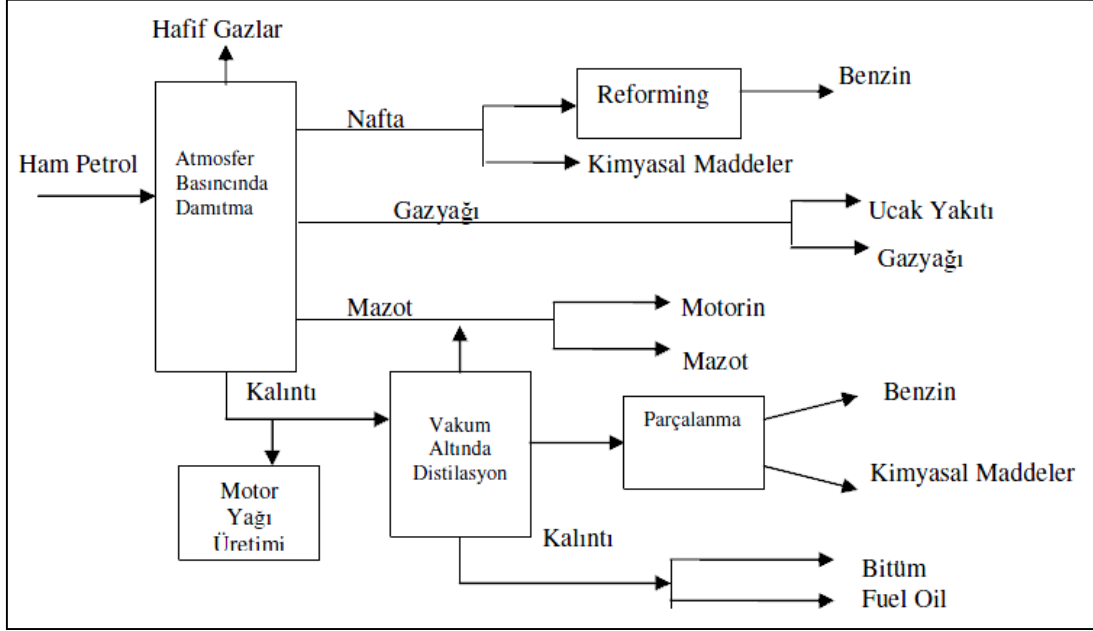
BSK'nın stabilitesi agrega danelerini saran bitüm filminin agregaya yapışma yeteneğine yani bitümün adezyonuna bağlıdır. Bitümün adezyon yeteneği yüksek ise karışımın kohezyonu da yüksek olacaktır [2]. Şekil 1'de bitüm ile agrega arasındaki adezyon-kohezyon davranışı gösterilmektedir.



Şekil 1. Bitüm ile agrega arasındaki adezyon-kohezyon davranışı

Bitüm, Amerika Malzeme ve Test Birliği (American Society for Testing and Materials, ASTM) tarafından, esas olarak asfaltlar, katranlar, ziftler ve asfaltitler gibi yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbonlardan oluşan, doğal ya da üretilmiş, siyah veya koyu renkli, katı, yarıkatı veya viskoz, karbon disülfürde tamamen çözünen bağlayıcı madde olarak tanımlanır [1,50,51]. Bitümler katran ve asfalt olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Katranlar, odun ve kömürün damıtılması ile ham katran olarak elde edilirler ve yol inşaatında kullanılabilmesi için ikinci bir damıtma işleminden geçirilirler [1]. Asfalt ise ASTM tarafından rengi koyu kahve ile siyah arasında değişen, ana maddesi bitüm olan, doğal kökenli veya petrolün rafinerilerde işlenmesiyle elde edilen bağlayıcı bir malzeme olarak tarif edilmektedir. “Asfalt”, “asfalt çimentosu”, “bitüm” ve “asfalt bağlayıcı” terimleri asfalt kaplamalarda aynı anlama gelecek şekilde birbirlerinin yerine kullanılabilir. Asfalt malzemesi dayanıklılığı, agregaya güçlü yapışma özelliği ve kaplamada oluşturduğu yüksek geçirimsizlik nedeniyle karayolu mühendisliğinde bağlayıcı madde olarak değer kazanmıştır. Yol kaplamalarında yaygın olarak kullanılan bağlayıcılar, ham petrolün rafinerilerde damıtılması ile katı veya yarı katı olarak elde edilen ve asfalt çimentosu olarak isimlendirilen petrol asfaltlarıdır (Şekil 2). Tabiatta doğal halde bulunan kaya ve göl asfaltları birtakım ayrıştırma işlemlerinden geçtikten sonra yol

kaplamalarında kullanılabilirler ve genellikle bitümlü karışımlara modifiye amaçlı katılmaktadırlar [1,44,50].



Şekil 2. Ham petrolden bitüm elde edilme süreci

#### 1.4.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi, Yapısı ve Reolojisi

Belirli bir sıcaklıkta bitüm reolojisi, malzemedeki hâkim hidrokarbon moleküllerin hem kimyasal bileşimi hem de fiziksel yapısı ile belirlenmektedir. Bitümün kimyasal bileşiminde, fiziksel yapısında veya her ikisinde meydana gelecek değişimler bitüm reolojisini doğrudan etkilemektedir [52].

##### 1.4.1.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi ve Yapısı

Bitüm hakim durumdaki hidrokarbon moleküller ile az miktarda, yapısal olarak benzer heterosiklik türler ve sülfür, nitrojen ve oksijen atomları içeren fonksiyonel grupların kompleks bir kimyasal karışımıdır. Bitüm aynı zamanda az miktarda, inorganik tuzlar ve oksitler ya da porpirin yapıları şeklinde ortaya çıkan kalsiyum, vanadyum, nikel, demir ve magnezyum gibi metaller de içerir [1,52]. Çeşitli ham petrolerden imal edilen bitümlerin analiz sonuçları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Dört farklı bitümün kimyasal kompozisyonu [1]

Element Adı	Asfalt Numunesi			
	A	B	C	D
Karbon (%)	83.77	85.78	82.09	86.77
Hidrojen (%)	9.91	10.19	10.45	10.93
Azot (%)	0.28	0.26	0.78	1.10
Kükürt (%)	5.25	3.41	5.43	0.99
Oksijen (%)	0.77	0.36	0.29	0.20
Vanadyum (milyonda)	180	7	1380	4
Nikel (milyonda)	22	0.40	109	6

Kimyasal kompozisyonu oldukça karmaşık olduğundan bitümün kimyasal analizini yapmak oldukça zahmetlidir ayrıca –eğer mümkün ise- yapılan bu analizlerden, bitüm reolojisi ile korelasyon kurmayı imkansız hale getirecek miktarda veri ortaya çıkmaktadır. Fakat bitümü n-heptan içerisinde çözünmeyen asfaltenler ve çözünen maltenler olarak iki geniş kimyasal gruba ayırmak mümkündür. Maltenlerde ayrıca doygunlar, aromatikler ve reçineler olarak alt gruplara ayrılmaktadır [52].

Asfaltenler, esasen karbon ve hidrojenle oluşan ve bir miktar nitrojen, sülfür ve oksijen içeren, n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah veya kahverengi amorf katılar olup asfaltın %5 ila %25'ini oluştururlar. Asfaltenler genel olarak oldukça yüksek molekül ağırlığına sahip polar ve karmaşık maddelerdir. Asfalten miktarının artırılması ile daha katı, daha yüksek yumuşama noktasına sahip ve sonuç olarak daha yüksek viskoziteli bir bitüm elde edilmektedir. Reçineler, koyu kahverengi renkte, katı veya yarı katı kıvamda ve doğal elektriksel yüklere sahip (polar) olması nedeniyle asfalta yüksek adezyon özelliği kazandırmaktadır. Aromatikler, asfaltın %40 ile %60'ını oluşturan, asfaltenlerin yayılımı için gereken ortamı teşkil eden, koyu kahve renkli, viskoz yağ şeklindeki sıvılardır. Bitüm içerisindeki en düşük molekül ağırlıklı bileşenlerdir. Doygunlar veya doygun hidrokarbonlar ise asfaltın %5 ile %20'sini oluşturan, saman rengi veya beyaz renkteki polar olmayan viskoz yağlardır [1,52].

Bitüm, yapısal anlamda asfaltenlerin maltenler içerisinde çözünmüş veya dağılmış olduğu bir süspansiyon sistemi olarak tanımlanabilir. Bu oluşum özelliği bakımından bitümler, SOL (çözelti) ve JEL (jelatin) olmak üzere iki tipte değerlendirilmektedir. SOL tipi bitümlerde asfaltenler, malten içinde çok iyi bir biçimde yayılıp dağılmışlardır (penetrasyon asfaltları). JEL tipi bitümlerde ise asfaltenler, malten içinde çok az yayılmış, bir bakıma kümelenmiş bir yapı göstermektedir (okside asfaltlar) [1,50,52,53].

Bitümü oluşturan kimyasal bileşenlerin kendi içlerindeki oransal değişimlerin bitüm özelliklerine etkisi şu şekilde özetlenebilir: Asfaltin içeriği sabit iken, doyunların reçinelere oranı sabit tutulup aromatik bileşen oranının artırılmasının reoloji üzerindeki etkisi azdır. Reçinelerin aromatlara oranını sabit tutarak doyun içeriğinin artırılması bitümü yumuşatmaktadır. Reçine eklenmesi durumunda ise bitüm sertleşmekte, penetrasyon indeksi ve kayma hassasiyeti düşmekte, viskozite ise artmaktadır. Sabit sıcaklıkta maltenlerin içerisine karıştırılan asfaltin konsantrasyonu artırıldığında bitümün viskozitesi yükselmektedir. Bitümde bulunan asfaltinlerin aromatik/naftenik halka şeklinde yapılardan oluşmuş, levhaya benzer tabaka yığınları şeklinde olduklarına inanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda bu tabakaları birarada tutan hidrojen bağları kopmakta ve bunun sonucu olarak asfaltinlerin hem şekilleri hem de boyutları değişmektedir, bu değişimde viskozite azalması olarak sonuçlanmaktadır [52].

Literatürde bitümün kimyasal yapısı ve reolojik özellikleri arasındaki ilişkiyi saptamaya yönelik pek çok çalışma vardır. Yapılan çalışmalarda bitümü oluşturan bu bileşenlerin hangisinin bitümün fiziksel özellikleri üzerinde daha etkili olduğu konusunda araştırmacılar arasında net bir uyum söz konusu değildir. Bazı araştırmacılar bitüm içerisindeki asfaltin miktarının viskozite, penetrasyon ve yumuşama noktası gibi fiziksel özellikler ile ilişkili olduğunu ileri sürerken bir diğer grup asfaltin miktarı ile reolojik özellikler arasında bir ilişki kuramamışlardır. Genel bir görüş olarak, bitümün reolojik özelliklerinin, kimyasal yapısına göre değiştiği ancak bunun sadece kimyasal yapı ile açıklanamayacağı ve bitümü oluşturan bileşenlerin molekül ağırlıkları ve polaritelerinin de bitümün fiziksel davranışı üzerinde etkili olduğu söylenebilir [54].

#### **1.4.1.2. Bitümün Reolojisi**

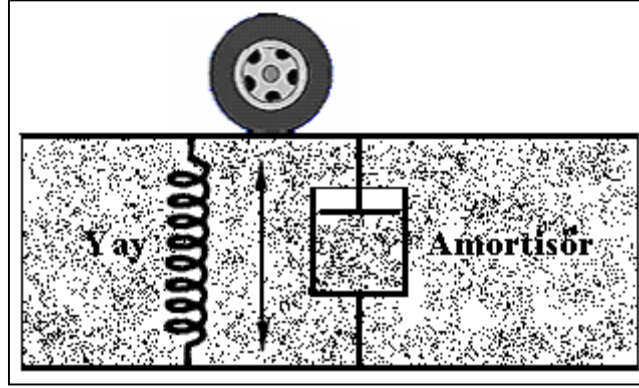
Reoloji, bir maddenin akma ve deformasyonunu, sadece maddeye uygulanan yüke değil ayrıca bu yükün uygulanma süresine de bağlı olarak belirlemeye çalışan bir bilimdir. Bitüm reolojik bir malzeme olup trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığa bağlı olarak visko-elastik ve termo-plastik özellikler gösterir. Bu tür malzemeler yüksek yükleme hızlarında (hızlı taşıtlar) elastik, düşük yükleme hızlarında (yavaş ya da duran taşıtlar) viskoz, orta yükleme hızlarında orta elastik ve viskoz davranış gösterir. Benzer şekilde, düşük sıcaklıklarda elastik davranış ve yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklarda ise viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Bitümün bu

reolojik özelliği asfalt karışımların da visko-elastik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Bu nedenle yükleme süresi ve sıcaklık, asfalt çimentosunun ve bitümlü sıcak karışımın rijitliğine doğrudan etki etmektedir [1,23,50,55-57].

Sıcak iklim koşullarında ya da yavaş hareket eden veya park halindeki ağır araçların sebep olduğu sürekli ve değişmeyen yükler altındaki yollarda, asfalt çimentosu viskoz davranır ve akmaya başladıklarında, soğuma olsa bile hiçbir zaman eski (orijinal) durumlarına gelemedikleri için plastik olarak nitelendirilir. Bu koşullarda sıcak asfalt karışımın yük taşıyan bileşeni sadece agregadır. Bu sebeple yüksek sıcaklıklarda ve tekrar eden tekerlek yükleri altında düşük stabiliteye sahip olan sıcak karışım kaplamalarda tekerlek izleri oluşur [1,57-59].

Soğuk iklim şartlarında veya hızlı hareket eden araç trafiğinin sebep olduğu kısa süreli yükler altında, asfalt çimentosu elastik bir katı gibi davranış gösterir. Elastik katı malzemeler yüklendiklerinde şekil değiştirirler, ancak üzerindeki yük kaldırıldığında önceki (orijinal) hallerine geri dönme yeteneğine sahiptirler. Bu malzemelere taşıma kapasitesinden daha fazla yükleme yapıldığında, malzeme bünyesinde kırılma, çatlama veya kopma meydana gelir. Asfalt çimentosu düşük sıcaklıklarda her ne kadar elastik bir katı ise de aşırı yüklendiğinde kırılğan olabilir ve çatlayabilir. Bu yüzden asfalt kaplamalarda soğuk havalarda düşük sıcaklık çatlakları (termal çatlaklar) görülür. Bu duruma, düşük sıcaklık nedeniyle kaplama yüzeyinin büzölmeye çalışmasının ortaya çıkardığı iç gerilmeler sebep olur [1,57-59].

İklim ve çevre koşulları genellikle aşırı sıcak ile aşırı soğuk arasındadır. Bu tür iklime sahip bölgelerde asfalt bağlayıcı, hem viskoz sıvı ve hem de elastik katı özelliklerini sergiler. Asfaltın bu davranışı, yani sıcaklık ve yüke bağlı olarak hem elastik hem de viskoz özellik göstermesi, onun viskoelastik bir malzeme olması ile ilgilidir. Asfaltın yük etkilerine karşı gösterdiği bu davranış kavramsal olarak Şekil 3'te gösterildiği gibi “yay-amortisör” modeliyle açıklanabilir.



Şekil 3. Viskoelastik davranış ve yay-amortisör modeli

Asfalta uygulanan herhangi bir kuvvet yay ve amortisörde paralel bir tepkiye neden olur. Yük etkileyen bir bitümlü sıcak karışımda yay, asfaltın ilk elastik tepkisini, amortisör ise asfaltın özellikle daha sıcak havalardaki daha yavaş viskoz tepkisini sembolize eder. Asfalt bazı durumlarda plastik davranış gösterse de çoğu durumda yüklemelere elastik veya viskoelastik olarak tepki verir. Yani deformasyonlar, etkileyen yüklerin şiddetine göre zamanla eski durumuna gelir veya kısmen kaybolur [1,50,57-59].

#### 1.4.2. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Esnek üstyapı kaplamalarında kullanılan bitümlü bağlayıcı özelliklerinin kaplama dayanımına ve performansına çok önemli etkileri vardır. Bu özelliklerin belirlenmesi amacıyla dünyada ve ülkemizde kullanılmakta olan çeşitli deney yöntemleri bulunmaktadır. Bu deneyleri uzun yıllardan beri sıklıkla kullanılan ve halen ülkemiz Karayolu Teknik Şartnamesinde bulunan geleneksel bağlayıcı deneyleri ve Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP, Strategic Highway Research Program) tarafından geliştirilen “yüksek performanslı asfalt kaplama” (Superpave) şartnamesinde bulunan performans esaslı bağlayıcı deneyleri olarak iki gruba ayırmak mümkündür [60-62]. Bu iki grupta bulunan bağlayıcı deneyleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.



Geleneksel bağlayıcı deneyleri

- Penetrasyon deneyi
- Yumuşama noktası deneyi
- Düktilite deneyi
- Parlama noktası deneyi
- İnce film halinde ısıtma deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)

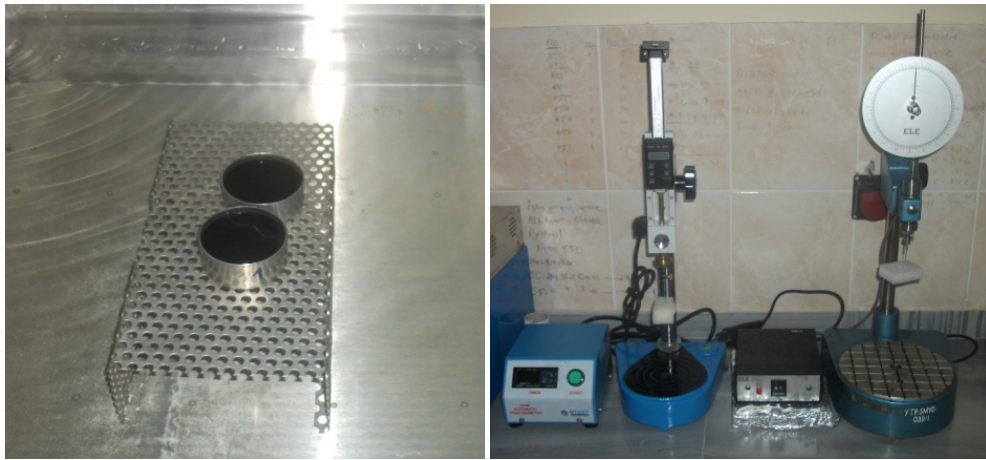
Superpave bağlayıcı deneyleri

- Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)
- Basıncılı yaşlandırma kabini (Pressure Aging Vessel, PAV)
- Dinamik kayma reometresi (Dynamic Shear Rheometer, DSR)
- Dönel viskozimetre (Rotational Viscosimeter, RV)
- Kiriş eğme reometresi (Bending Beam Rheometer, BBR)

#### 1.4.2.1. Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri

##### a) Penetrasyon deneyi

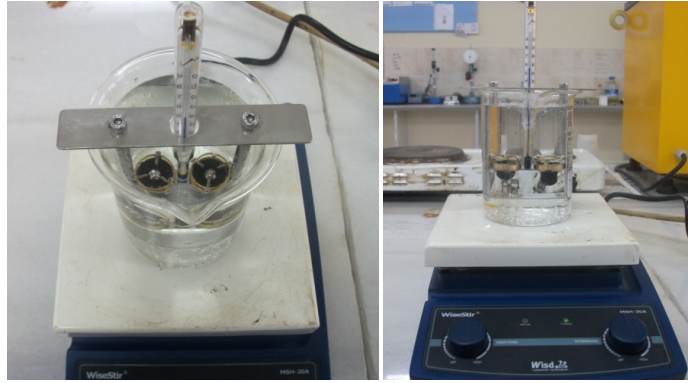
Penetrasyon deneyi, 100 g ağırlığındaki standart bir iğnenin 25°C deki bitüm numunesine 5 sn süre ile batması olarak tanımlanır. Penetrasyon değeri kıvamlilikle ters orantılı olup deneye tabi tutulan bağlayıcının penetrasyon değerinin artması bağlayıcının yumuşadığının bir göstergesi olarak değerlendirilir (Şekil 4) [11,16,50,53].



Şekil 4. 25°C su banyosunda deney numuneleri ve penetrason deney aleti

b) Yumuşama noktası deneyi

Yumuşama noktası deneyi bitümün sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılığını ve hangi sıcaklıkta akmaya başladığını ölçmeye yarayan bir deneydir, bitümlü kaplamaların kalıcı deformasyonlarında etkili faktörlerden biri yumuşama noktasıdır. Yumuşama noktasının belirlenmesi amacıyla halka ve top yöntemi uygulanır, bu deneyde standart halkalar içerisine konulan bitüm numunesi üzerine 3.5 g ağırlığındaki bilyeler yerleştirilir ve numuneler bir su banyosu içerisinde 5°C/dk hızda ısıtılır. Bilyelerin, halkaları tutan kalıbın tabanına değdiği andaki sıcaklık okunarak yumuşama noktası değeri olarak kaydedilir (Şekil 5), ve bağlayıcıların katı konumdan akıcı konuma geçişini temsil eden sıcaklık değerleri belirlenir [11,39,50,53,63].



Şekil 5. Yumuşama noktası deneyi

Bitümlü bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetleri, penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerine bağlı olarak hesaplanan Penetrasyon İndeksi (PI) ile belirlenmektedir. PI sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bitüm kıvamlılığının değişimi olarak tanımlanmaktadır ve Formül 1 ile hesaplanmaktadır. Formülde Pen25 bitümün 25°C'deki penetrasyon değerini YN ise yumuşama noktası değerini ifade etmektedir. Düşük PI değerleri yüksek sıcaklık hassasiyetini temsil etmektedir. PI değeri yüksek bağlayıcıların düşük ısı çatlaklarına ve kalıcı deformasyona karşı direnci daha yüksektir [16,39,63].

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

### c) Düktilite deneyi

Düktilite bitümün, uzama veya çekilebilme özelliğini ifade etmektedir. Tanım olarak, asfalt çimentosundan yapılmış standart bir briketin, belirli sıcaklık ve hızda kopmadan çekilebildiği uzunluğun cm cinsinden ifadesi olarak tanımlanabilir. Bitümün bağlama yeteneği düktilitesine bağlı olup, düktilite değeri yüksek olan bitümlerin bağlayıcılık özellikleri de yüksek olmaktadır. Ancak, çok yüksek düktilite değerine sahip bitümlerin ısıya karşı fazla duyarlılık gösterdiği belirtilmektedir [9]. Bitümlü bağlayıcıların düktiliteleri, düktilite deneyi ile tespit edilmektedir. Düktilite cihazı, içi 25 °C’de su ile dolu olan ve numuneyi 5 cm/dk hız ile yatay olarak çeken özel bir cihazdır (Şekil 6). Numune briket kopuncaya kadar çekme işlemine devam edilir. Briket koptuğu anda düktilite cihazının kenarındaki cetvelden uzama miktarı cm cinsinden okunur. Düktilite cihazında aynı anda 3 numune test edilebilmektedir. Deneye tabi tutulan bitümlü bağlayıcının düktilitesi, bu üç numunenin düktilite sonuçlarının ortalaması olarak kabul edilir [9,22,53].



Şekil 6. Düktilite deney aleti

### d) Parlama noktası deneyi

Parlama noktası, bir maddenin alev temasında geçici olarak parladığı fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık olarak tanımlanır. Parlama noktasının tayini için çeşitli yöntemler vardır. Parlama noktası 15-79°C arasında olan bitümlü maddelerin parlama noktaları Tagliabue açık kap deneyi ile saptanırken, daha yüksek parlama noktasına sahip asfalt çimentoları ve yavaş kür olan (SC) sıvı petrol asfaltları gibi bitümlü maddeler için Cleveland açık kap deneyi kullanılır. Açık kap deneyleri kabaca, bitümlü malzemenin açık

bir kaptta ısıtılması sırasında, yüzeyin biraz üzerinde bir kıvılcım tatbik edilmesi şeklindedir. Yüzeyin herhangi bir noktasında alevin görüldüğü andaki sıcaklık, deneye tabi tutulmuş olan bitümlü malzemenin parlama noktası olarak alınır (Şekil 7) [50,53].



Şekil 7. Yarı-otomatik Cleveland parlama noktası deney aleti

e) İnce film halinde ısıtma deneyi

İnce film halinde ısıtma deneyi, bitüm tesislerinde agrega ile bitümün karıştırılması sırasında meydana gelen yaşlanmayı temsil etmektedir. İnce film halinde ısıtma deneyinde, 14 cm çapındaki küçük bir tepsinin içine 3.2 mm kalınlığındaki bitüm numunesi konularak tepsinin içine yayılması sağlanır. 5-6 devir/dk hızda dönen bir platform üzerine yerleştirilen numuneler 5 saat süreyle 163 °C sıcaklıktaki fırında bekletilir (Şekil 8). Bu süre sonunda fırından çıkartılan numuneler tartılır ve yaşlandırma öncesi ve sonrasındaki ağırlık kaybı 0.01 g hassasiyetle belirlenir. Yaşlandırma işlemi sonrasında bağlayıcıya penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanarak yaşlanma sonrası özellikleri ölçülür [50,53,64].



Şekil 8. İnce film halinde ısıtma deneyi

### 1.4.2.2. Superpave Bağlayıcı Deneyleri

Superpave bağlayıcı deneyleri, malzemenin doğrudan arazi şartlarındaki performansı ile ilgili özelliklerini ölçmektedir. Bu deneyler asfaltın, yaşlanma, işlenebilirlik, oluklanma, yorulma ve termal etkilere karşı performanslarının belirlendiği bir seri deneyler grubudur [57]. Superpave bağlayıcı deneyleri Tablo 2’de verilmiş ve özellikleri aşağıda kısaca özetlenmiştir;

Tablo 2. Superpave bağlayıcı deneyleri [57]

Deney	Kullanım Amacı	Kullanılan Bağlayıcı
Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT)	Bağlayıcının kısa dönem yaşlanma karakteristiğini belirlemek	Orijinal bağlayıcı
Basınçlı yaşlandırma kabini (PAV)	Bağlayıcının uzun dönem yaşlanma karakteristiğini belirlemek	RTFOT uygulanmış bağlayıcı
Dinamik kayma reometresi (DSR)	Orta ve yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı performansını belirlemek	Orijinal, RTFOT uygulanmış veya PAV uygulanmış bağlayıcı
Dönel viskozimetre (RV)	Yüksek sıcaklıklarda akışkanlık karakteristiğini belirlemek	Orijinal bağlayıcı
Kiriş eğme reometresi (BBR)	Düşük sıcaklıklarda bağlayıcı karakteristiklerinin belirlenmesi	PAV uygulanmış bağlayıcı

#### a) Dönel ince film halinde ısıtma deneyi

Bitüm tesislerinde agrega ile bitümün karışması sırasında meydana gelen kısa süreli yaşlanma, laboratuvarda dönel ince film halinde ısıtma deneyi ile simüle edilmektedir. Bu deneyde, ince bir film halinde hareket eden bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın birleşik etkisi değerlendirilmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimi tespit etmek amacıyla gerekli malzeme elde edilebilmektedir. TS EN 12607-1’de belirtilen bu deney, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 9). 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 üfleme yardımcıyla şişelere, akışı 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişeleri tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır. Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek için, geri kalan altı şişe ise bitümlü

malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmek için kullanılmaktadır [1,3,61,62].



Şekil 9. Dönel ince film etüvü ve deney öncesi ve sonrasında şişelerin durumu

#### b) Basınçlı yaşlandırma kabini deneyi

Arazide servis sırasında bitümde meydana gelen oksidasyon yaşlanmasını (uzun süreli yaşlanma) laboratuara yansıtılabilmek amacıyla Basınçlı Yaşlandırma Kabı yöntemi geliştirilmiştir. PAV deneyi, kaplama servis ömrünün ilk 5–10 yılı boyunca asfalt bağlayıcıda meydana gelen uzun süreli yaşlanmayı temsil etmektedir. Deneyde, uzun süreli yaşlanmayı temsil etmek üzere, asfalt numunesi bir basınç kabına konularak etüvde 20 saat süreyle standart sıcaklık ve basınç etkisinde bırakılır. Deneyde kullanılacak asfalt bağlayıcı, karıştırma ve yapım aşamasındaki yaşlanmayı temsil eden RTFOT deneyinden elde edilen yaşlandırılmış numunelerden alınmaktadır. Böylece kaplamanın karıştırma, yapım ve hizmet sırasında karşılaşacağı çevresel koşullar deneylere yansıtılmış olmaktadır. Deney için AASHTO PP1 standardına uygun olarak her bir numune kabına 50 gram RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcı konulmaktadır. PAV deneyinde bağlayıcı sınıfına göre değişen sıcaklıklardaki (90, 100 veya 110 °C) numunelere 2070 kPa'lık basınç uygulanmaktadır (Şekil 10). RTFOT ve PAV deneylerinden elde edilen yaşlandırılmış bağlayıcılar diğer Superpave deneylerine tabi tutularak yaşlandırılmış bağlayıcıların performansları belirlenmektedir [1,57,58].

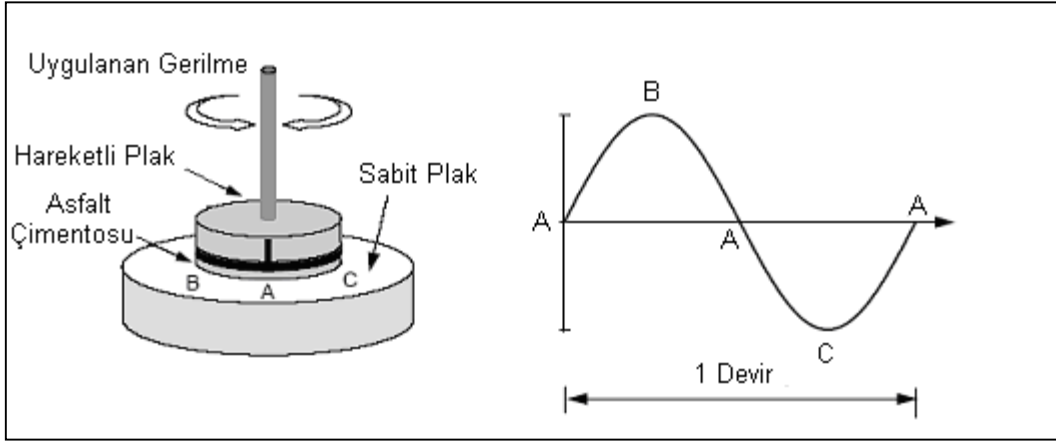




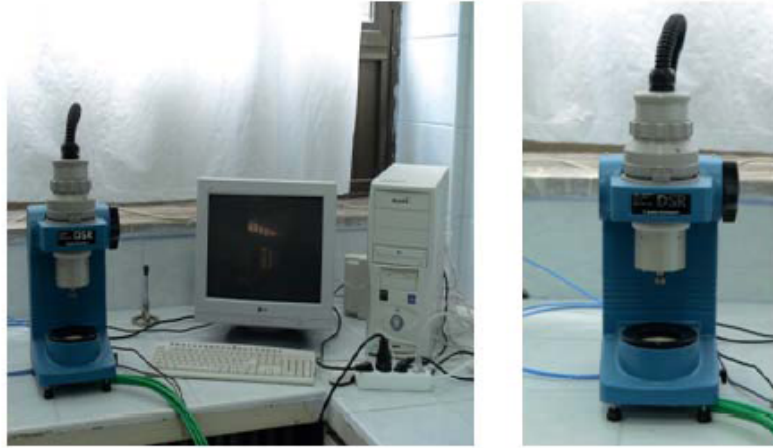
Şekil 10. PAV deney aleti

c) Dinamik kayma reometresi deneyi

Dinamik Kayma Reometresi deneyi, bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna ve normal sıcaklıklarda yorulmaya karşı dayanımını tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla işlem görmemiş (yaşlandırılmamış) ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken, bağlayıcıların yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla PAV yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını tespit etmek için ise 8 mm çapında ve 2000 mikron yüksekliğindedir. Bölge iklim şartlarına göre belirlenmiş deney sıcaklıklarında bağlayıcılar Şekil 11’de görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına yerleştirilmektedir. Hareketli üst plaktaki A noktası, B noktasına gitmekte geri dönerek tekrar A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir ve daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 1.59 devir/sn’dir. Deneyde ortam şartlarını yansıtması amacıyla ön koşullandırma yapılmakta ve daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır (Şekil 12).



Şekil 11. DSR deneyinde deformasyon yönleri



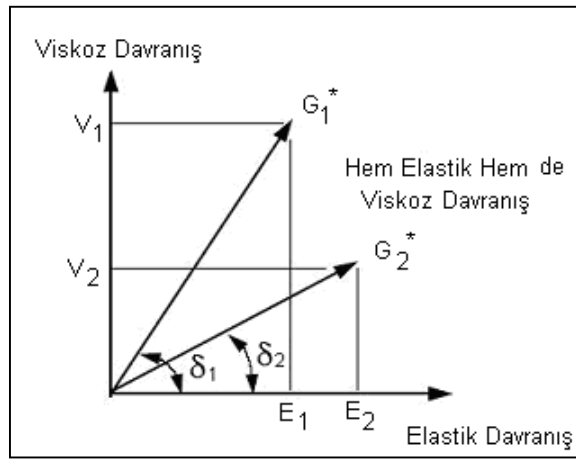
Şekil 12. Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi

Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü olmak üzere iki tip dinamik kayma reometresi vardır. Gerilme kontrollü reometreler, hareketli plakayı A noktasından B noktasına hareket ettirecek sabit bir burulma kuvveti ile çalışır. Plakayı belli bir frekansla salınıma tabi tutacak burulma kuvveti bağlayıcının sertliğine bağlı olarak değişir. Doğal olarak sertliği fazla olan bağlayıcılar daha fazla burulma kuvveti gerektirir. Superpave bağlayıcı deneyleri gerilme kontrolü ile teste tabi tutulur. Deformasyon kontrollü reometreler ise hareketli plakayı A noktasından B noktasına belirli bir frekansta hareket ettirirken gerekli burulma kuvvetini ölçerek çalışır. İki reometre arasındaki fark şöyle açıklanabilir; gerilme kontrollü reometrede uygulanan kuvvet sabit tutulur, buna göre her



salınımda yer değiştirme farklı olabilir. Diğer yöntemde ise bunun tersine sabit bir deformasyon sağlayacak kuvvet her salınımda değişebilmektedir [1,57,58].

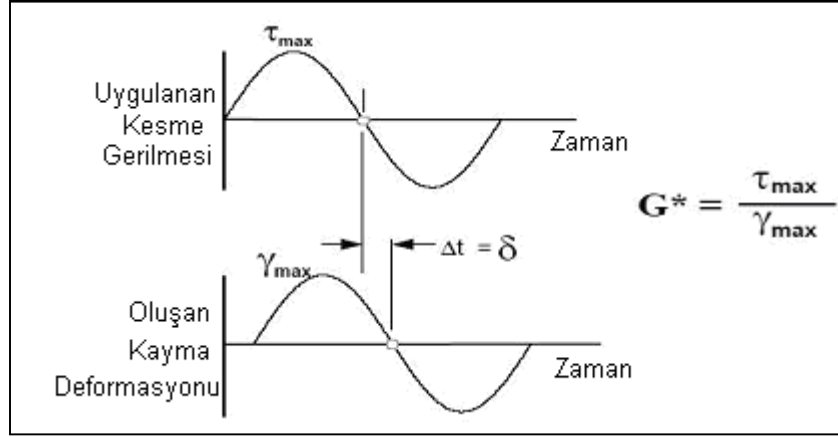
Dinamik kayma deneyi, asfalt çimentosunun kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) ve faz açısını ( $\delta$ ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir.  $G^*$ , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı asfalt çimentosunun gösterdiği toplam direncin göstergesidir ve elastik (geri dönümlü) ve viskoz (geri dönümsüz) olmak üzere iki bileşeni vardır.  $\delta$  ise viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının göstergesidir. Hem  $G^*$  hem de  $\delta$  değerleri asfalt çimentosunun sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir (şekil 13).



şekil 13. Viskoelastik davranış

Visko-elastik davranışı ifade eden şekil 13'te grldğu gibi yatay eksen elastik davranışı (yüksek yükleme hızı ve düşük sıcaklık) ifade ederken düşey eksen ise viskoz davranışı (düşük yükleme hızı ve yüksek sıcaklık) ifade etmektedir. Ancak normal kaplama ısısı ve normal yükleme durumlarında asfalt imentosu hem elastik hem de viskoz davranış sergilemektedir. şekilde  $G_1^*$  ve  $G_2^*$  okları iki ayrı asfaltın kompleks modüllerini temsil etmektedir. Bu asfaltlar yüklendiklerinde bir kısım deformasyonları elastik bir kısım ise viskoz olur. şekildeki iki asfaltta viskoelastik olmasına rağmen asfalt-2, daha küçük faz açısı nedeniyle asfalt-1'e göre daha elastik bir malzemedir ve yük altındaki deformasyonları, yk kalktıktan sonra daha fazla geri döner. şekilden görülebileceği gibi visko-elastik özellik hem  $G^*$ 'a hem de  $\delta$ 'a bağlıdır. Bu nedenle asfalt çimentosunun visko-elastik özelliği,  $G^*$  ve  $\delta$  birlikte göz önüne alınarak belirlenmelidir.

Faz açısı ( $\delta$ ), uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman farkına ( $\Delta t$ ) eşit olmaktadır. Faz açısının  $0^\circ$  olması numunenin elastik davranış gösterdiğini,  $90^\circ$  olması ise viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Bitümlü bağlayıcılar viskoelastik özellik gösterdiğinden normal şartlarda faz açısı 0 ile  $90^\circ$  arasında değişmektedir. Faz açısının düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir. Faz açısı Şekil 14’te gösterilmiştir [1,3,58,61,62].



Şekil 14. Visko-elastik malzemelerin gerilme deformasyon ilişkisi

Dinamik kayma reometresi deneyi sonucunda belirlenen  $G^*$  ve  $\delta$  değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan  $G^*/\sin\delta$  değeri tespit edilmektedir. Yüksek tekerlek izi direnci için  $G^*/\sin\delta$  değeri orijinal bağlayıcılar için en az 1.00 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise en az 2.20 kPa olmalıdır. Superpave bağlayıcı şartnamesinde bağlayıcının performans seviyesi PG X-Y olarak belirlenir, burada X bağlayıcının özelliklerini kaybetmeden hizmet verdiği en yüksek sıcaklığı, Y ise en düşük sıcaklığı belirtir. DSR deneyi sonucunda  $G^*/\sin\delta$  değerinin sağlanması gereken en küçük değeri veren en yüksek sıcaklık değeri bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesi olarak kaydedilir [62].

#### d) Dönel viskozimetre deneyi

Dönel viskozimetre deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık ve pompalanabilirlik karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak Brookfield Viskozimetresi kullanılmaktadır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalama ve karıştırma sırasında

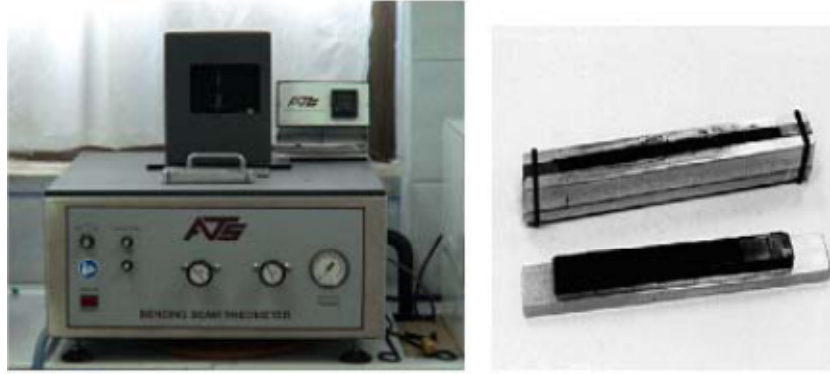
bağlayıcıların yeterince akışkan olup olmadıklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Dönel viskozimetre silindirik bir çubuğun sabit bir sıcaklıkta asfalt numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenir. Asfaltın pompalanıp agrega ile karıştırılacak kıvamda olup olmadığını anlamak amacıyla viskozite araştırıldığından bu deney orijinal haldeki asfaltlara uygulanır. Deneyde, bağlayıcı içerisinde 20 rpm hızla dönen bir milin, dönmeye karşı gösterdiği direnç ile viskozite değerleri elde edilmektedir (Şekil 15). Deney için bağlayıcıdan yaklaşık olarak 30 gr numune alınmakta ve sıcaklığı 150°C'den daha düşük olan etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilmektedir. Bu malzemeden yaklaşık olarak 11 gr numune bölmesine doldurulmakta, numune bölmesi sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilmektedir. Numune 15 dakika sabit sıcaklıkta bekletildikten sonra deney yapılmaktadır. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten itibaren üç adet okuma yapılmakta ve bu üç değerlerin ortalamasından bağlayıcının viskozitesi elde edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla viskozite değerleri kullanılmaktadır. Bu amaçla 135°C ve 165°C sıcaklıklarda RV deneyi uygulanmaktadır. Çizilen sıcaklık–viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmektedir. BSK'nın karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının  $170 \pm 20$  cP, sıkıştırılmasında ise  $280 \pm 30$  cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır [3,58]. Superpave şartnamesine göre bağlayıcının 135°C'de ölçülen viskozite değerinin 3000 cP'u geçmemesi istenmektedir [1].



Şekil 15. Brookfield viskozimetresi

e) Kiriş eğme reometresi deneyi

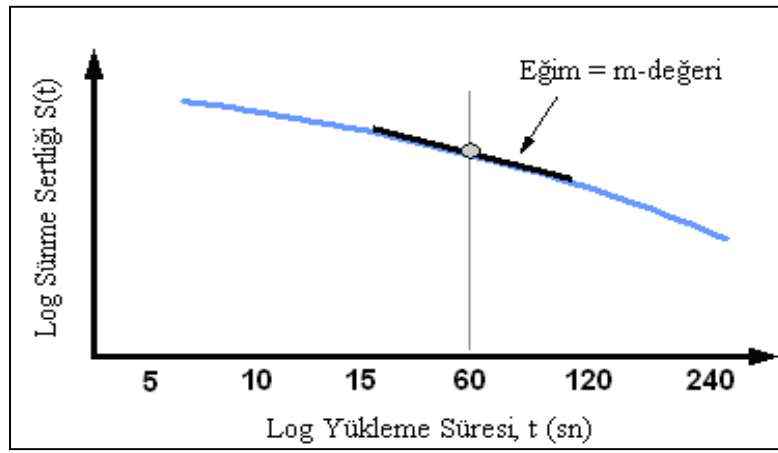
Soğuk iklimli bölgelerde inşa edilen esnek kaplamalarda, yüke bağlı olmayan ancak iklim ve çevre şartlarından kaynaklanan ve termal çatlak olarak da isimlendirilen düşük sıcaklık çatlaklarının gözlenmesi amacıyla Şekil 16'da görülen kiriş eğme reometresi geliştirilmiştir. Bu deney, belirli ısıda ve sabit bir yük altında asfalt bağlayıcının ne kadar sünme veya defleksiyon yapacağını ölçer ve asfalt kaplamanın karşılaşılabileceği en düşük sıcaklıklardaki elastik davranışını belirlemeye çalışır. Deney RTFOT ve PAV testleri ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde de yapılabildiğinden, bağlayıcıların zaman içindeki değişimi de saptanabilmektedir. Ayrıca, bağlayıcının yüksek ve düşük sıcaklıklarda nasıl bir sertlik davranışı gösterdiği, DSR ve BBR deney sonuçları birlikte ele alınarak geniş bir sıcaklık aralığında değerlendirilmektedir. Deneyde, standart ölçülerdeki (12.5x125x6.25 mm) kiriş şeklindeki asfalt çubuğa sabit bir tekil kuvvet ( $980\pm 5$  mN) uygulanır ve 240 saniyelik deney süresi boyunca çubuğun ortasında oluşan defleksiyon ölçülerek sünme sertliği (S) ve sünme oranı (mdeğer) hesaplanır. Deney sırasındaki yükleme, çok düşük sıcaklıklarda kaplamanın yavaş yavaş maruz kaldığı termal gerilmeleri temsil etmektedir.



Şekil 16. BBR deney aleti ve asfalt kiriş numune

Sünme sertliği, bağlayıcının sünme gerilmelerine karşı gösterdiği direnç, sünme oranı ise yükleme süresince bağlayıcının sertliğindeki değişim olarak değerlendirilmektedir. SHRP araştırmacıları, düşük kaplama sıcaklığındaki sünme değerine iki saatlik yükleme sonucu ulaşılmasına rağmen, deney sıcaklığının  $10^{\circ}\text{C}$  arttırılması sonucu aynı sünme değerinin 60 sn sonra elde edildiğini belirlemişlerdir. Superpave şartnamesine göre 60 sn yükleme süresi için sünme sertliği değerinin en fazla

300 MPa olması istenmektedir. Deney sonucunda elde edilen ikinci parametre olan  $m$ -değer, zamana bağlı olarak  $S(t)$  değerinin değişimini ifade etmektedir (Şekil 17). Bu değeri elde etmek için, farklı yükleme zamanlarındaki sertlik ölçülerek elde edilen sertlik-zaman eğrisinde 60. sn'deki teğetin eğimi  $m$ -değer olarak alınmaktadır. Sıcaklık düştükçe ve termal gerilmeler devam ettikçe, bağlayıcıdaki sertlik zamanla değişeceğinden, yüksek  $m$ -değerleri tercih edilmektedir. Yüksek  $m$ -değeri, daha az sert bağlayıcı anlamına geleceğinden kaplamada oluşacak çekme gerilmeleri azalacak ve termal çatlaklar oluşmayacaktır. Bu nedenle, bağlayıcı şartnamesi 60 sn yükleme sonunda  $m$ -değer'inin en az 0,300 olması şartını getirmiştir [1,58,62].



Şekil 17. Sünme oranı değerinin belirlenmesi

### 1.5. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar

Agrega; doğal, yapay veya her iki cins mineral malzemenin çeşitli büyüklüklerdeki kırılmış ve/veya kırılmamış tanelerinin bir yığıdır. En geniş tarifıyla agrega kum, çakıl, kırmataş, cüruf ve diğer mineral bileşiklerden ibaret olup bağlayıcı bir ortamda, bitümlü bir karışım, beton, harç, makadam, mastik ve benzeri uygulamalar için veya bağlayıcısız bir ortamda kullanılmak üzere biraraya getirilmiş malzeme olarak tanımlanır. Esnek üstyapı performansı üzerinde önemli bir rolü olan agregalar, bağlayıcısız temel ve alttemel tabakalarının tamamını, bitümlü sıcak karışımların ise ağırlıkça %90-95'ini, hacimce ise %80-85'ini teşkil etmektedir. Hem kaplamanın stabilitesine olan büyük katkısı hem de çok

büyük miktarda gereksinim duyulmasından dolayı agrega önemli bir yol malzemesidir ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir [1,49,65].

Agregalar fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla minerolojik, boyut, gradasyon, biçim, yüzey yapısı, porozite, yüzey alanı ve boşluk oranı ve özgül ağırlık olarak sınıflandırılmakta ve bu özelliklere göre uygun olup olmadıkları belirlenmektedir [66].

### **1.5.1. Agregalarda Minerolojik Sınıflandırma**

Agregalar genel olarak; dere malzemesi, kırmataş ve yapay taşlar olarak elde edilir. Kum-çakıl karışımından meydana gelen dere malzemesi, sahip olduğu olumsuz özelliklerinden dolayı alttemel hariç yol kaplamalarında kullanılmaz, ancak konkasörlerde kırılarak elde edilen kırma çakıl ve kırma kum olarak kaplama yapımında kullanılabilir. Yapay taşlar, çoğunlukla yüksek fırın cürüflerinden elde edildiklerinden genellikle çok gevrek ve poroz olmaları ayrıca yeterince üretilmedikleri ve üretilen miktarların da çimento sanayinde kullanılmaları sebebiyle yol kaplamalarında kullanılmamaktadır. Yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agrega, püskürük (magmatik veya katılaşım), tortul (sedimenter) ve metaformik (başkalaşım) olarak sınıflandırılan doğal kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral agregalarıdır. Bazalt, andezit, granit, gabro, kuars, grafit vb kayalar püskürük sınıfına dahil olup çok sert bir yapıya sahiptir ve porozlukları genel olarak düşüktür. Kumtaşı, kalker, kum-çakıl, konglomera vb kayalar tortul sınıfına dâhildir. Metamorfik kayalar ise püskürük ve tortul kayaların zaman içinde yüksek basınç ve ısı etkisinde minerolojik ve dokusal değişime uğraması ile oluşmuşlardır. Mermer, serpantin, kuvarsit, şist vb kayalar bu sınıfa dahildir [1,49,66].

### **1.5.2. Agregalarda Boyut Sınıflandırması**

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agregalar aşağıda belirtilen boyutlara göre sınıflandırılmaktadır [1,49,65,66].

a) Kaba Agrega: Kaba agrega; kırılmış ve elenmiş, taş, çakıl veya bunların karışımından oluşan ve agrega karışımının 4.75 mm'lik (No 4) elek üzerinde kalan kısmı olup, temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı malzemedir oluşmalıdır. Bitümlü karışımdaki iri

agrega yüzdesi %40-50'ye çıkarılırsa, iri agrega karışımın mekanik direncini artıran bir iskelet oluşturur ve karışımın akma direncinde önemli bir artış görülmeye başlanır.

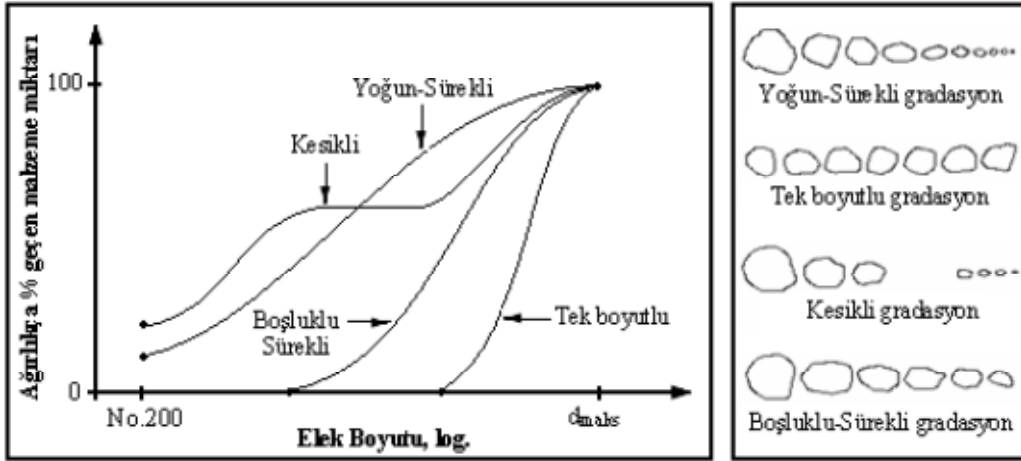
b) İnce Agregası: İnce agrega, 4.75 mm'lik (No 4) elekten geçip 0.075 mm'lik (No.200) elek üzerinde kalan malzeme olarak tanımlanır. Kırılmış taş, çakıl veya kum ile bunların karışımından oluşan ince agrega, temiz, sağlam ve dayanıklı olmalı, plastisite indeksi %2'den fazla olmamalıdır. Bir karışımındaki ince agrega, iri agreganın oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar.

c) Mineral filler: Mineral filler, genel anlamı ile tamamı 0.600 mm (No 30) elekten geçip, ağırlıkça en az %70'i 0.075 mm (No 200) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır. Mineral filler; taş tozu, sönmüş kireç, mermer tozu, çimento, uçucu kül veya benzeri mineral maddelerden meydana gelebilir ve içerisinde kil, toprak, organik ve zararlı maddeler ihtiva etmemelidir. Mineral filler, toplam agreganın çok küçük yüzdesini oluşturmasına karşın, karışımın özelliklerinin düzenlenmesinde önemli rol oynar. Filler genellikle bitümlü karışımın içinde %3 ile %9 oranları arasında kullanılır. Belirli bir orana kadar filler malzemesi karışımındaki boşlukları doldurmaya yardımcı olarak agrega tanecikleri arasında daha fazla temas noktası sağlar ve daha yoğun karışımların elde edilmesinde rol oynar. Karışımlarda kullanılacak filler malzemesi düzgün bir granülometrik bileşime sahip olmalı, kimyasal bakımdan atıl olmalı, yani bitümlü malzeme ile reaksiyona girmemelidir. Ayrıca, bitümlü karışımın hazırlandığı sıcaklıkta bir değişikliğe uğramamalı, bağlayıcıyla iyi bir yüzey adezyonu sağlamalıdır.

### **1.5.3. Agregalarda Gradasyon Sınıflandırması**

Gradasyon, agrega harmanını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade eder ve karışımın stabilite ve işlenebilirlik özelliğini belirler. Belirli bir karışım için maksimum dane boyutu ve belirli boyuttaki danelerin ağırlıkça miktarlarının belirli limitler dâhilinde olması şartnameler ile öngörülür. Ancak maksimum dane boyutu arttıkça işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşır, segregasyon artar, boşluk miktarı azalır, agrega danelerinin toplam yüzeyi azalır, yoğunluk ve stabilite artar ve bağlayıcı ihtiyacı azalır.

Agregalar gradasyon yönünden kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli ve tek boyutlu gradasyon olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırılır. Bu gradasyon tipleri Şekil 18'de görüldüğü gibi, elek analiz grafiğinde çizilirse kolayca ayırt edilebilir ve farklı özelliklere sahiptir.



Şekil 18. Agrega gradasyon tipleri ve görsel dağılımı

Kesikli gradasyona sahip agregalar, belirli aralıktaki dane çaplarını ihtiva etmediklerinden boşluk miktarları fazladır bundan dolayı yol inşaatında kullanılmamaktadır. Boşluklu-sürekli gradasyon, ince malzeme ihtiva etmediğinden dolayı boşluk oranı yüksektir, bu nedenle drenaj, filtre vb. amaçlar ile dona duyarlı tabakalar için kullanılırlar ancak sıcak karışımlarda kullanılmazlar. Tek boyutlu gradasyon hemen hemen aynı boyuttaki agregalar ihtiva ettiğinden sathi kaplama ve koruyucu örtü tabakası gibi düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Yoğun-sürekli gradasyonda, en kaba malzemeden en ince malzemeye kadar olan agrega boyutları uygun oranlarda olduğundan karışımın boşluk muhtevası düşük, dolayısıyla yoğunluğu yüksektir. Bu sebeple, sıcak karışımlarda kullanılacak agregaların, yoğun-sürekli gradasyona sahip olması istenmektedir [1,49].

#### 1.5.4. Agregalarda Biçim ve Yüzey Yapısı

Agrega danelerinin biçimleri, yol kaplamalarında kullanılan karışımların sıkışma direnci, işlenebilirliği, yoğunluğu, stabilitesi, içsel sürtünme açısı ve kayma mukavemeti özelliklerine etki eder. Yuvarlak biçimli agregaların açısız (köşeli) biçimli agregalara nazaran işlenebilirlik özelliği daha yüksek iken deformasyona karşı gösterdiği direnç yönünden köşeli agregalar daha üstündür. Açısız biçimli agrega danelerinin temas noktaları sayısı daha çok olduğundan içsel sürtünme açıları ve daneler arasındaki kenetlenme ve stabilitesi daha fazladır.



Agregaların yüzey yapısı; agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğünü veya cilalılık durumunu ifade eden ve agreganın bağlayıcı ile kurduğu bağ üzerinde önemli etkisi olan bir parametredir. Pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar, bağlayıcı ile iyi bir kenetlenme meydana getirerek güçlü bir bağ ile iyi bir karışım oluşturabilirler. Eğer agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğü fazla ise karışımın işlenebilirliği azalmakta ancak içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma direnci ve asfalt ile adezyon kuvveti artmaktadır. Ancak buna karşın karışımın boşluk hacmi, sıkışmaya karşı direnci ve digradasyon gibi olumsuz özellikler de artmaktadır [1,49].

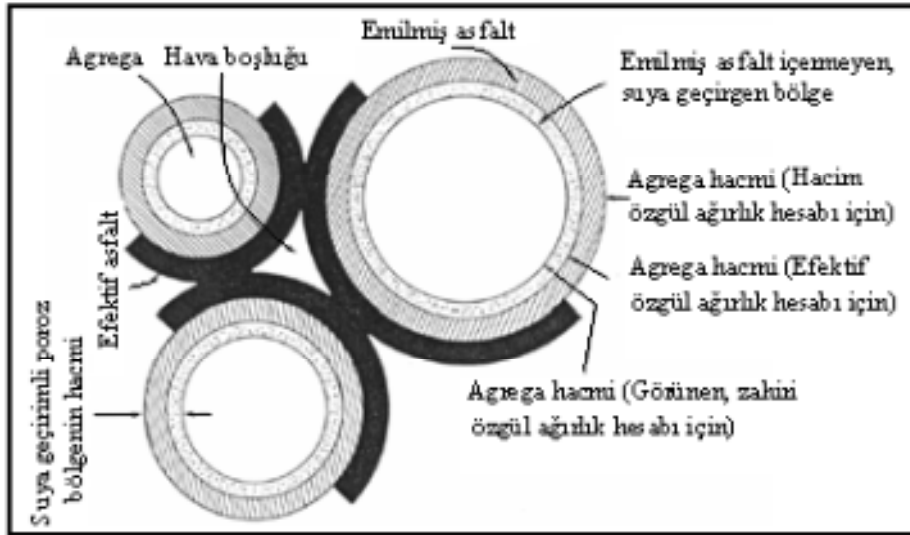
### **1.5.5. Agregalarda Porozite, Yüzey Alanı ve Boşluk**

Agrega danelerinin porozitesinin veya su emme yeteneğine sahip boşluk miktarının belli bir düzeyde olması istenir. Yeterli poroziteye sahip agrega daneleri bitümün emilmesine olanak sağlayacağından dolayı agrega ile bağlayıcı film tabakası arasında kuvvetli bir adezyon oluşturarak stabilitenin artmasına ve suyun etkisi ile film tabakasının soyulmasının azalmasına neden olmaktadır. Ancak aşırı poroz agregalar, özgül ağırlıklarının az olmasından dolayı karışımın yoğunluğunun ve stabilitesinin düşük olmasına neden olmaktadır. Ayrıca gereğinden fazla asfalt kullanımı sıcak havalarda kuma-terleme problemlerini doğurmaktadır. Genel olarak bitümlü sıcak karışımlarda % 0.5-2.5, temel tabakalarında ise don direncinin yüksek olabilmesi için sıfır porozite istenir [49].

Agrega danelerinin sahip oldukları yüzey alanlarının toplamı ile agrega daneleri arasındaki boşlukların toplamı, bağlayıcısız veya bağlayıcılı karışımların tüm özelliklerine doğrudan etki eden önemli faktörlerdir. Toplam yüzey alanı ve toplam boşluk hacmi, gradasyon, dane çapı, dane biçimi gibi özelliklere bağlıdır. Agregada dane çapı küçüldükçe toplam yüzey alanı ve boşluk hacmi önemli ölçüde artacağından gerekli bağlayıcı ihtiyacı artacak, ayrıca boşluk miktarının artması ile karışımın yoğunluğu azalacaktır. Ancak, maksimum dane çapının artması ile işlenebilirlik problemi artsa da karışımın yoğunluğunda artış olacak, fakat buna karşın gerekli bağlayıcı miktarı azalarak karışımın kohezyonu, stabilitesi ve durabilitesi azalacaktır. Bu sebeple kaplamalarda kullanılacak agregaların maksimum dane çapı karışımın bu özelliklerini optimize edecek şekilde seçilmelidir [1,49].

### 1.5.6. Agregalarda Özgül Ağırlık

Özgül ağırlık, bir maddenin birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25°C'deki suyun ağırlığına oranı olarak tarif edilir. Agregada danesinin hacim tanımlamasına bağlı olarak zahiri, hacim ve efektif olmak üzere üç adet özgül ağırlık türü vardır. Agreganın özgül ağırlığı, bitümlü sıcak karışımda kullanılacak bağlayıcı oranını belirlemede yardımcı olmaktadır. Asfalt karışım hesaplarında kullanılan agrega için seçilecek olan özgül ağırlık, sıkıştırılmış kaplamada hesaplanan hava boşlukları miktarını en doğru olarak veren özgül ağırlık olmalıdır. Şekil 19'da özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan agrega hacim tanımlamaları görülmektedir.



Şekil 19. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimleri

Hesaplamalarda zahiri özgül ağırlık kullanıldığında, asfaltın su geçirirli tüm boşluklar tarafından absorbe edildiği kabul edilir. Hacim özgül ağırlık kullanıldığında, asfaltın su geçirirli boşluklar tarafından absorbe edilmediği kabul edilir. Efektif özgül ağırlık, agrega tarafından absorbe edilen asfalt miktarını dikkate aldığından, sıkıştırılmış asfalt kaplama karışımındaki boşluk hesabı için en doğru sonucu vermektedir [1].

### 1.5.7. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agregaların stabilitesi, durabilitesi ve adezyonu yol kaplamalarının tüm fiziksel özelliklerine doğrudan veya dolaylı olarak etki eder. Bu nedenle agreganın fiziksel özellikleri yol kaplamalarının gerek stabilite gerekse performansı için çok önemlidir.

Agregaların stabilitesi, trafik yüklerinden veya zeminin hacim değiştirmesinden dolayı oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Stabilite; kayma mukavemeti, CBR, esneklik modülü veya yatak katsayısı ile ölçülüp belirlenir. Agregaların kayma mukavemeti kesme kutusu testi ile tayin edilir ve Formül 2'de verildiği gibi hesaplanır.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2)$$

Burada;

- $\tau$  : Kayma mukavemeti ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $c$  : Kohezyon ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $\sigma$  : Kayma düzlemine dik normal basınç ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $\phi$  : İçsel sürtünme açısı (derece)

Eğer agrega bir bağlayıcı ile karışım yapmış ise belirli bir kohezyona sahiptir ancak temel tabakaları gibi bağlayıcısız ise  $c=0$  olacağından tüm kayma mukavemeti içsel sürtünme tarafından sağlanır. Bu sebeple yol kaplamalarının mukavemet ve deformasyon direncinden başlıca sorumlu olan agregaların içsel sürtünme açısıdır. Agregaların içsel sürtünme açıları; danelerin yüzey pürüzlülüğü arttıkça, agrega danelerinin açısallığı arttıkça, boşluk oranı azaldıkça, dane çapı büyüdükçe, yoğun-sürekli bir gradasyona sahip oldukça, yassı ve uzun dane azaldıkça, filler miktarı azaldıkça ve daneler arasındaki kenetlenme arttıkça artmaktadır. Dolayısıyla içsel sürtünme açısına etki eden tüm bu parametreler kaplamanın stabilitesi içinde önemlidir. Ancak agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğü ile açısallığı en önemli etkenlerdir. Bu nedenle yol kaplamalarında muhakkak kırmataş agrega kullanılmalıdır.

Agregaların durabilitesi, kırılma aşınma ve parçalanmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Agregalar kompaksiyon ve trafik etkileri altındaki mekanik etkilerle kırılmaya maruz kalırlar. Bu nedenle kaplamanın üst tabakalarında kullanılan agregaların

alt tabakalarda kullanılan agregalara kıyasla kırılmaya karşı daha dirençli olmaları gerekmektedir. Aşınma (digradasyon) tekerrür eden trafik yükleri altında agrega danelerinin çok küçük parçalar halinde ufalanmasıdır. Aşınma ile ince malzeme miktarı artarak agreganın gradasyonu bozulur ve dren kabiliyeti azalır. Parçalanma (disintegrasyon) agrega danelerinin mekanik etkilerden ziyade fiziko-kimyasal etkiler ile parçalanmasıdır. Bu tip aşınma, suyun etkisi, agreganın porozluğu ve minerolojik yapısı ile ilgilidir. Agrega danelerinin emdiği suyun donması sonucu yaptığı hacim genişlemesinin oluşturduğu ilave gerilmeler ve donma-çözünme periyotlarının sıklığı ile agrega daneleri parçalanmaya maruz kalırlar.

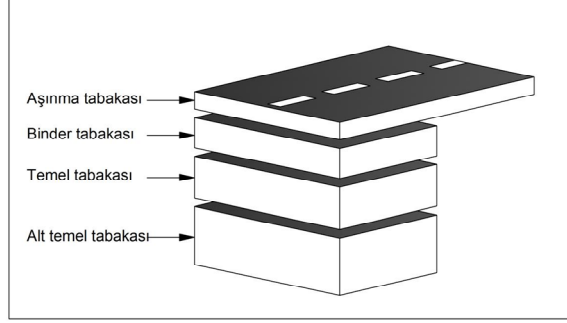
Yol kaplamalarında kullanılan tüm malzemeler suyla temas halindedir. Bu nedenle bitümle kaplı agrega danelerinin suyun etkisi ile soyulmaması için agrega ile bağlayıcı arasındaki adezyonun yüksek olması gerekir. Agregaların adezyon kabiliyeti bitümün viskozitesi arttıkça, yüzey pürüzlülüğü arttıkça, porozluk veya absorpsiyon arttıkça, yüzey alanı arttıkça (dane çapı küçüldükçe), yüzeysel çekim enerjisi ve kimyasal reaksiyonlar arttıkça, karıştırma ısısı arttıkça, agreganın nemi azaldıkça ve agreganın temizliği arttıkça artar [49].

### **1.6. Bitümlü Sıcak Karışımlar**

Karayolu, önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak saptanmış bir güzergâh boyunca, doğal zeminin istenilen kotlara getirilmesi ve üzerinde motorlu taşıtların hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi amacıyla inşa edilen yapıların tümü olarak tarif edilmektedir. Bir karayolu yapısı, görevi, yapım sırası ve özellikleri açısından alt ve üst yapı olarak iki ayrı bölümde incelenebilir [53,67].

Yapımı tamamlanmış bir karayolunda, tesviye yüzeyi ile doğal zemin arasında kalan bölgeye altyapı adı verilir. Altyapı yolun dolgu kesimlerinde, dışarıdan getirilmiş toprakla oluşturulmuş bir toprak gövde, yarma kesimlerindeyse doğal zemindir ve başlıca görevleri, istenilen kotta düzgün bir yüzey sağlamak, üstyapıdan gelen yükleri daha geniş bir alana yaymak ve az da olsa yolu dış etkilerden korumaktır. Üstyapının oturduğu altyapı ve taban zemininin durumu, yolun inşa maliyeti ve bakım masrafları açısından büyük önem taşımaktadır [1,53,67].

Karayolu üstyapısı, trafik yüklerini altyapının taşıyabileceği değere indirmek, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen, alttemel temel ve kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısıdır (Şekil 20).



Şekil 20. Tipik bir üstyapı enkesiti

Üstyapılar, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin türlerine, özelliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit ve esnek üstyapı olarak iki ana gruba ayrılmaktadır [53]. Gelişmiş birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de karayolu üstyapıları esnek üstyapı olarak projelendirilmekte ve yapılmaktadır [56].

Esnek üstyapıyı teşkil eden temel ve alttemel tabakaları, yük taşıma kabiliyetini arttırmak, deformasyonlara karşı direnç göstermek, drenaj sağlamak, zeminin hacim değişikliklerine karşı koymak, don etkilerini önlemek, üstyapı inşaatının maliyetini düşürmek ve hızlandırmak ve kaplama inşaatı için düzgün bir yüzey oluşturmak amacıyla bağlayıcısız ya da bir bağlayıcı maddeyle işlem görmüş olan belirli granülometrideki malzemeden inşa edilmektedir. Agregaya ile bitümlü malzeme bileşiminden meydana gelen ve trafik yüklerine doğrudan maruz kalan kaplama tabakası ise, trafiğin aşındırma ve iklimin ayrıştırma etkilerine karşı direnç göstermek, yol yapısını sudan korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlayarak konforlu bir sürüş sağlamak amacıyla, sathi kaplama veya BSK kaplama olarak inşa edilmektedir [1,53,59].

Bitümlü sıcak karışımlar, proje ömrü içinde toplam standart dingil yükü sayısı  $3 \times 10^6$ 'dan fazla olan yüksek standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar, kırılmış ve elenmiş kaba agregaya, ince agregaya ve mineral fillerin belirli gradasyon limitlerine uygun olarak uygun bir bitümlü bağlayıcı oranı ile bir plentte belirli sıcaklıkta homojen olarak karıştırılması ile elde edilir ve yola taşandıktan sonra belirli

sıcaklıkta sıkıştırılarak kaplama inşaatı gerçekleştirilir. Bitümlü sıcak karışım kaplamaların maliyetleri çok yüksek olduğundan yapımı tamamlandıktan sonra istenilen şartları sağlaması ve öngörülen sürede bozulmadan hizmet verebilmesi için uygun malzeme seçiminin yanında bileşim oranlarında çok iyi tespit edilmesi gerekmektedir. Agregasfalt karışımlarının yol kaplamasında kullanılabilmesi için dizayn esnasında stabilite, durabilite, esneklik, yorulma ve kayma direnci, geçirimsizlik ve işlenebilirlik gibi özellikleri sağlaması gerekir. Esnek üstyapının performansını doğrudan etkilemesi sebebiyle yolun öngörülen ömür ve konfor seviyesinin sağlanması bakımından bağlayıcı ve agrega özelliklerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır [1,56,65,68].

Bitümlü karışım kaplamaları, alttemel ve temel tabakalarında kullanılan malzeme cinsine ve bu tabakaların kalınlıklarına göre 2 ila 10 cm kalınlığında yapılabilirler. Ancak 5-6 cm'den daha kalın kaplama yapılması söz konusu ise bu durumda kaplamanın iki tabaka halinde yapılması gerekir. Daha az sıkıştırılan ve daha az bitüm içeren alttaki tabakaya "binder tabakası", binder tabakasına göre daha iyi sıkışmış ve daha fazla bağlayıcı içeren üstteki tabakaya da "aşınma tabakası" adı verilir [65].

### **1.6.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Özellikleri**

Bitümlü sıcak karışım tabakalarının kaliteleri sahip oldukları özelliklere bağlı olduğundan bu özelliklerin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bunlar, stabilite, rijitlik, dayanıklılık (durabilite), yorulma mukavemeti, esneklik (fleksibilite), geçirimsizlik, kayma direnci ve işlenebilirliktir.

#### **1.6.1.1. Stabilite**

Stabilite, taşıtlardan gelen sürekli dinamik yükler, uzun süreli statik yükler ve hızlanan veya yavaşlayan tekerlek etkileri altında oluşan deformasyonlara karşı bitümlü kaplamaların gösterdiği dirençtir. Stabilite yetersizliği olan kaplamalarda çökme, tekerlek izi ve ondülasyon gibi bozulmalar meydana gelir. Ancak, düşük stabilite ne kadar zararlı ise çok yüksek stabilite de o kadar zararlıdır çünkü çok yüksek stabiliteli bitümlü karışımlar gerilmelere maruz kaldığında esnek davranış gösteremeyip kaplamada çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların stabilitesi içsel

sürtünme açısı ve kaplamanın kohezyonu ile sağlanır. Dolayısıyla içsel sürtünmeden agrega kohezyondan ise bitüm sorumlu olacaktır. Agregalar arası içsel sürtünme agrega danelerinin şekli, yüzey pürüzlülüğü ve karışımın boşluğuna bağlıdır. Kohezyon, agregayla asfalt arasındaki adezyon kuvvetini ve bitümün deformasyona karşı gösterdiği direnci ifade eder. Kohezyon genel olarak, agreganın absorpsiyonu ve porozluğu arttıkça, bitüm miktarı arttıkça (optimum bitüm yüzdesine kadar), bitümün viskozluğu artıp penetrasyonu düştükçe, bitümün ısı azaldıkça, yükleme hızı arttıkça, karıştırma, serme ve sıkıştırma ısı arttıkça, filler/bitüm oranı azaldıkça önemli bir artış göstermektedir [1,49,65,69,70].

### 1.6.1.2. Rijitlik

Bitümlü sıcak karışımlar, viskoelastik ve termoplastik malzemeler olduğundan dolayı mekanik özelliklerini belirlemek için “Rijitlik Modülü” kullanılmaktadır. Rijitlik modülü ( $R_m$ ), elastik malzemelerin elastikiyet modülüne benzemekle beraber ısı ve yükleme hızına bağlı olarak Formül 3 ile saptanır.

$$R_{m(t,i)} = \sigma / \varepsilon \quad (3)$$

Burada;

- $\sigma$  : Gerilme ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $\varepsilon$  : Şekil değiştirme (deformasyon)
- $i$  : Isı (derece)
- $t$  : Yükleme süresi veya hızı

Rijitlik, bitümlü sıcak karışımların yükleme süresi veya hızı ve ısı etkisi altında gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkinin ifadesidir. Yani rijitlik genel olarak yükleme süresi azaldıkça, yükleme hızı arttıkça, ısı azaldıkça, karışımın yoğunluğu arttıkça ve asfaltın viskozitesi arttıkça artacaktır [1,49].

### 1.6.1.3. Dayanıklılık (Durabilite)

Bitümlü sıcak karışımların durabilitesi, hava, su, sıcaklık ve trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı koyması olarak tarif edilir. Yani durabilite, bitüm özelliklerinin değişmesine (yaşlanma-sertleşme), agrega danelerinin kırılması ve ufalanmasına ve bitümün soyulmasına karşı kaplamanın gösterdiği dayanımdır.

Dayanıklılık özelliği, genellikle yüksek asfalt içeriği, yoğun veya iyi derecelenmiş agrega gradasyonu, iyi sıkıştırılmış geçirimsiz karışımlar, sert asfalt ve kalın film tabakası ve yüksek soyulma direnci sayesinde iyileşmektedir. Karışımdaki asfalt miktarının artırılması ile agrega danelerini saran ince film tabakası kalınlaşacak ve daha kalın asfalt filmler yaşlanmaya (sertleşmeye) karşı direncin artmasını sağlayacak ayrıca boşluk miktarını azaltarak karışıma hava ve su girişini zorlaştıracaktır. Ancak, daha kalın asfalt filminin tekerlek izi, deformasyon ve sıcak havalarda kasma oluşumuna yatkın olduğuda unutulmamalıdır.

Su etkisine karşı koymak için de aynı koşullar yanında daha yoğun bir karışım kullanmak, asfaltın agregadan soyulmasına karşı daha yüksek direnç sağlayacaktır. Karışımda yetersiz oranda asfalt kullanmak, trafiğin aşındırma etkisi ile agreganın yüzeyden kopmasına sebep olacaktır. Ayrıca, bitüm ile agreganın karıştırılması sırasında bitümün aşırı derecede ısıtılması bitümün yaşlanmasına sebep olacaktır. Bu durumda ileriki aşamalarda bitüm kırılğan olacak ve ayrışmalar ortaya çıkacaktır. Karışımın aşınması doğal olarak agreganın aşınma özelliğine de bağlı olduğundan sıcak karışımlarda kullanılan agreganın kırılmış ve elenmiş olması yanında aşınmaya, soyulmaya ve ufalanmaya karşı da dirençli olması istenir [1,49].

### 1.6.1.4. Yorulma Mukavemeti

Yorulma, bir malzemenin çekme mukavemetinden daha düşük değere sahip tekrarlı gerilmeler altında kırılmasıdır. Bitümlü sıcak karışımların yorulma mukavemeti ise trafik yüklerinden kaynaklanan tekrarlı eğilmelere çatlamadan karşı koyabilme direnci olarak ifade edilebilir. Yorulma mukavemeti, rijitlik, yoğunluk, bitüm penetrasyonu, bitüm miktarı, kaplama kalınlığı arttıkça ve eğilme gerilmesi azaldıkça artış göstermektedir [1,49,50].



#### **1.6.1.5. Esneklik (Fleksibilite)**

Esneklik, bitümlü sıcak karışımların taban zemininde ve temelde meydana gelen uzun süreli oturmalara uyum sağlayabilme özelliğidir. Esneklik yetersizliği yol yüzeyinde çatlamalara sebep olur. Genel olarak bir asfalt kaplama karışımının esnekliği, yüksek asfalt içeriği ve nispeten açık gradasyonlu veya boşluklu agregalar ile geliştirilebilmektedir. Ancak, kaplamanın esnekliğindeki artışın, stabilitesinin azalacağı anlamına geleceği de göz önünde tutulmalıdır [1,49,65].

#### **1.6.1.6. Geçirimsizlik**

Geçirimsizlik bitümlü sıcak karışımların, içlerine hava ve su girmesine karşı gösterdiği dirençtir. Kaplamadaki boşluk miktarı ve boşlukların birbiri ile bağlantısı, kaplama yüzeyindeki su, hava ve gazların kaplama içine geçmesi için gerekli koridorları oluşturur. Geçirimsizlik azaldıkça hava ve su etkisi ile bitümün yaşlanması hızlanır, soyulma mukavemeti azalır ve donma-çözülme tekerrürleri ile kaplamada bozulmalar oluşur. Bir kaplamanın geçirimsizliği, karışımın asfalt miktarı, yoğunluğu ve sıkıştırması arttıkça boşlukları azalacağından artacaktır. Ancak, kaplamada yeterli stabilite sağlanması, sıcak havalarda kusmanın engellenmesi ve trafik altında sıkışmaya müsaade etmek amacıyla bir miktar boşluk bırakmak gereklidir. Bunun yanında, karışımın içsel sürtünme açısının azalmasını önlemek ve kaplamanın geçirgenliğini azaltarak asfaltın yaşlanmasını geciktirmek için boşluk miktarı sınırlandırılmaktadır [1,49,70].

#### **1.6.1.7. Kayma Direnci**

Kayma direnci, araçların frenleme sırasında emniyetle durabilmesi ve kurbalarda merkezkaç kuvvetinin etkisiyle savrulmaması için araç tekerlekleriyle kaplama arasında olması gereken sürtünme kuvvetini ifade eder. Kayma direnci genel olarak, düşük asfalt miktarı, cilalanma direnci yüksek, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega ile açık ve kaba gradasyonlu karışım kullanmak suretiyle artar. Kaplamanın yüzey düzgünlüğü arttıkça sürüş konforu artmakta ancak kayma direnci önemli ölçüde azalmaktadır [49].

### 1.6.1.8. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın serilmesi ve sıkıştırılması esnasında gösterdiği kolaylığın ölçüsü olarak tanımlanır ve karışım dizayn parametrelerinde, agrega kökeni veya gradasyonunda yapılacak değişikliklerle yükseltilebilir.

İşlenebilirlik genel olarak; kaba agrega miktarı ve agrega maksimum dane boyutu arttıkça, kırmataş agrega kullanıldıkça ve agrega kırılmışlığı ile yüzey pürüzlülüğü arttıkça, karışımın ısısı düştükçe, asfalt katılaştıkça veya viskozluğu arttıkça, mineral filler miktarı ve ara boyutlu malzeme miktarı aşırı arttıkça azalmaktadır.

İşlenebilirliği düşük olan karışımlar, serme ve özellikle sıkıştırma zorlukları doğuracaklarından, genellikle homojen olmayan ve stabilitesi düşük olan kaplamalar elde edilmektedir [1,49].

### 1.6.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar

Bitümlü sıcak karışım kaplamalar, ilk inşa edildiklerinde çok iyi dizayn edilmiş olsalar bile trafiğe açıldıktan sonra iklim, çevre ve trafik koşulları altında belirli bir süre sonra bozulmaya başlarlar [1]. Bir yolun servis ömrünü uzatmanın ya da ekonomik ömrü içerisinde ondan en iyi şekilde yararlanmanın tek yolu gerekli düzeyde sürekli bakım yapmak ve yol üst yapısının mukavemetini gerekirse onarım yöntemleriyle sürekli yükseltmektir. Genelde kaplama yaşını göz önüne almaksızın uygun ve doğru bir bakım ve etkin çalışan bir drenaj sistemi, yapılmış olan bir yolun bozulmasını engellemekte önemli bir rol oynar.

Türkiye koşullarında, tasarım yönteminin ve malzemesinin yanlış seçimi, trafiğin hızlı ve kontrolsüz bir şekilde artması, iklimsel koşulların ağırlığı, projeye ve tekniğe uygun olmayan altyapı inşası, bakım ünitelerinin diğer ünitelerle koordinasyonsuz ve daha az etkili çalışması başlıca bozulma nedenleridir [53].

Bir yolun bozulma kriterleri, yolun servis yeteneği indeksi, yoldaki tekerlek izi derinliği ve çatlak ve defleksiyon oluşumuyla ifade edilir. Servis yeteneği indeksi yöntemi AASHTO (Amerika Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği) tarafından geliştirilmiş bir yöntem olup bu yöntemde yolun var olan servis kabiliyeti iyiden kötüye doğru 5 ile 0 arasında bir ölçekle değerlendirilir. Bu indeks yolun ne derecede bakıma ve onarıma gereksinim duyduğunun bir göstergesidir [1,53,71]. Tekerlek izi derinliği de yol bozulma

kriterlerinden önemli bir tanesi olup tekerlek izi derinliğinin büyüklüğüne göre bakım ya da onarım kararı verilmektedir. Bu konuda genel kriter 1.0-2.5 cm'dir [53,71].

Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen bozulmalar, deformasyonlar (stabilite bozuklukları), ayrışmalar (yüzeysel kopmalar, parçalanmalar) ve çatlaklar olarak sınıflandırılabilir [49].

### **1.6.2.1. Deformasyonlar**

Deformasyonlar kaplama imalatından bir süre sonra görülen yapısal ve kalıcı bozukluklar olup sürüş konforu ve emniyeti açısından önemli sakıncaları vardır. Deformasyonlar genel olarak düşük stabiliteli bitümlü sıcak karışım imalatından kaynaklansa da, kaplama tabakalarının yetersiz sıkıştırılmasının, aşınma tabakasında aşırı bitüm ve filler kullanılmasının, alt tabakalarda ve zeminde aşırı hacim değişikliği olmasının, tabaka kalınlıklarının yetersiz oluşunun ve yetersiz drenajın da önemli etkenler olduğu unutulmamalıdır [49].

#### **1.6.2.1.1. Tekerlek İzi Oluşumu**

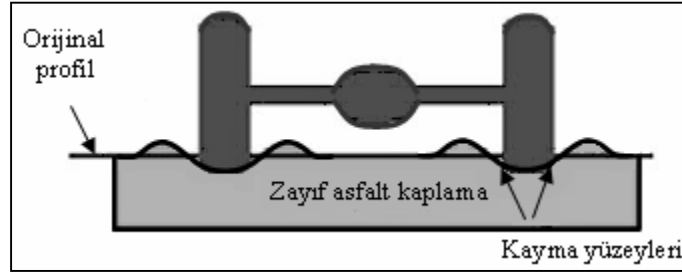
Tekerlek izi oluşumu, özellikle sıcak havalarda ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda çok sık karşılaşılan, kalıcı deformasyonun en yaygın şeklidir ve aşağıdaki nedenlerden kaynaklanmaktadır [1,49,53,71].

- Ağır trafik yükü ve tekerrür sayısının fazlalığı
- Ağır taşıtların yavaş hızı (tırmanma şeritleri gibi)
- Yüksek hava sıcaklığı ve düşük viskoziteli asfalt
- Yetersiz temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemeti
- Aşırı asfalt ve filler yüzdesi veya filler/bitüm yüzdesi
- Yuvarlak dere malzemesi kullanımı
- Yetersiz sıkıştırma

Tekerlek izi deformasyonları özellikle hızlı taşıtlar için sürüş emniyeti açısından tehlikeli iken tüm hızlardaki taşıtlar için de sürüş konforu açısından sakıncalıdır. Ayrıca yüzeysel yağmur suları bu oluklarda birikerek taşıtların sürüş emniyetini olumsuz etkiler. Oluklarda biriken sular kaplamanın içine de nüfuz ederek agreganın soyulmasına ve

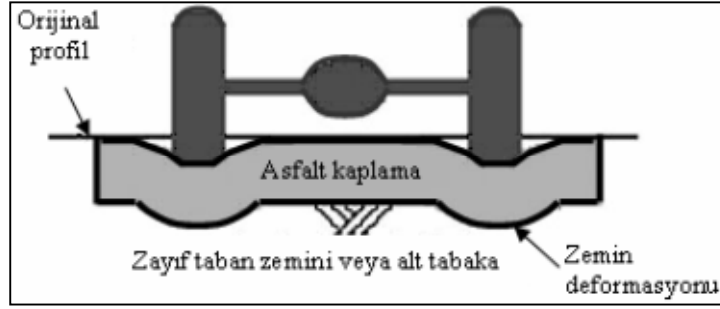
asfaltın oksidasyonuna sebep olur. Bu nedenle tekerlek izi oluşumları diğer tip stabilite bozukluklarının başlamasına ve/veya hızlanmasına neden olan önemli bir bozulma tipidir [49].

Bitümlü sıcak karışım tabakaları, tekrarlı ağır yüklere maruz kaldıklarında bünyelerinde iki şekilde tekerlek izi oluşmaktadır. Birinci durumda tekerlek izi, Şekil 21’de gösterildiği gibi kaplama tabakasında meydana gelir ve akma tekerlek izi olarak adlandırılır. Akma tipi tekerlek izinde sıcak karışım trafik yüklerine karşı koyacak kayma mukavemetine sahip değildir. Bu durumda araç tekerleğinin temas ettiği bölümlerde çökme, kenarlarında ise kabarmalar gözlenir. Akma tekerlek izi, en çok, çıkış eğimli kesimlerde, kavşak yaklaşımlarında ve kurbalarda, yani ağır taşıtların hızlarını azalttığı kesimlerde ve lastik ile kaplama arasındaki değme alanında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin yüksek olduğu kesimlerde oluşur. Plastik akma, karışımın yük altında yanıl hareketidir ve karışımda aşırı asfalt ve yuvarlak agrega bulunması ve yetersiz sıkıştırma sonucu oluşmaktadır [1,58,72].



Şekil 21. Akma tekerlek izi oluşumu

Tekerlek izi Şekil 22’de belirtildiği gibi sadece asfalt kaplama tabakasında değil aynı zamanda kaplama altındaki tabakalarda da (taban zemini dâhil) meydana gelmiş ise bu olay yapısal bir bozulma olarak değerlendirilir. Yapısal tekerlek izlerinde kenarlarda kabarma oluşmaz. Bu tür bozulmaların nedeni, asfalt kaplama tabakası ve alt tabakaların yetersiz kalınlıkları, temel ve alttemel tabakalarının stabilitelerinin düşüklüğü, zemin tabakasının sağladığı desteğin azlığı, kötü drenaj, donma çözülme etkileri ve kaplamanın maruz kaldığı yüklerin büyüklükleri ve şiddetidir [1,58,72].



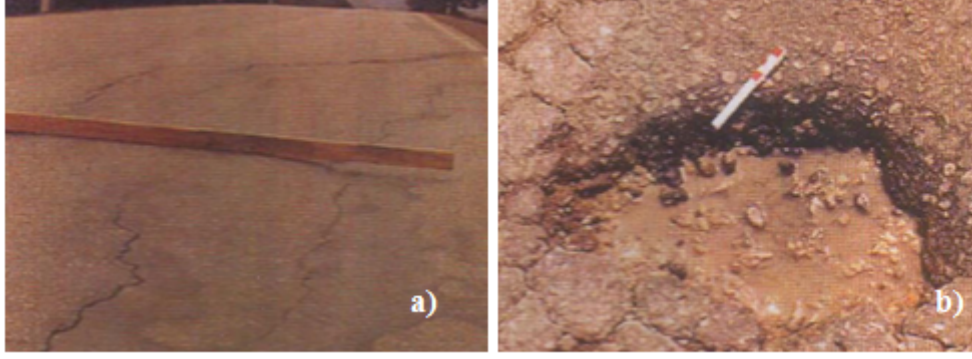
Şekil 22. Yapısal tekerlek izi oluşumu

Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen tekerlek izi bozulmalarına karşı, karışımın kayma mukavemetini arttırmanın yolu, karışımda yüksek içsel sürtünme direncine sahip agrega ile yüksek kaplama sıcaklıklarında daha çok elastik bir katı gibi davranan asfalt kullanmaktır [1].

#### 1.6.2.1.2. Oturmalar ve Çökmeler

Oturmalar kaplama altındaki tabakalarda meydana gelen bozulmaların yüzeye yansımadır ve bitümlü kaplamaya bağlı değildir. Oturmalar, yol orta çizgisi boyunca ya da kenar şeritlerde uzunlamasına veya enlemesine oluşur. Oturma eğrisi çok büyük olduğundan kaplama tabakası esnekliği sayesinde aynı şekli almaya çalışacak ve çatlamayacaktır. Ancak çok rijit kaplamalarda asfalt betonu alt tabakaların oturmalarına uyum sağlayamayarak çatlayabilir. Oturmaların sebepleri, alt tabakaların yetersiz kalınlığı ve altyapıda oluşan oturmalar, yan desteklerin olmayışı (banketlerin yetersizliği), yer altı su seviyesinin yüksekliği, yetersiz drenaj ve temel ve alttemel malzemelerinin zeminden gelen kille karışması olarak sayılabilir (Şekil 23-a) [1,53,69].

Çökmeler, çatlakları içeren ya da içermeyen ve orijinal kaplama sathına göre alçakta kalmış, 0.5–1.5 m dairesel çapta ve derinlikleri 2–5 cm ya da daha fazla olabilen ve içlerinde su biriken küçük çukurlardır. Genel nedenleri oturma bozulmaları ile aynıdır (Şekil 23-b) [1,49,53].



Şekil 23. Kaplamada oturma (a) ve çökme (b)

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

Ondülasyonlar, yol üzerinde trafiğin akışına göre enine doğrultuda oluşan ve aralıkları yaklaşık olarak eşit olan, belirli biçimde dalgaya benzeyen, plastik bir hareket sonucu oluşan kaplama deformasyonlarıdır. Bu tip deformasyonlar kavşaklar, otobüs durakları, tırmanma şeritleri gibi kesimlerde ondülasyon (veya dalgalanma) şeklinde görülür. Genel olarak düşük stabiliteli karışım, yetersiz aşınma tabakası kalınlığı, düşük viskoziteli asfalt, aşırı asfalt miktarı, rutubet miktarı, zayıf yapıştırma tabakası ve ağır taşıtların yoğun durma-kalkma hareketi gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Yığılmalar ise plastik bir hareket sonucu kaplama yüzeyinde oluşan lokal tümsek ve şişkinliklerdir. Yığılmalar özellikle trafiğin durup kalktığı yerlerde, inişlerde, araçların fren yaptığı kesimlerde ve keskin kurplarda oluşurlar [1,49,53].

Kabarmalar, genel olarak doğal zeminin veya üst tabakaların şişmesiyle kaplama tabakasının lokal olarak yukarıya doğru deplasmanıdır. Doğal zemindeki suyun donma çözülmesinden ve zeminin şişme karakterine sahip olmasından meydana gelir ve genel nedenleri ondülasyonlarla aynıdır [1,69].

### 1.6.2.2. Ayrışmalar

Bu tip bozulmalar aşınma tabakasının trafik ve iklim etkisi ile küçük parçalar halinde ayrışması sonucu kopma ve parçalanma şeklinde görülür ve aşınma tabakasından agrega danelerinin koparak ayrılmasından kaynaklanır. Ayrışmalar genel olarak yapım hataları, düşük kaliteli malzeme (kirli ve ıslak agrega) kullanımı, serim sırasında segregasyon,

homojen olmayan karışım ve yetersiz ve yüksek penetrasyonlu asfalt (yetersiz adezyon) gibi nedenlerden oluşur [49].

#### **1.6.2.2.1. Sökülmeler**

Agrega tanelerinin yerlerinden ayrılmasıyla, yüzeyden aşağıya ya da kenardan içe doğru gelişen bozulmalardır. Sökülme öncelikle ince malzemelerin yüzeyden ayrılmaları ve küçük boşluklar bırakmalarıyla başlar ve daha sonra aşındırma ile daha büyük parçaların ayrılması şeklinde devam eder. Sökülme bir anlamda kaplamanın erozyonudur. Sökülmeler genel olarak yetersiz sıkıştırma, kirli ve parçalanmış agreganın kullanımı, soğuk ve yağışlı havalarda imalat, bitüm miktarı azlığı, ince tabaka kalınlığı ve karışımın aşırı ısıtılması gibi nedenlerden meydana gelir. Sökülmenin üst düzeydeki göstergesi, çanak şeklinde, çapları 25 cm ile 75 cm arasında değişen ve farklı derinlikteki çukurlardır [1,49,53].

#### **1.6.2.2.2. Soyulmalar**

Soyulma, agreganın bitümlü bağlayıcı arasındaki adezyonunun zayıflamasından dolayı bitümlü sıcak karışımların zamanla yapısının bozulması olarak tarif edilir. Soyulma genellikle asfalt kaplamanın alt tabakalarından başlayıp yukarı doğru hareket eder. Agreganın danelerini saran ince bitüm filmi su, kil ve trafiğin mekanik etkisiyle agregadan ayrılır ve dolayısıyla agreganın daneleri çıplak kalır. Soyulmada rol alan önemli faktörler, agreganın ve bağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri, serim ve sıkıştırma, yüzey ve alt tabakalardaki drenaj ve trafik olarak sıralanabilir ancak bu tür bozulmalarda en önemli faktör, agreganın ve bitümün ara yüzeyinde su ve nemin olmasıdır. Kuru ve temiz agreganın kullanımı, iyi bağlayıcılık karakteri olan bitüm, yüksek bitüm oranı ve yüksek viskoziteli bitümün kullanımı soyulmayı azaltır [1].

#### **1.6.2.3. Çatlaklar**

Çatlaklar, kaplama yüzeyinde trafik, çevre ve iklimin etkisi ile çok çeşitli şekilde, genişlikte ve derinlikte oluşan kusurlardır. Çatlaklar genel olarak stabilite, yorulma ve

yansıma çatlakları olarak sınıflandırılır. Stabilite çatlakları, trafik yüklerinin etkisi ile kaplamanın altında oluşan çekme gerilmelerinin kaplamanın çekme mukavemetini aşması halinde oluşur. Kaplamaya etki eden trafik yükleri kaplamanın her tabakasinda hem basınç hem de çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Basınç gerilmeleri tabakanın üstünde maksimum iken çekme gerilmeleri ise tabakanın altında maksimumdur. Bu nedenle stabilite çatlakları önce tabakanın altında oluşmakta ve trafiğin etkisiyle zamanla tabakaların üst tarafına doğru ilerlemektedir [49].

Yorulma çatlakları ağır trafik yüklerinin tekrerrüü ile kaplamanın yorulma mukavemetinin aşılması sonucu oluşmaktadır. Yansıma çatlakları ise bozulmuş bir kaplamanın üzerine yeniden bir kaplama yapıldığında, alttaki tabakada oluşmuş çatlakların üstteki tabakaya kadar ilerlemesidir. Stabilite, yorulma ve yansıma çatlakları genellikle trafik etkisi ile oluşurken, çevre ve iklim etkisiyle oluşan büzülme veya düşük ısı çatlakları ise trafiğin etkisiyle büyüyerek belirgin hale gelir. Esnek kaplamalarda çoğunlukla yorulma çatlakları oluşmaktadır. Stabilite çatlakları kaplamanın düşük stabilitesinden kaynaklandığından önlenmesi mümkün iken trafik hacminin fazla olduğu yollarda yorulma çatlakları kaçınılmazdır. Kaplamada oluşan çatlaklardan hava ve suyun kaplama içine nüfuz etmesinden dolayı bağlayıcı oksidasyonu ve diğer bozulmalar oluşacağından veya hızlanacağından kaplamada çatlak oluşumu oldukça sakıncalıdır [1,49].

#### **1.6.2.3.1. Timsah Sırtı Çatlaklar**

Bu tip çatlaklar birbirleriyle bağlantılı olup timsah sırtı veya kümes teli görünümünde ve değişik boyutta bloklar halinde kaplamanın tüm kesitinde veya belirli kesiminde oluşmuşlardır (Şekil 24). Timsah sırtı çatlaklar stabil olmayan bir zemin veya temel tabakasındaki aşırı oturmalarından dolayı meydana gelmiş ise genel olarak kaplamanın belirli kesimlerinde görülürler. Eğer bu tip çatlaklar kaplamanın tüm kesitinde ve büyük bir kesimde görülürse aşırı trafik yükü ve tekrerrüü sayısı sonucu kaplamanın yorulma mukavemetinin aşılması sonucu oluşmuşlardır. Dolayısıyla timsah sırtı çatlaklar oturmadan veya yorulma mukavemetinin aşılmasından dolayı oluşmaktadır. Yorulma çatlakları önce kılcal çatlaklar şeklinde taşıt yükü istikametinde boyuna düzensiz bir şekilde oluşmaktadır. Trafiğin etkisiyle bu düzensiz çatlaklar zamanla büyür ve daha sonra enine oluşan çatlaklar ile birleşerek bloklar şeklinde timsah sırtı görünümüne dönüşür. Oturmadan ötürü oluşan timsah sırtı çatlaklar sivri köşeli, büyük ama düzensiz boyutlarda



görülürken yorulmadan ötürü oluşan timsah sırtı çatlaklar genellikle uniform ve daha küçük boyutta bal peteği şeklinde görülmektedir [49].



Şekil 24. Timsah sırtı çatlak

Yorulma çatlaklarını önlemek için, tasarım aşamasında ağır taşıt trafiğini doğru hesaplamak, kaplama altı tabakaları kuru tutmak, kaplama kalınlıklarını arttırmak, nemden etkilenmeyen uygun agrega kullanmak, yeterli esneklikte malzeme kullanmak ve özellikle sıcak karışımın elastik davranışı bitüme bağlı olduğundan sertliği sınırlandırılmış, yüksek elastisiteye sahip yumuşak bitüm kullanmak gerekir [1].

#### 1.6.2.3.2. Düşük Isı Çatlakları

Düşük ısı çatlakları soğuk havalarda asfalt kaplamanın büzülmesiyle oluşur. Dolayısıyla bu tip çatlaklar trafik etkileriyle değil mevsimsel etkiler ile meydana gelmektedir. Düşük ısı çatlakları genel olarak, asfalt kaplama yüzeylerinde oluşan ve kaplamanın tüm kalınlığınca oluşan olmak üzere iki gruba ayrılır. Asfalt kaplama yüzeylerinde oluşan kılcal çatlaklar bitümlü bağlayıcının ısı etkisiyle büzülmesi sonucu oluşan çekme gerilmeleri ile meydana gelirken, kaplamanın tüm kalınlığınca oluşan çatlaklar ise don etkisiyle kabaran zeminin oluşturduğu çekme gerilmeleri ile meydana gelmektedir. Düşük ısı çatlakları kaplamanın enine doğrultusunda eşit veya eşite yakın aralıklarla oluşur çünkü kaplamanın ana büzülme hattı boyuna doğrultudadır. Düşük ısı çatlaklarının oluşmasında en önemli faktör bağlayıcı penetrasyonu ve ısıya duyarlılığıdır.

Soğuk iklimli bölgelerde yumuşak (yüksek penetrasyonlu) ve ısıya az duyarlı asfalt kullanılarak bu tip çatlakların önlenmesi veya geciktirilmesi mümkündür [49]. Ayrıca, karışımda kullanılacak asfalt miktarı, asfaltın yaşlanması, karışımın rijitliği, hava sıcaklığı ve çok soğuk gün sayıları, kaplama kalınlığı ve tabakalar arasındaki sürtünme kuvvetleri de düşük ısı çatlağı hususunda dikkate alınması gereken diğer unsurlardır [1].

### 1.6.2.3.3. Diğer Çatlaklar

Kenar çatlakları; yol eksenine paralel ve genellikle kaplama kenarından 30–50 cm içeride oluşur. Genel olarak banketin yanal desteğinin azlığı, bankette oturma, yetersiz drenaj ve don etkisi, kaplamaya yakın bitki örtüsü ve nem gibi nedenlerden oluşur.

Derz çatlakları; kaplamanın serme ve sıkıştırma esnasında ek yerlerinin sıkıştırma tekniğine uygun olmayan işçilik ve sıkıştırma ile yapılması halinde zamanla oluşmaktadır.

Kayma çatlakları; ağır taşıt tekerleklerinin kaplamaya yaptıkları yatay kuvvetlerin etkisiyle tabakaların birbirine göre yanal hareketlerinden yani kaplama tabakasının temel tabakası üzerinde kaymasından dolayı oluşur. Genel olarak yetersiz yapışma tabakası, yetersiz kaplama kalınlığı, aşırı ağır taşıtlar ve karışımın kum içermesi gibi nedenlerden meydana gelmektedir.

Enine çatlaklar; yol eksenine dik oluşan ve nadiren görülen çatlaklardır. Genellikle yetersiz üstyapı kalınlığı, yetersiz drenaj, sericinin uzun süreli duraklaması, düşük sıcaklık ve alt tabakadaki çatlağın yansması gibi nedenlerle oluşmaktadır.

Yansıma çatlakları; genellikle kaplama altındaki rijit ya da yarı rijit tabakalarda meydana gelmiş çatlak ve açılmaların kaplamaya yansmasıdır [1].

### 1.6.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dizayn Yöntemleri

Bitümlü karışım tasarımının amacı, maksimum kaplama performansının en ekonomik şekilde sağlanmasıdır. Bitümlü karışımların tasarım süreci, agrega türü ve tane dağılımı ile bağlayıcı türü ve miktarının saptanmasını ve şartname özelliklerini sağlayan bitüm-agrega karışımının üretimini içermektedir [73]. Bitümlü sıcak karışımların tasarımında kullanılan birçok yöntem olmasına karşın, kabul görmüş ve geliştirildikleri yıllardan beri günümüze kadar kullanılmış ve hala kullanılmaya devam eden Marshall ve

Hveem olmak üzere iki karışım tasarım yöntemi bulunmaktadır [1]. Marshall tasarım yöntemi hem bitümlü sıcak karışımların dizaynında hem de hazırlanan deney numunelerinin stabilite ve akmasının belirlenmesinde kullanılan bir yöntem olup “Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler” başlığı altında ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

#### **1.6.4. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler**

Yol üstyapısının analitik olarak tasarlanabilmesi, üstyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin ve karışımların özelliklerinin tam olarak belirlenmesine ve bilinmesine bağlıdır. Bu konuda yapılan araştırmalarda laboratuvar deneyleri yaygın olarak kullanılmış olup elde edilen sonuçlar bitümlü karışımların mekanik davranışları hakkındaki bilgilerin edinilmesini sağlamıştır. Analitik üstyapı tasarımında iki grup malzeme özelliği dikkate alınır, bunlardan ilki yapının analizi için gerekli olan yük-deformasyon veya gerilme-şekil değiştirme özellikleri; ikincisi ise bozulma şeklini (deformasyon) belirleyen özelliklerdir. Başlıca bozulma özellikleri yorulma ve kalıcı deformasyondur.

Üstyapı tasarımında ideal olan arazideki malzemenin mekanik özelliklerinin kullanılmasıdır. Ancak tam ölçekli arazi deneyleri yapmak genellikle güçtür ve bu sebeple laboratuvar deneyleri tercih edilir [52].

Bitümün özelliğinden dolayı bitümlü karışımlar visko-elastik ve termo-plastik davranış gösterdiklerinden, laboratuvar deneylerindeki sıcaklık, yükleme süresi, gerilme durumları ve sıkıştırma gibi koşulların mümkün olduğunca arazi şartlarını yansıtması gerekmektedir. Arazi şartları laboratuvarda güçlkle sağlanabildiğinden, arazideki davranışın bazı belirli yönlerini sağlayan birçok basitleştirilmiş deney bulunmaktadır [1].

##### **1.6.4.1. Marshall Metodu ile Karışım Dizaynı**

Ülkemizde ve diğer birçok ülkede bitümlü sıcak karışımların dizaynında kullanılan Marshall metodu, maksimum dane boyutu 2.54 cm (1") veya daha küçük agrega ihtiva eden ve bağlayıcı olarak bitüm kullanılarak hazırlanan sıcak karışımların oranlandırılmasında ve Marshall stabilitesi ve Marshall akmasının bulunmasında kullanılır. Ayrıca Marshall stabilitesinin akmaya oranı olarak belirlenen Marshall oranı değeri de BSK'nın tekerlek izi deformasyonuna karşı göstermiş olduğu direncin bir göstergesidir

[21]. Marshall metodu ile sıcak karışım dizaynında ilk olarak karışımda kullanılacak agreganın elek analizi yapılarak karışımın granülometrisi belirlenir ve granülometri eğrisi çizilir. Karışım granülometrisinin tolerans sınırları belirlenerek tolerans eğrileri çizildikten sonra şartname sınır eğrileri ve şartname sınırlarının ortalaması ile ideal şartname eğrisi çizilir. Karışım granülometri eğrisi ile şartname ideal eğrisinin çakışmasını veya ona çok yakın bir granülometri eğrisi elde edilmesini sağlayan karışım oranları belirlenir [65].

Karayolu Teknik Şartnamesi aşınma tabakası için gradasyon limitleri Tablo 3'te karışımın tolerans sınırları Tablo 4'te verilmiştir [60].

Tablo 3. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri [60]

Elek boyutu	Tip-1	Tip-2
19 mm (3/4")	100	
12.5 mm (1/2")	83-100	100
9.5 mm (3/8")	70-90	80-100
4.75 mm (No 4)	40-55	55-72
2.00 mm (No 10)	25-38	36-53
0.425 mm (No 40)	10-20	16-28
0.180 mm (No 80)	6-15	8-16
0.075 mm (No 200)	4-10	4-10

Tablo 4. Karışımın tolerans sınırları [60]

Malzeme	Toleranslar
No 4 ve daha büyük eleklerden geçenler	±% 4
No 10 – No 80 eleklerden geçenler	±% 3
No 200 eleği geçen	±% 2
Bitümlü bağlayıcı	±% 0.3

Agrega karışımı, herbiri değişik özgül ağırlıklara sahip kaba agreg, ince agreg ve mineral fillerden oluşur. Toplam agreganın hacim ve zahiri özgül ağırlıkları Formül 4 ve 5 efektif özgül ağırlığı ise Formül 6 ile hesaplanır.

$$G_{sb} = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{G_{kb}} + \frac{\%İ}{G_{ib}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad (4)$$

$$G_{sa} = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\frac{\%K}{G_{ka}} + \frac{\%İ}{G_{ia}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad (5)$$

- $G_{sb}$  : Agreganın hacim özgül ağırlığı  
 $G_{sa}$  : Agreganın zahiri özgül ağırlığı  
 $\%K, \%I, \%F$  : Kaba, ince ve filler agregaların ağırlıkça yüzdeleri  
 $G_{kb}, G_{ib}$  : Agregaların hacim özgül ağırlıkları  
 $G_{ka}, G_{ia}, G_{fa}$  : Agregaların zahiri özgül ağırlıkları

$$G_{ef} = \frac{100}{\frac{100+W_a}{D_T} - \frac{W_a}{G_b}} \quad (6)$$

- $G_{ef}$  : Agreganın efektif özgül ağırlığı  
 $W_a$  : Kuru agreganın yüzdesi olarak bitüm  
 $D_T$  : Gevşek kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı  
 $G_b$  : Bitüm özgül ağırlığı

Hesaplar sonunda bulunan agreganın efektif özgül ağırlık değeri hacim ve zahiri özgül ağırlık değerleri arasında olmalıdır. Efektif özgül ağırlık bu iki değer arasında bulunmadığı durumlarda gevşek kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı ( $D_T$ ) deneyi tekrarlanır.  $D_T$  bu aralıklarda elde edilemiyorsa hacim ve zahiri özgül ağırlıkların ortalaması efektif özgül ağırlık olarak alınabilir.

Optimum bitüm muhtevasını tespit etmek için belirli bir orandan başlayarak ardışık olarak agreganın % 0.5'i oranında artan 5-7 farklı bitüm içeriğinde ve her bitüm içeriği için üçer Marshall briketi hazırlanır. Her bir briket için, belirlenen gradasyonda 1150 gr agreganın tartılır. Hazırlanan agreganın ve bitüm şartnamede belirtilen sıcaklıklarda (Tablo 5) agreganın daneleri tamamen bitümle kaplanıncaya kadar karıştırılır (Şekil 25).

Tablo 5. Malzemelerin karıştırma sıcaklıkları [60]

Bitümlü bağlayıcı	Bitüm		Agrega	
	Min (°C)	Max (°C)	Min (°C)	Max (°C)
40/60, 50/70 pen bitüm ile hazırlanan karışımlarda	145	160	150	165
70/100 pen bitüm ile hazırlanan karışımlarda	140	155	145	160



Şekil 25. Bitüm ve agreganın karıştırılması

Karıştırma tamamlandıktan sonra karışım kalıba doldurulur ve 45.7 cm'den serbest düşüş yapan Marshall tokmağı yardımıyla her iki yüzüne 75 darbe uygulanarak sıkıştırılır (Şekil 26). Sıkıştırılan briketler soğumaya bırakılır, soğutulan briketler kalıptan çıkarılarak havadaki ağırlıkları (A), doygun kuru yüzey ağırlıkları (B) ve sudaki ağırlıkları (C) tartılır. Bu ağırlıklar briketlerin özgül ağırlıklarının, boşluk oranlarının ve bitümle dolu boşluk oranlarının belirlenmesinde kullanılır (Formül 7-13).



Şekil 26. Kalıplara dökülen karışımın sıkıştırılması

$$D_p = A/(B - C) \quad (7)$$

$$D_T = \frac{100 + W_a}{\frac{100 + W_a}{G_{ef}} + G_b} \quad (8)$$

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{ef} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{ef}} \times G_b \quad (9)$$

$$P_{be} = W_a - P_{ba} \quad (10)$$

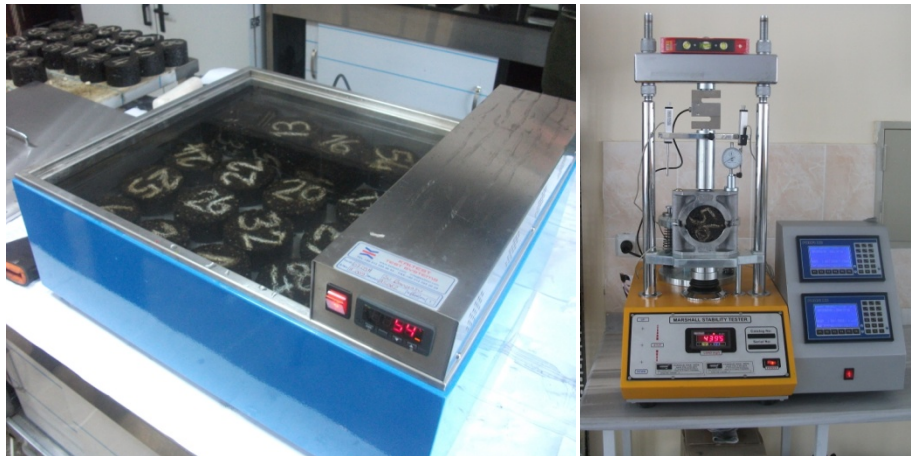
$$VMA = 100 - \frac{D_p(100 - \frac{W_a \cdot 100}{100 + W_a})}{G_{sb}} \quad (11)$$

$$V_h = \frac{D_T - D_P}{D_T} \times 100 \quad (12)$$

$$V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100 \quad (13)$$

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

Yükseklikleri belirlenen ve gerekli tartımları yapılan briketler Marshall stabilite cihazının ve akmalarının belirlenmesi amacıyla 60°C suda 30-40 dk bekletilir ve bu süre sonrasında Marshall stabilite cihazına yerleştirilerek yüklenir. Yükleme en yüksek yük değeri bulununcaya kadar devam ettirilir ve en yüksek yükleme değerindeki akma okunur (Şekil 27).



Şekil 27. Briketlerin su banyosunda kür edilmesi ve Marshall deneyi

Marshall stabilite deneyinde standart briket yüksekliği 63.5 mm'dir. Bu yükseklikten farklı yükseklikte ölçülen briketlerin stabilite değerleri düzeltme katsayılarıyla (Ek Tablo 1) çarpılır.

Briketlerin yoğunluk, boşluk ve stabilite analizleri yapıldıktan sonra  $D_p-W_a$ ,  $V_f-W_a$ ,  $V_h-W_a$  ve stabilite- $W_a$  grafikleri çizilerek;  $D_p-W_a$  grafiğinden maksimum  $D_p$  değerini sağlayan  $W_a$  değerini  $W_{a1}$ ,  $V_f-W_a$  ve  $V_h-W_a$  grafiklerinden şartname limitlerinin (Tablo 6) ortalamasını sağlayan  $W_a$  değerleri  $W_{a2}$  ve  $W_{a3}$ , ve stabilite- $W_a$  grafiğinden maksimum stabiliteyi sağlayan  $W_a$  değerini  $W_{a4}$  olmak üzere optimum bitüm içeriği Formül 14 ile hesaplanır.

$$\text{Optimum bitüm} = (W_{a1} + W_{a2} + W_{a3} + W_{a4})/4 \quad (14)$$

Tablo 6. Asfalt betonu dizayn kriterleri [60]

ÖZELLİKLER	Binder		Aşınma	
	Min	Max	Min	Max
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	75		75	
Marshall stabilitesi, kg	750	-	900	-
Boşluk, %	4	6	3	5
Asfaltla dolu boşluk, %	60	75	65	75
Agregalar arası boşluk, %	13	-	14	-
Akma, mm	2	4	2	4
Filler/Bitüm oranı	-	1.4	-	1.5
Bitüm (Ağırlıkça, 100'e)	3.5	6.5	4.0	7.0

#### 1.6.4.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti (Indirect Tensile Strength, ITS) deneyi, Marshall stabilitesi deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney ekipmanları kullanılarak yapılan bir deneydir. Deney Marshall dizayn metoduna göre hazırlanmış silindirik asfalt numunelerine, çap düzlemi doğrultusuna paralel olarak 50 mm/dakika hızda sabit bir basınç yükü uygulamak suretiyle AASHTO T245 veya ASTM D4123 standartlarına göre yapılır ve numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilerek numunenin aldığı en büyük yük değerini kaydedilir (Şekil 28).





Şekil 28. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi

Deney sonrasında dolaylı çekme mukavemeti değeri Formül 15 ile hesaplanır.

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi hd} \quad (15)$$

- ITS* : Dolaylı çekme mukavemeti ( $kg/cm^2$ )  
*P<sub>max</sub>* : Maximum yük (kg)  
*h* : Numune yüksekliği (cm)  
*d* : Numune çapı (cm)

ITS deneyi, genel olarak bitümlü karışımların çekme mukavemeti özelliklerini ve karışımın kohezyon kuvvetini değerlendirmek amacıyla kullanılır ve bitümlü karışımların sıcaklık ve yorulma nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder. Ayrıca, dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, bitümlü karışımlarda yorulma çatlaklarının oluşma potansiyelinin ve karışımın optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde de kullanılabilir. Bununla birlikte, bu değerler karışımın sertliği, durabilitesi ve sıcaklık, nem ve farklı dingil yükleri karşısında göstermiş olduğu davranış hakkında bilgi verir [1].

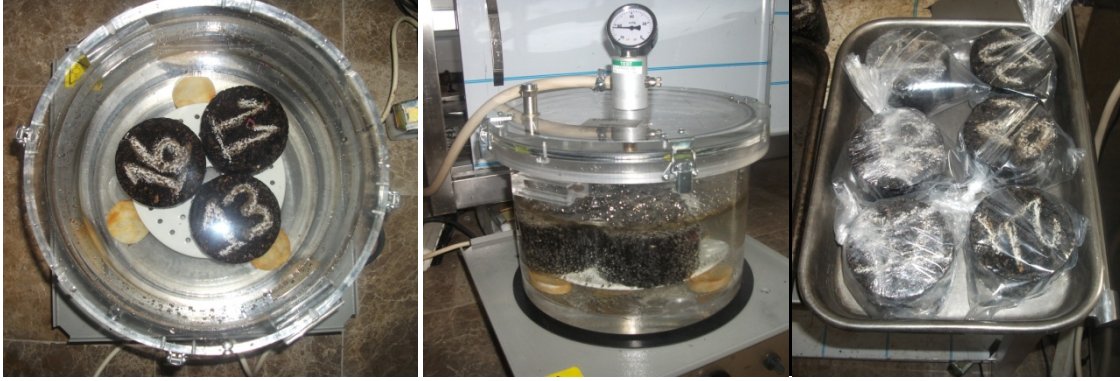
#### 1.6.4.3. Su Hasarı (Modifiye Lottman) Deneyi

Bitümlü sıcak karışımların yol kaplamasında kullanılabilirliğini tespit etmek amacıyla yapılan en önemli çalışmalardan birisi karışımın suya karşı hassasiyetinin

ölçülmesidir. Modifiye Lottman deneyi sayesinde karışımlarda su etkisiyle meydana gelen dayanım kaybı tespit edilmektedir. Elde edilen sonuçlar, sıcak karışım kaplamaların uzun dönem servis süreçlerinde, soyulmaya karşı hassasiyetlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

AASHTO T-283 Modifiye Lottman deneyi, sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların suyun etkilerine karşı hassasiyetlerinin belirlenmesi amacı ile yaygın olarak kullanılan bir deneydir. Deney Lottman deneyi ile Tunnicliff ve Root koşullandırma deneyinin bir kombinasyonu şeklindedir. Orijinal Lottman deneyinde, deney için hazırlanan 9 adet numune 3 gruba ayrılır, birinci grup kontrol amacıyla muhafaza edilir, ikinci grup 660 mm Hg basınç altında 30 dk koşullandırılır. Bu grup kaplamanın arazideki ilk dört yıllık performansını yansıtır. Üçüncü grup ise vakumla doyurulduktan sonra -18°C'de 15 saat ve ardından 60°C'de 24 saat bekletilir. Üçüncü grup kaplamanın arazideki 4 ile 12. yılları arasındaki performansını yansıtır. Belirtilen koşullarda hazırlanan üç grup numunede 55°F (13°C) için 0.065 in/dk veya 73°F (23°C) için 0.150 in/dk hızda ITS deneyine tabi tutulur ve çekme mukavemeti oranları belirlenir. Tunnicliff ve Root koşullandırma deneyinde ise % 6-8 boşluk oranlarında hazırlanan numuneler iki gruba ayrılır. İlk grup kontrol numunesi olarak kullanılırken ikinci grup %55-80 oranlarında suya doyurulur ve ardından 60°C'deki su banyosunda 24 saat bekletilir. Koşullu ve koşulsuz numunelere ITS deneyi uygulanarak çekme mukavemeti oranları bulunur [74].

Lottman ile Tunnicliff ve Root koşullandırma deneylerinin bir kombinasyonu olan modifiye Lottman deneyinde ise sıkıştırılmış asfalt numuneler, kuru ve şartlandırılmış (yaş) olmak üzere iki guruba ayrılmakta ve bu iki gurup numune dolaylı çekme deneyine tabi tutularak kuru karışımın su etkisiyle oluşan dayanım kaybı belirlenmektedir. Deneye tabi tutulacak her test gurubu için 3 adet kuru ve 3 adet şartlandırılmış olmak üzere en az 6 adet numune hazırlanmaktadır. Deney numunelerinin hazırlanması için ilk olarak sıkıştırılmamış numuneler 60°C'de 16 saat bekletilmekte ve sonra 135°C'de 2 saat yaşlanma işlemine maruz bırakılmaktadır. Daha sonra numuneler %6–8 hava boşluklarında sıkıştırılır ve 24 saat oda sıcaklığında bırakılır. Şartlandırmaya tabi tutulmayacak kuru numuneler 25°C'deki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutularak kırılır. Şartlandırılacak numunelere ise 13–67 kPa emme basıncı altında 5–10 dakika süreyle bir manometre ile vakum uygulanarak numunelerin %70–80 oranında su ile doymuş hale gelmesi sağlanır (Şekil 29).



Şekil 29. Numunelerin suya doyurulması

Doygun hale getirilen numuneler, içerisine 10 ml su eklenmiş poşetler içerisine yerleştirilerek 16 saat süreyle  $-18^{\circ}\text{C}$ 'deki buzluga yerleştirilir. Buzluktan çıkarılan numuneler  $60^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılarak  $25^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosuna yerleştirilir ve 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutulur (Şekil 30).



Şekil 30. Numunelerin  $-18^{\circ}\text{C}$  ve  $60^{\circ}\text{C}$ 'de kür edilmeleri

Şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetinin ( $ITS_{yaş}$ ), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine ( $ITS_{kuru}$ ) oranı Formül 16 ile hesaplanmaktadır.

$$ITSR = \frac{ITS_{yaş}}{ITS_{kuru}} \times 100 \quad (16)$$

ITSR	: Dolaylı çekme mukavemeti oranı (%)
ITS <sub>yaş</sub>	: Şartlandırılmış gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kg/cm <sup>2</sup> )
ITS <sub>kuru</sub>	: Şartlandırılmamış gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kg/cm <sup>2</sup> )

Bitümlü sıcak karışımların su etkilerine karşı yeterli dayanımda kabul edilebilmesi için Superpave karışım dizayn metoduna göre ITSR değerinin en az %80 olması istenmektedir. Ancak, orijinal Lottman metodunda bu değer en az %70 olması yeterli görülmektedir. Deneyde %80'den daha düşük ITSR değerine sahip sıcak karışımların su etkilerine karşı yeterli dirence sahip olmadığı kabul edilerek karışımın suya karşı direncinin artırılması istenmektedir. Karışımların su etkilerine karşı direncinin artırılması için genellikle soyulma önleyici katkı maddeleri ilave edilmekte ve katkı kullanılarak modifiye edilen karışımlarda ise ITSR değerinin %85 değerinden az olmaması istenmektedir [1,2,41].

#### 1.6.4.4. Dolaylı Çekme Deneyi

Dolaylı çekme (Indirect Tensile Strength Modulus, ITSM) deneyi, dinamik yükler altındaki bitümlü karışımların esnekliğini tespit etmek amacıyla kullanılan bir deneydir. BSK'nın esneklik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direkt basınç, dolaylı 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, esneklik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır [1,2].

Esneklik modülü, bitümlü kaplamalarda, kaplamanın yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsüdür ve bitümlü kaplamaların en önemli performans özelliği olarak kabul edilir. Ayrıca, trafik etkisiyle kaplamanın altında meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonları da kontrol eder. Tek eksenli yükleme altında elde edilen esneklik modülü, genel olarak maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranı olarak alınır.

BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız ve deformasyon kontrollü bir deney olan ITSM deneyi UMATTA (Universal Material Testing Apparatus) deney aleti kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 31).



Şekil 31. 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 ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye ön yükleme ile belirlenen yükte ve yarı sinüzoidal bir formda 5 darbe uygulanır. Deney sonucunda, numuneye uygulanan dinamik yük ve bu yükün neden olduğu toplam yatay deformasyon ölçülür ve karışım için bir poisson oranı alınarak numunenin esneklik modülü ( $E_m$ ) Formül 17 ile hesaplanır.

$$E_m = \frac{Px(u+0.2734)}{H_y x h} \quad (17)$$

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

Karışımın esneklik modülünü etkileyen en önemli faktörler sıcaklık, yükleme frekansı veya hızı ve karışımın hava boşluğudur. Düşük sıcaklıklar, yüksek yükleme hızı ve yüksek viskoziteli asfalt kullanımı karışımın esneklik modülünü arttırmaktadır.

Esneklik modülü, ayrıca deneyde kullanılan numunenin büyüklüğüne ve poisson oranına göre farklılık gösterdiğinden 100 mm ve 150 mm'lik numunelerin poisson oranları Formül 18 ve 19 ile bulunabilir.

$$v = 3.59 \times \frac{H_y}{V_d} - 0.27 \quad (100 \text{ mm'lik numuneler için}) \quad (18)$$

$$v = 4.09 \times \frac{H_y}{V_d} - 0.27 \quad (150 \text{ mm'lik numuneler için}) \quad (19)$$

$H_y$  : Yatay deformasyon (mm)

$V_d$  : Düşey deformasyon (mm)

Yapılan çalışmalarda, poisson oranı, bitümlü karışımlar için sıcaklığa bağlı olarak, 5°C için 0.25, 25°C için 0.35, 40°C için 0.40 olarak tespit edilmiştir. Ancak, çalışmalarda bitümlü karışımın esneklik modülünün tayininde 0.35 oranının alınması tavsiye edilmektedir.

BS DD213 ve ASTM D4123 standartları ile belirlenen ITSM deneyi numuneye zarar vermeyen tahribatsız bir deney olması nedeniyle, bir numune ile birden fazla deney yapma imkânı vardır. Bu nedenle, numunede kalıcı deformasyonları azaltmak için deneye en düşük sıcaklıklarda, en kısa yükleme süresi ve en düşük yükle başlanmalıdır [1,10,30,75].

#### 1.6.4.5. Nicholson Soyulma Deneyi

Bir asfalt kaplamanın ömrü geniş ölçüde bitüm ile agreganın suyun etkisi karşısında birbirine yapışma kabiliyetine bağlıdır. Soyulma suyun ve trafiğin bir arada etkimesiyle bağlayıcı maddenin agregaya üzerinden ayrılması demektir. Bitüm ve agregaya karışımının soyulamaya karşı direnci Nicholson soyulma deneyi ile belirlenmektedir.

Deneyde kırılmış agregaya numunesinin 9.5-6.3 mm elekler arasında kalan kısmından 200 gr alınarak iyice yıkanır, saf su ile birkaç kez çalkalandıktan sonra 110°C'lik etüvde



kurutulur. Yıkanmış kurumuş malzemedan  $100\pm 0.5$  gr numune beher içinde tartılır ve ısıtılmak üzere 1 saat  $140^{\circ}\text{C}$ - $150^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde bekletilir. Diğer taraftan bitümlü bağlayıcıdan  $5.0\pm 0.1$  gr bir beher içinde tartılır. Bitümlü bağlayıcı içeren beher bir kum banyosuna yerleştirilir ve ısıtılır. Bitümlü bağlayıcı eriyince, agrega bitüm üzerine dökülür ve bir cam bagetle tüm agregaların üzeri bitümle kaplanıncaya kadar karıştırılır. Karışım eşit olarak iki petri kabına boşaltılır ve 10 dk laboratuvar sıcaklığında bekletilir. Daha sonra petri kapları, içerisinde saf su bulunan tepsilere konularak petri kaplarının üzerinde en az 3 cm'lik su filmi oluşması sağlanır. Tepsiler içerisine yerleştirilen petri kapları  $60^{\circ}\text{C}$ 'lik bir etüvde 24 saat bekletilir. Bu sürenin sonunda petri kabı çıkarılır ve suyu değiştirilir, yandan gelen bir ışık altında numuneler göz ile incelenir. Deney sonunda tüm agrega danelerinin soyulmamış yüzeylerinin bütün yüzeye oranı soyulmaya karşı dayanıklılık olarak verilir (Şekil 32) [53,60].



Şekil 32. Nicholson soyulma deneyinin yapılışı

### 1.7. Bitümün ve Bitümlü Karışımların Modifiye Edilmesi

Esnek kaplamaların gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli, daha uzun ömürlü, bakım onarım gereksinimi ve maliyeti açısından da daha ekonomik olması istenir. Esnek kaplamalar, beklenen bu fonksiyonları sağlayabilmek için, kalıcı deformasyonlara, yorulma çatlaklarına, düşük ısı çatlaklarına ve su etkisiyle soyulma ve düşük durabiliteye karşı yeterli direnç göstermelidir. Bu nedenle halen kullanılmakta olan geleneksel bitüm ve karışım özellikleri modifiye edilerek gerek bitümün gerekse karışımın performansı artırılmaya çalışılmaktadır. Bağlayıcı malzemenin ve dolayısıyla karışımın

performansını arttırmak amacıyla yapılan modifikasyon işlemi, modifiye edici katkıların belirli oranlarda ve şartlarda ya doğrudan bitüm içerisine ya da karışım plentinde bitümlü karışım içerisine katılması ile gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde elde edilen bitüme “modifiye bitüm”, bitümlü sıcak karışıma ise “modifiye karışım” denilmektedir [49].

Bitüm modifikasyonunda, modifiye bitüme çeşitli testler uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişim veya iyileşme belirlenmekte ve değerlendirilmesi yapılmaktadır. Ancak bitümün modifiye edilmesi yönteminde modifikasyon için ek ekipmanlar gerekmemekte, hazırlanan modifiye bitümün taşınması ve depolanması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır. Karışım modifikasyonunda ise, katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ek karıştırma ekipmanı gerekmemekte, taşıma ve depolama gibi sorunlarla karşılaşılmamaktadır. Ancak bu durumda da karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin tayin edilmesi ve değerlendirilmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca, bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede ve daha sağlıklı yapılabildiğinden, bağlayıcının modifiye edilmesi yöntemi değerlendirme ve kullanım bakımından ön plana çıkmaktadır [1,53].

Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilmeleri ile genel anlamda, yol kaplamalarının yüksek hava sıcaklıklarında yeterli rijitliğe sahip olarak kalıcı deformasyonlara karşı dirençli olması, düşük hava sıcaklıklarında da yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Ayrıca kaplamanın, yüksek trafik yükleri altında yorulma nedeniyle oluşan çatlaklar ile su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenen düzeyde kayma direncinin elde edilerek sürüş emniyetinin artırılması da amaçlanmaktadır. Genel anlamda bu şekilde ifade edilebilen bitümün modifiye edilme sebepleri maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir [1,50].

- Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde ederek çatlakları azaltmak
- Yüksek sıcaklıklarda daha rijit karışımlar elde ederek tekerlek izlerini azaltmak
- Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek
- Karışımların stabilitesini, mukavemetini ve yorulma direncini artırmak
- Karışımın işlenebilirliğini ve sıkışmasını geliştirmek
- Düşük kaliteli agregaları kullanılabilir hale getirebilmek
- Düşük kaliteli bağlayıcıların verimini artırmak
- Agregası ve bağlayıcı arasındaki adezyon kuvvetini artırarak soyulmayı azaltmak



- Kusmayı ya da terlemeyi azaltmak
- Yaşlanmaya karşı bağlayıcının direncini artırmak
- Daha ince kaplama tabakası yapılmasını mümkün kılmak
- Yansıma çatlaklarını geciktirmek
- Kaplamanın uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak

### **1.7.1. Bitüm Katkı Maddelerinde ve Modifiye Bitümlerde Aranılan Özellikler**

Modifikasyonda kullanılacak katkı maddelerinin ve modifiye bitümlerin uygulamada etkili, uygun ve ekonomik olması bakımından bir takım koşulları sağlaması gerekmektedir [53].

#### a. Bitüm katkı maddelerinde aranılan özellikler

- Kolay elde edilebilmelidir
- Karıştırma sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidir
- Asfaltla homojen olarak karışabilmelidir
- Asfaltın, karıştırma ve serme sıcaklıklarında akışkanlığa karşı direncini artırmalıdır
- Düşük sıcaklıklarda asfaltın çok kırılğan ya da sert olmamasını sağlamalıdır
- Maliyetleri ekonomik olmalıdır

#### b. Katkılı bitümlerde aranılan özellikler

- Depolama, uygulama ve hizmet sırasında sahip oldukları özellikleri korumalı, fiziksel ve kimyasal olarak stabil kalmalıdır
- Uygun ekipmanla işlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdır
- Normal uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilmelidir.

### **1.7.2. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması**

Bitüm katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve bitüm kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 7'de verilmiştir. Son yıllarda modifiye bitüm ve modifiye karışımlar alanında yapılan çalışmalarda, farklı katkı maddeleri ile kıyaslandığında polimerlere olan ilginin arttığı

görülmektedir. Bu nedenle katkı maddeleri sınıflandırılırken polimer olan ve polimer olmayan katkıları şeklinde bir sınıflandırma yapılabilir (Tablo 8) [53].

Tablo 7. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması [53]

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

Tablo 8. Polimer olan ve polimer olmayan katkı maddeleri [53]

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

Yaygın olarak kullanılan bazı modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkisi Tablo 9’da [53] ve günümüz asfalt endüstrisinde yaygın olarak kullanılan doğal ve üretilmiş modifiyer çeşitleri ve bu modifiyerlerin kullanılmasının, üstyapıda oluşan kusurlara karşı muhtemel olumlu etkileri Tablo 10’da verilmiştir [1].

Tablo 9. Yaygın olarak kullanılan bazı modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkisi [53]

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

Tablo 10. Yaygın olarak kullanılan asfalt modifiyerlerin muhtemel olumlu etkileri [1]

Sınıfı	Modifiyer tipi	Bozulmalara etkisi				
		1	2	3	4	5
Fillerler	Siyah karbon	x				x
	Mineral: Sönmüş kireç	x			x	x
	Uçucu kül	x				
	Portland çimentosu	x				
	Kiremit tozu	x				
Ekstenderler (Genleştiriciler)	Sülfür	x	x	x		
	Odun lignini				x	
Polimerler-Elastomerler	Stiren-Butadien di-block (SB)	x		x	x	
	Stiren-Butadien-Stiren (SBS)	x	x	x		
	Stiren-Butadien-Rubber (SBR)	x		x		
	Polychloroprene lateks	x	x			
	Doğal kauçuk	x				
	Acrylonite-Butadien-Stiren (ABS)	x				
Polimerler-Plastomerler	Etilen-Vinil-Asetat (EVA)	x	x			
	Etilen-Propilen-Diene-Monomer (EPDM)	x				
	Etilen-Acrylate (EA)	x				
	Polyisobutylene	x				
	Polietilen (Düşük ve yüksek yoğunluklu)	x		x		
	Polipropilen	x				
Ufalanmış kauçuk	Farklı boyutlar, iyileştirmeler, işlemler	x	x	x		
Oksidanlar	Manganez bileşikleri	x				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			x		
	Naftenik					
	Parafmiks/mum			x		
	Vakum gaz yağı			x		
	Asfaltenler: Yüksek işlem reçineler	x				
	SDA asfaltenler	x				
	Asfaltenler: DEMEX asfaltenler	x				
	Shale oil				x	x
	Tall oil					
	Doğal asfaltlar: Trinidad	x	x	x	x	
Gilsonit	x			x		
Soyulma önleyiciler	Aminler: Amidoaminler				x	
	Poliaminler				x	
	Poliamidler				x	
	Organo-metalikler				x	
Fiberler	Polipropilen	x	x	x		
	Polyester	x				
	Fiberglas					
	Çelik	x	x	x		
	Güçlendiriciler	x	x	x		
	Doğal: Selüloz	x				
	Mineral	x				
Antioksidanlar	Karbamatlar: Kurşun			x		x
	Çinko			x		x
	Siyah karbon	x				x
	Kalsiyum tuzlar					x
	Fenoller					x
	Aminler				x	x

1. Kalcı deformasyon, 2. Yorulma çatlağı, 3. Düşük ısı çatlağı, 4. Nem hasarı, 5. Yaşlanma

### 1.8. Bitkisel Atıklardan Aktif Karbon ve Furfural Üretimi

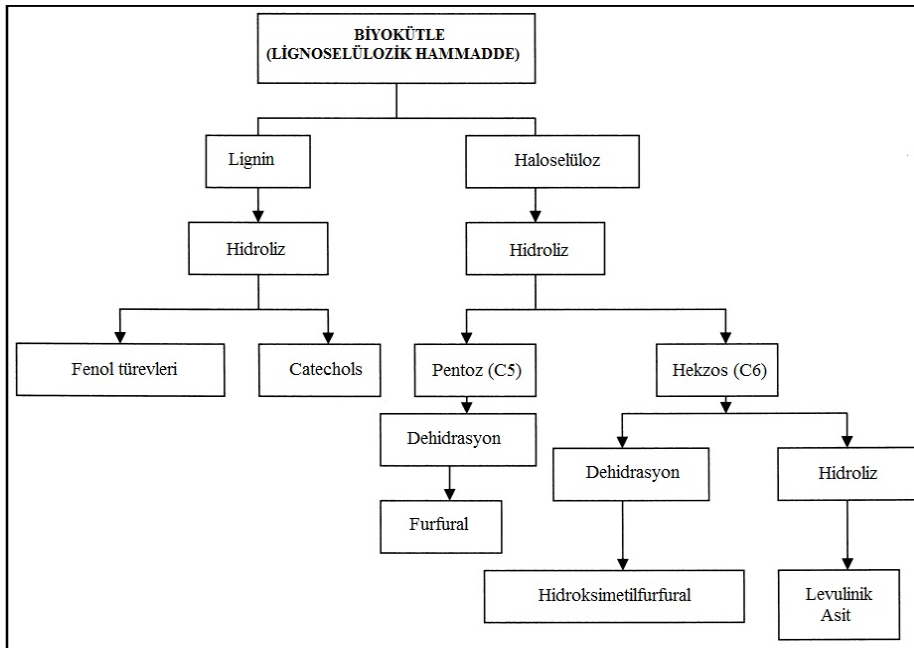
Bir tarım ülkesi olan ülkemiz, pamuk sapı, buğday samanı, pirinç kabuğu, mısır koçanı, mısır sapı, fındık kabuğu, pirina, meşe palamudu küspesi, ayçiçeği kabuğu gibi tarımsal atıklar yönünden çok zengindir. Bu atıkların bazıları hayvan yemi olarak kullanılmakta, ancak büyük çoğunluğu yakıt olarak tüketilmekte ya da çürümeye terk edilmektedir. Bu atıklardan selüloz eldesinin yanı sıra, iki yolla değerli organik kimyasallar da elde edilebilir. İlk yol, tarımsal atıkların hidrolizi ve dehidrasyonu ile furfural, asetik asit, formik asit, aseton ve metanol elde edip, işlem sonunda tarımsal atığı kurutarak tekrar yakıt olarak kullanılmasını sağlamaktır. İkinci yol ise, tarımsal atıkların pirolizi ile asetik asit, metanol, etanol, katı yakıt olarak kömür ve gaz yakıt olarak karbonmonoksit, hidrojen ve metan karışımı eldesidir. Bu iki yöntem dışında tarımsal atıklardan aktif karbon da elde edilebilir [34].

Bitkisel atık malzemeler kimyasal içerik olarak yaklaşık %90-99 oranında, üç doğal polimerden; selüloz, lignin ve hemiselülozlardan oluşmaktadır. Ayrıca, içeriklerinde daha az oranda olmak üzere (%1-10) inorganik (kül) ve organik bazı renk, koku vb sağlayıcı ekstraktif maddeler de bulunmaktadır. Bu içerikten ligninin ayrılması durumunda geriye polisakkarit (kompleks şeker) türevleri kalır. Bitki hücresindeki polisakkaritlere haloselüloz ismi verilmektedir. Haloselüloz hidroliz edilirse altı karbonlu hekzos ( $C_6$ ) ve beş karbonlu pentoz ( $C_5$ ) şekerleri ile üronik asitler ve asetil gruplar elde edilir.  $C_6$  şekerleri glikoz, mannoz ve galaktozdur.  $C_5$  şekerleri ise ksiloz ve arabinozdur. Bu bileşenlerin oranları bitkisel kaynağa göre değişmektedir [34]. Selüloz doğada, çeşitli nişasta, pektin ve hemiselüloz gibi polisakkaritlere bağlı olarak bulunur. Hemiselülozlar ise galaktoz, mannoz, ksiloz, arabinoz ve diğer şekerlerle, üronik asitlerin polimerleri ve heteropolimerlerini içerirler. Bunlara ek olarak, doğadaki hemen hemen her selüloz, selüloz-lignin karışımı halinde bulunur. Lignin karmaşık yapıda, üç boyutlu, fenolik bir polimer olup lignoselülozik maddelerde selüloz lifleri arasında bağlayıcılık görevi yapar ve daha çok yakıt amaçlı kullanılır [34,76]. Yaygın lignoselülozik maddelerin selüloz, hemiselüloz ve lignin içerikleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Yaygın lignoselülozik maddelerin selüloz, hemiselüloz ve lignin içerikleri [76]

Lignoselülozik Madde	Selüloz (%)	Hemiselüloz (%)	Lignin (%)
Fındık kabuğu	25-30	25-30	30-40
Mısır koçanı	45	35	15
Çim	25-40	35-50	10-30
Buğday sapı	30	50	15
Yaprak	15-20	80-85	0
Pamuk püskülü	80-95	5-20	18-30
Kozalaklı ağaçlar	40-50	20-30	25-35
Yapraklarını döken ağaçlar	40-50	30-40	15-20
Şeker kamışı	40	30	20

Bitkisel atıkların havasız veya inert ortamda ısıl bozundurmaya uğramaları sonucunda karbon içeriği yüksek katı, sıvı ve gaz ürünler elde edilmektedir. Karbonizasyonun ana ürünü “char” olarak adlandırılan karbon içeriği yüksek katıdır. Bu ürün doğrudan yakıt olarak değerlendirilebildiği gibi bakır, pirinç, çelik, nikel vb üretiminde metalurjik olarak veya aktif karbon, karbon siyahı, karbondisülfür, kalsiyum karbür, ilaç, pastel boya vb kimyasalların üretiminde endüstriyel olarak değerlendirilmektedir [77]. Bitkisel atıkların asidik hidrolizleri sonucu C<sub>6</sub> ve C<sub>5</sub> şekerleri elde edilmekte ve bu şekerlerin dehidrasyonu sonucu furfural, etanol, metanol vb. organik kimyasallar da elde edilmektedir (Şekil 33) [78,79].



Şekil 33. Bitkisel hammadeden kimyasal ürün elde edilmesi

### 1.8.1. Aktif Karbon Üretimi, Özellikleri ve Karakterizasyonu

Aktif karbon, karbonun mikrokristal yapıda ve grafit olmayan bir formudur. X-ışını analizleri aktif karbonun kristal yapısının, altıgen olarak bağlanmış karbon atomlarını içeren mikrokristallerden oluşmuş düzlemlerden ibaret olduğunu göstermiştir. Aktif karbondaki mikrokristal düzlemler grafitteki gibi düzenli olmayıp gelişigüzel yönelmiştir, bu düzensiz yapı sebebiyle oluşan boşluklar absorpsiyon yeteneğinde büyük öneme sahip gözenekleri meydana getirmektedir. Gözeneklerin varlığı ve gözenek boyutları aktif karbona geniş bir yüzey alanı sağlamaktadır [35,36,80].

Bir katının yüzeyine maksimum ölçüde madde absorblanabilmesi için katının maksimum gözenekliliğe sahip olması gerekmektedir. Aktif karbon da çok fazla gözenek içeren absorbentlerin başında gelmektedir. Aktif karbonda bulunan gözenekler mikro, mezo ve makro gözenek olarak üçe ayrılır. Bu gözeneklerin dağılımı ve toplam gözenek hacmi büyük ölçüde aktif karbonun hazırlanması sırasında uygulanan karbonizasyon ve aktivasyon şartlarına bağlıdır [35].

Üretilen aktif karbonun kalitesi kullanılan hammaddeye bağlı olarak değişkenlik gösterir. Aktif karbon yüzey oksitlerinin oluşumu ve yüzey alanı, aktivasyon prosedürü ile alakalı olsa da gözeneklerin yapısı ve gözenek dağılımı (mikro, mezo, makro) kullanılan hammadde ile ilişkilidir. Aktif karbon üretiminde ucuz, kolay erişilebilir, karbon içeriği yüksek ve kül içeriği düşük her türlü hammadde kullanılabilir. Bu amaçla kullanılacak pek çok hammadde olmakla birlikte özellikle odun (ağaç, ağaç kabuğu gibi), turba, kömür, bitümlü kömür, linyit, hindistan cevizi kabuğu, badem kabuğu, fındık kabuğu, şeftali çekirdeği gibi tarımsal veya petrol tabanlı hammaddeler kullanılabilir.

Aktif karbon üretimi hammadde içerisindeki uçucu maddelerin uzaklaştırılmasına dayandığından hammadde seçiminde ürünün ucuz ve kolay temin edilebilirliği ile uçucu madde içeriğinin düşük olması önemli tercih sebepleridir [35,36,80-82].

Yüksek karbon içeriğine sahip hammaddelerden, aktif karbon elde edebilmek için hammadde içerisinde bulunan karbon dışı safsızlıkların uzaklaştırılması gerekir. Başlangıç maddeleri havasız (inert) ortamda karbonize edilirse H,N,O,S gibi elementlerin büyük bir kısmı hammaddeden ayrılır. Karbonizasyon işleminde ilk olarak düşük molekül ağırlıklı uçucu bileşikler, ardından aromatikler hammaddeden uzaklaştırılarak yüksek gözenekli bir karbonizasyon ürünü elde edilir. Ancak karbonizasyon sırasında oluşan katran gözeneklere dolarak aktif karbonun etkin yüzey alanını azaltır. Bu durumu önleyebilmek için

aktifleştirme işlemi uygulanır. Aktifleştirme işlemi fiziksel veya kimyasal aktifleştirme olarak iki şekilde gerçekleştirilebilir [35].

a. Fiziksel aktivasyon: Isısal aktivasyon da denilen fiziksel aktivasyon işleminde ilk adım hammaddenin karbonizasyonudur. Karbonizasyon genellikle 700 °C'yi geçmeyen sıcaklıklarda ve havasız ortamda gerçekleştirilir. Karbonizasyon sırasında hammaddede bozunmalar 170 °C'de başlar ve yaklaşık 500-600 °C'de tamamlanır. Karbonize edilen hammadde daha yüksek sıcaklıklarda (800-1100 °C) çeşitli gazlarla aktifleştirilerek, yüksek yüzey alanına sahip, gözenekli aktif karbona dönüştürülür. Aktifleştirme işleminde aktifleştirici olarak CO<sub>2</sub>, su buharı veya hava kullanılmaktadır. Bu aktifleştiricilerden en çok kullanılanı su buharıdır. Su buharı ile gerçekleştirilen aktifleştirme işlemlerinde karbon-buhar reaksiyonları meydana gelerek karbon oksitleri ve hidrojen gazı açığa çıkar. Yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen bu yöntemle karbonizasyona tabi tutulan üründe oluşan gözenekler sayesinde geniş yüzey alanı oluşur [35,36].

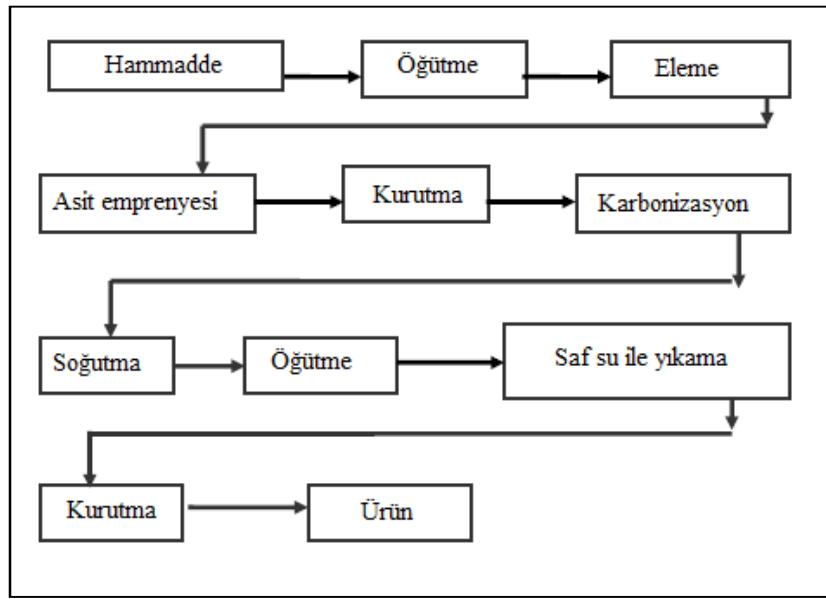
b. Kimyasal aktivasyon: Kimyasal aktivasyon işleminde hammadde karbonizasyon öncesinde kimyasal bir ajan ile doyurulur ve ardından karbonize edilir. Karbonizasyon sonucunda düzenli yapıda ve karbon içeriği yüksek bir ürün elde edilir. Kimyasal aktivasyon yönteminde ısısal işlem (karbonizasyon/piroliz) sonrasında kimyasal ajan, yıkanarak oluşan katı üründen uzaklaştırılır ve bu işlem sonucunda porozite özelliği önemli ölçüde gelişir. Literatürde kimyasal aktivasyon işleminde kullanılan çeşitli kimyasal ajanlar belirtilmiştir, bunlar arasında en çok kullanılan kimyasal ajanlar fosforik asit (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), çinko klorür (ZnCl<sub>2</sub>), potasyum hidroksit (KOH) ve sülfirik asittir (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Lignoselülozik yapıların karbonizasyonu sırasında yapıda büzülme meydana gelmektedir. Karbonizasyon sırasında meydana gelen bu boyut değişimi kimyasal aktivasyon işleminde daha büyük önem kazanmaktadır. Çünkü aktivasyon maddesi yapıların içerisine nüfuz ederek artan sıcaklıkla birlikte beklenen büzüşmenin olmasını engeller. Yani aktivasyon maddesi mikrogözeneklilik oluşumu sırasında bir kalıp gibi davranış gösterir.

Kimyasal aktivasyon işleminde oldukça düşük işlem sıcaklığının bir sonucu olarak grafitik bazal yüzeyler bulunmaz. Onun yerine her tanecik, kısmen aromatik, kısmen alifatik organik molekül yada neredeyse sonsuz sayıda farklı monomerlerden oluşan çapraz bağlı polimerler olarak bulunabilir. Böylece mikro gözeneklerdeki duvarlar bile düzgün olmayıp pürüzlü bir durum gösterir ve çok miktarda farklı cinsten atomlar (en çok oksijen) içerir.



Kimyasal aktivasyonun fiziksel aktivasyona göre en önemli avantajları işlemin düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi ve fiziksel aktivasyona göre daha kısa sürmesidir. Ek olarak kimyasal aktivasyon yönteminde daha yüksek iç yüzey alanına sahip ürün elde edilmektedir. Kimyasal aktivasyonun fiziksel aktivasyona göre zayıf tarafları ise aktivasyon sonucu oluşan üründe kimyasal ajana bağlı safsızlıklar oluşması ve bunu gidermek için ürünün işlem sonrası önemli bir yıkama prosedürü gerektirmesidir [35,36,80]. Kimyasal aktivasyon ile aktif karbon üretim adımları Şekil 34'te verilmiştir.



Şekil 34. Kimyasal aktivasyon ile aktif karbon üretimi

Aktif karbonlar kullanım şekillerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [80]:

- i. Toz aktif karbon : 0.18 mm'den daha küçük boyutlarda öğütülmüş aktif karbonlardır. Başlıca sıvı faz uygulamalarında ve baca gazı arıtımında kullanılır.
- ii. Granüler aktif karbon : 0.2-5 mm arasındaki boyutlarda düzensiz partiküllerdir. Sıvı ve gaz faz uygulamalarında kullanılır.
- iii. Pellet aktif karbon : Basınçla sıkıştırılmış ve 0.8-5 mm çapında silindirik yapıdadır. Başlıca gaz faz uygulamalarında kullanılır.
- iv. Emprenye aktif karbon : İyot, gümüş, alüminyum, magnezyum, çinko, demir, lityum, kalsiyum, ketonlar ve tersiyer aminler kullanılarak hazırlanan aktif karbonlardır.

- v. Karbon moleküler elek : Aktif karbon düzgün ve dar bir mikro gözenek yapısında üretildiğinde karbon moleküler elek elde edilmektedir. En yaygın kullanım alanı ayırma işlemleridir. Özellikle havadaki oksijen ve azot gazının ayrılmasında kullanılır.
- vi. Aktif karbon lifleri : Fenolik reçine, poliakrilik reçine, viskon, rayon gibi sentetik liflerin yüksek sıcaklık ve inert atmosferde karbonizasyonu ve ardından hassas aktivasyonu ile elde edilen aktif karbonlardır.

Aktif karbon oksijen ve hidrojenle kimyasal bağ yapmış elementleri içermektedir. Aktif karbonun absorpsiyon kapasitesi sadece gözenek yapısına bağlı olmayıp, kimyasal yapısı ve yüzey özellikleri ile de yakından ilişkilidir. Düzenli bir karbon yüzeyindeki absorpsiyon yeteneğinin önemli bir bileşeni Van Der Waals kuvvetleridir.

Aktif karbonun yapısındaki grafit kristallerinin kenar bölgelerinde, oksijen içerikli doymamış karbon grupları vardır. Bu gruplar hem önemli reaksiyon merkezleri olarak görev yapmakta hem de aktif karbona polar özellikler kazandırmaktadır. Bu yüzey oksitleri arasında en sık rastlananlar; karboksil grupları, fenolik gruplar, lakton halkaları, kinon türünden yapılar, siklik peroksitler ve karboksilik asit anhidritleridir. Yüzey fonksiyonel grupların, aktif karbonun asitleri ve bazları çekme kabiliyetine, sıvı ve gazlardaki organik maddeleri tutabilmesine ve özellikle sıvı çözeltilerden ağır metalleri uzaklaştırabilmesine önemli etkileri vardır. Yüzey fonksiyonel gruplar, titrasyon, nötralizasyon, metilasyon ve çeşitli spektrometrik yöntemler ile belirlenmektedir [35,36,80].

#### **1.8.1.1. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)**

Kızılötesi spektroskopisi kömür, aktif karbon, karbon siyahı gibi malzemelerin kimyasal yapısının belirlenmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Kızılötesi (IR) absorpsiyon spektroskopisi bir tür titreşim spektroskopisidir. IR ışınları molekülün titreşim hareketleri tarafından absorbe edilmekte veya yansıtılmaktadır (transmittance). Böylece moleküle ait bir nevi parmak izi tespiti yapılır. Matematiksel Fourier dönüşümü spektroskopisinde ışın şiddeti, zamanın bir fonksiyonu olarak alınır. Her dalga boyunu ayrı ayrı tarama gereksizdir hızlı ve yüksek çözünürlükte spektrumlar elde edilebilir. Bu yöntem ile, moleküler bağ karakterizasyonu yapılarak; katı, sıvı, gaz veya çözelti halindeki organik bileşiklerin yapısındaki fonksiyonel gruplar, iki bileşiğin aynı olup olmadığı, yapıdaki bağların durumu, bağlanma yerleri ve yapının aromatik yada alifatik olup olmadığı belirlenebilir [80,83,84].

### 1.8.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM)

Taramalı elektron mikroskobu yöntemi maddelerin yüzey dokularının belirlenmesinde ve yüzeye ait pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Vakum ortamında yapılan analiz ile malzemeye ait yüzey dokusu fotoğrafları çeşitli büyüklüklerde elde edilir [80].

### 1.8.2. Furfural Üretimi

Furfural, kimyasal formülü  $C_5H_4O_2$  olan renksiz bir sıvı aldehit olup, furan ve önemli furan türevleri, furfural alkol, tetrahidrofuran üretiminde kullanılır. Furfural ve diğer furan türevleri, birçok endüstriyel uygulamada çözücü olarak kullanılmaktadır. Özel bir çözücü olan furfural, reaktif çözücü olarak reçine formülasyonlarında düşük viskozite sağlar. Furfural içeren termoset reçineler korozyona karşı direnç, yüksek karbon verimi, yüksek sıcaklıkta kararlılık, düşük yangın tehlikesi ve mükemmel fiziksel dayanıklılık gibi özellikler gösterirler. Bu özelliklerin dökümhanelerde kullanımının, fiberglas kompozitleri, çimento, plastik yalıtım köpükleri, refrakter karışımları, yüksek karbon kompozitleri ve parçacık bağlayıcıları gibi birçok endüstriyel uygulamada önemi vardır. Furfural; furfural alkol, tetrahidrofurfural alkol, furan, tetrahidrofuran, poli(oksitetrametilen) glikol ve çok çeşitli yapay reçinenin hammaddesi olabilir. Furfuralın seçici çözücü olarak kullanıldığı uygulamalara, petrol rafinasyonlarında gaz yağı ve dizel yakıtlar için doymuş hidrokarbonların doymamış hidrokarbonlardan ayrılması, yapay-kauçuk yapımı için bütadien ve diğer C4 hidrokarbonlarının özütlemeli damıtılması ve açık renkli odun rozinlerinin eldesi örnek olarak verilebilir. Ayrıca antrasinin rafinasyonunda, zımpara taşı yapımında, karbon lif üretiminde kullanılır. Furfural üre, formaldehit, fenol gibi maddelerle kondensasyon tepkimeleri ile çapraz bağlı reçine oluşturur ve literatürde bu reçinelerin birçok uygulamaları mevcuttur [33,34,79,85-87].

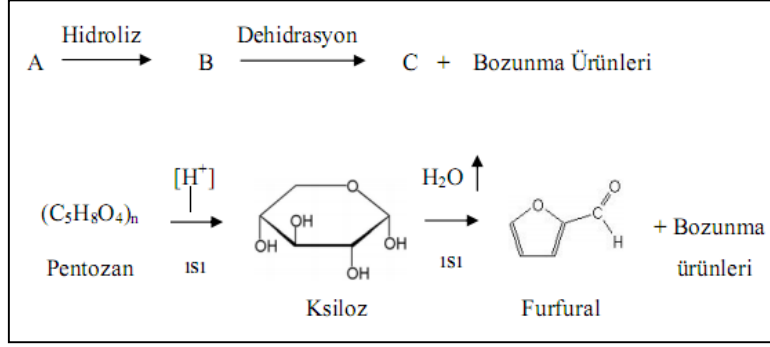
Kimya sanayinde furfural üretimi için uygun bir yapay üretim yolu yoktur. Bu sebeple pentozan içeriğince zengin bitki kalıntılarından üretimi uygundur. Ancak ticari süreçlerde verim, hammaddede bulunan pentozan içeriğinin yaklaşık üçte birine eşdeğer olduğundan, genellikle bu sürecin ekonomik olması için hammaddedeki pentozan yüzdesinin en az %18-20 olması gerekmektedir. Furfural üretiminde hammadde olarak hemiselüloz ve glikuronik asit içeren yıllık bitki atıkları kullanılmaktadır. En yaygın olarak

kullanılanlar fındık kabuğu, şeker kamışı atığı, mısır koçanı, pamuk çekirdeği kabuğu, yulaf kabuğu, pirina küspesi ve ayçiçeği tohum kabuğudur. Sanayide kullanılan süreçlerde değişik hammaddelerin ortalama pentozan içerikleri ve furfural verimleri Tablo 12’de verilmektedir [34,79,86,87].

Tablo 12. Bazı hammaddelerin furfural verimleri [34,79,86,87]

Hammadde	% Pentozan (Kuru bazda)	Sanayi süreçlerinde % furfural verimi
Mısır koçanı	30-40	10
Fındık kabuğu	25-30	8
Pamuk çekirdeği kabuğu	27	8-9
Ayçiçeği tohum kabuğu	28-30	8-9
Sert odunlar	21-24	6-8
Şeker pancarı küspesi	25-27	8-9
Pirinç kabuğu	16-18	6
Pirina	14-16	7

Pentozan içeren hammaddelerden furfural üretilmesi iki basamakta gerçekleşir. İlk basamak asit veya enzim katalizli hidrolizden oluşmakta ve pentoz zinciri yüksek sıcaklıkta, sulu ortamda monomerik pentozlarına hidrolizlenmektedir. İkinci basamakta daha yüksek sıcaklıkta pentozlardan bir su ayrılarak furfurala dönüşür (Şekil 35). İlk basamak hızlı ve yüksek verimliyen, dehidrasyon basamağı sırasında ksilozun halkalaşmasıyla, oluşan furfuralın bir kısmının bozunması ve kondensasyon yan tepkimeleri ile üretim veriminde düşmeler gerçekleşir. Furfuralın oluşumu süresince gerçekleşebilecek bozunma tepkimelerini önlemek için furfural, üretildiği sıvı tepkime ortamından uzaklaştırılmalıdır. Furfuralın ksiloz ve sülfürik asit sulu çözeltilerinden yüksek sıcaklıklarda özütlenbilmesi için değişik çözücüler üzerinde yapılan çalışmalar bu aşamada kullanılabilecek en kararlı çözücününün o-nitrotoluen olduğunu göstermiştir [33,34,79,87].



Şekil 35. Furfural üretimi

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada Karayolları 16.Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır, orjinal bitüme ait özellikler Tablo 13'te verilmiştir. Bitüm modifikasyonu amacıyla fındık kabuğu atıklarından laboratuvar ortamında elde edilen aktif karbon ( $C_A$ ) ve Manisa Çukurova Kimya Endüstrisi A.Ş'den temin edilen furan reçinesi kullanılmıştır. Furan reçinesine ait özellikler Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 13. Orjinal bitüme ait özellikler

Test	Standart	B 50/70
Özgül ağırlık, $g/cm^3$	ASTM D70-76	1.039
Parlama noktası, °C	ASTM 92-78	250
Penetrasyon (100g, 5s, 25°C), 0.1mm	ASTM D5-73	57
Düktilite (25°C, 5cm/dk), cm	ASTM D113-79	100+
İnce film halinde ısıtma deneyi sonrası		
Kalıcı penetrasyon (%)	ASTM D5-73	58
Düktilite (25°C, 5cm/dk), cm	ASTM D113-79	100+
Yumuşama Noktası, °C	ASTM D36-76	48

Tablo 14. Furan reçinesine ait özellikler

Ürün Adı: CS-1077 Döküm Reçinesi	
Serbest Formaldehit (%)	0.24
pH	7.40
Viskozite (sn)	7
Katı Madde (%)	13
Ürün Adı: CS-30 Döküm Reçinesi Katalizörü	
Yoğunluk ( $g/cm^3$ )	1.22
Toplam Asit (%)	70.60

### 2.1. Fındık Kabuklarından Aktif Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu

Çalışmada Giresun bölgesinden temin edilen fındık kabukları lignoselülozik hammadde olarak kullanılmıştır. Fındık kabukları ilk olarak uygun olmayan numunelerin deney setinden uzaklaştırılması amacıyla 5/16" (7.94 mm) elekten elenmiştir. Elemanın ardından 1-2 mm [35,36,38,88] arasında öğütülen fındık kabukları (Şekil 36), nem içeriğini

uzaklaştırmak üzere 105°C (378 °K) etüvde bir gün süreyle muhafaza edilmiş ve numuneye ait nem içeriği %6 olarak bulunmuştur.



Şekil 36. 1-2 mm arasında öğütülmüş fındık kabukları

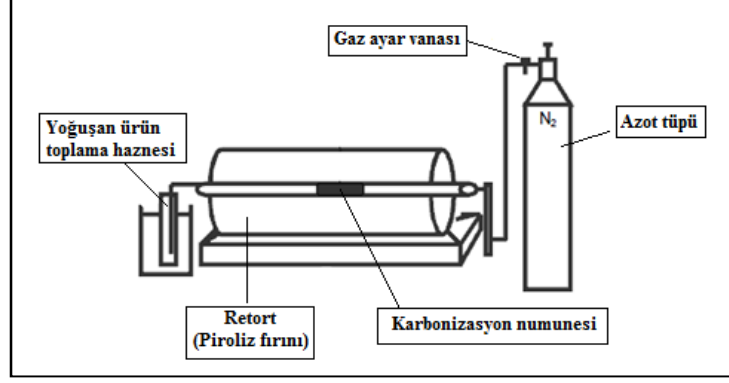
Kimyasal aktivasyon yöntemi ile aktif karbon üretiminin ilk basamağı olan asit ile doyurma aşaması için sıvı/katı oranı 4ml/gr olarak alınmıştır [16,35]. Kuru bazda 2.5 gr olarak tartılan fındık kabukları üzerine derişimleri Tablo 15’te verilen 10 ml sülfirik asit çözeltileri eklenerek 85°C’de (358 °K) 7 saat [35,80,89] doyurma işlemi uygulanmıştır.

Tablo 15. Asit derişimleri

<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: %95 ağırlıkça, d:1.84</b>				
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>Numune Kodu</b>	<b>Kullanılan derişim (gr/100ml)</b>	<b>10 ml. çözeltide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (gr)</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hacmi (ml) (C/1,75)</b>	<b>Kullanılan saf su hacmi (ml) (10-D)</b>
C <sub>A</sub> 1	5	0.5	0.3	9.7
C <sub>A</sub> 2	10	1	0.6	9.4
C <sub>A</sub> 3	30	3	1.7	8.3
C <sub>A</sub> 4	40	4	2.3	7.7
C <sub>A</sub> 5	50	5	2.9	7.1

Doyurma işlemini takiben numuneler 110°C’de (383°K) 12 saat kurutulmuştur. Bu aşamada oluşan buharlaşma ile asidin numune iç kanallarına daha etkin nüfuz etmesi sağlanmıştır [38,80,88]. Kurutulan numuneler 450°C (723°K) sıcaklıkta karbonize edilmiştir. Karbonizasyon ortamının inert hale getirilmesi için karbonizasyon işleminden önce retorttan 15 dk boyunca azot gazı geçirilmiştir. Karbonizasyon aşamasında ısıtma hızı

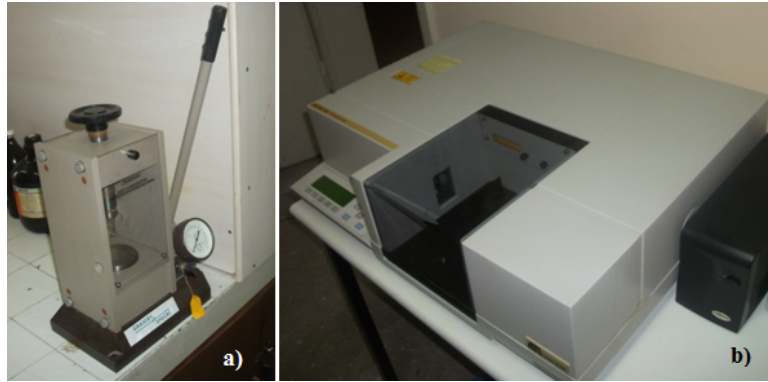
12.5°C/dk (20 °K/dk) olarak belirlenmiş ve maksimum sıcaklıkta bekleme süresi 2 saat olarak alınmıştır [35,36,38,88]. Karbonizasyon için kullanılan deney düzeneği Şekil 37’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 37. Karbonizasyon deney düzeneği

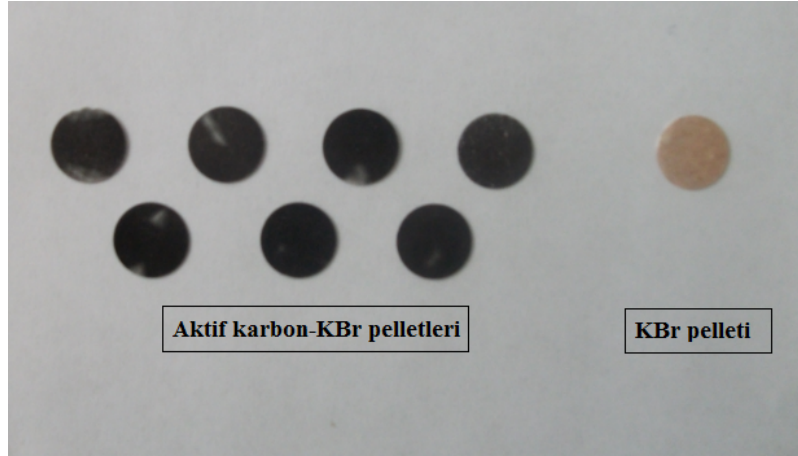
Karbonizasyon işlemi sonrasında soğutulan numuneler asit fazlasının uzaklaştırılması amacıyla 85°C’de saf su ile pH’ı 7.0 olana kadar yıkanmış ve ardından 105°C’de 12 saat süreyle kurularak karakterizasyon işlemine hazır hale getirilmiştir [35,80,90].

Üretilen aktif karbonların karakterizasyonu için FTIR ve TEM analizleri yapılmıştır. FTIR analizinde, toz haline getirilmiş numuneler ile KBr pelletleri hazırlanmış ve her ölçümden önce saf KBr pelleti ile background çekimleri yapılmıştır (Şekil 38,39) [38,80].



Şekil 38. FTIR analizinde kullanılan pelletleme cihazı (a) ve FTIR spektrometresi (b)





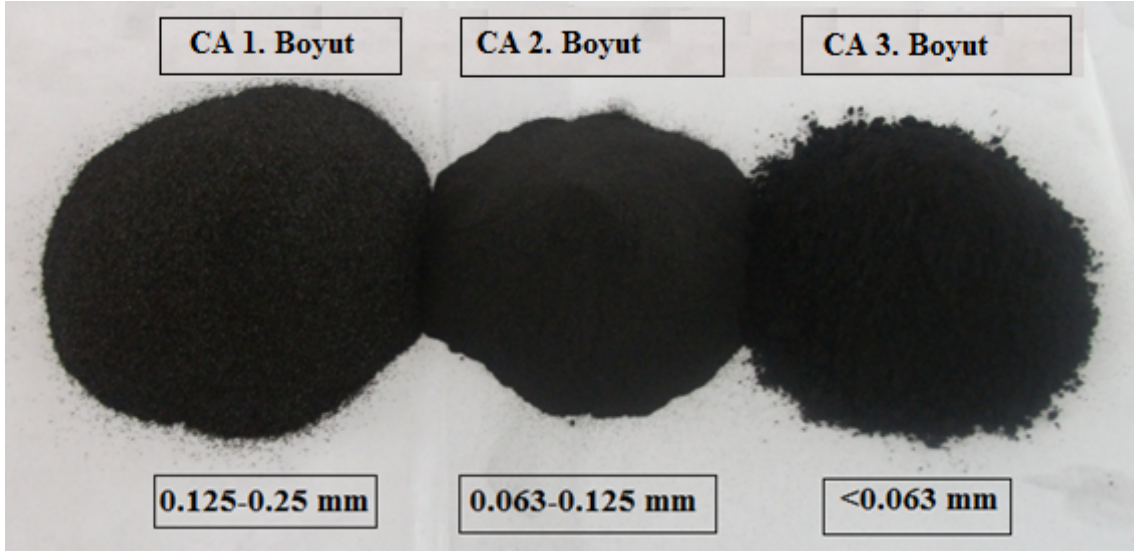
Şekil 39. KBr ile hazırlanmış  $C_A$  pelletleri

FTIR analizinde, asit ile doyurulan numuneler dışında bir adet işlem görmemiş fındık kabuğu ve bir adet asit ile muamele edilmeksizin karbonize edilen fındık kabuğu örnekleri de kıyaslama amacıyla kullanılmıştır. Bu iki numuneye ait numune kodları ise sırasıyla TFK (toz fındık kabuğu) ve  $C_A 0$  olarak belirlenmiştir.

Aktif karbon numunelerin yüzey dokusunu incelemek amacıyla TEM analizi yapılmıştır. Bu amaçla karbon bantlar üzerine her bir derişimdeki  $C_A$  numunelerden birkaç adet yapıştırılarak TEM numune bölmesine yerleştirilmiştir, numuneler yüksek vakum modunda vakumlanmış ve TEM fotoğrafları elde edilmiştir.

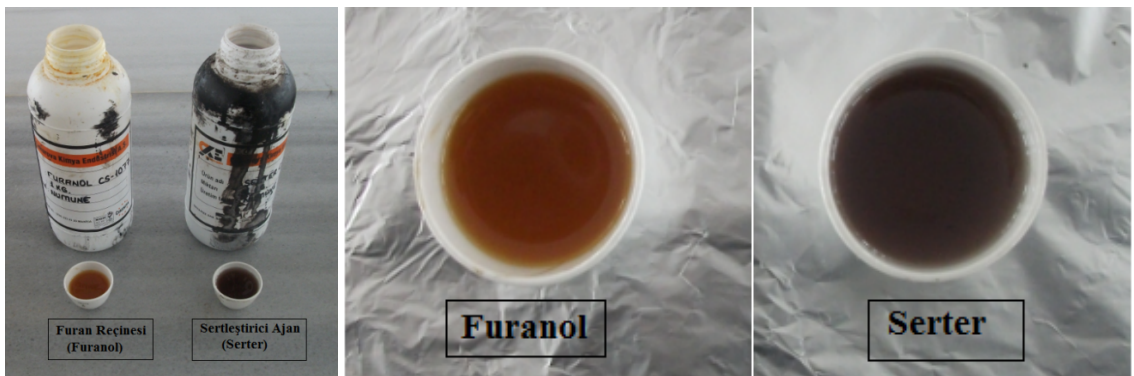
## 2.2. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması

Modifiye bağlayıcıların elde edilmesi amacıyla, orjinal bağlayıcı çelik bir kap içerisinde  $150^{\circ}\text{C}$ 'ye ( $423^{\circ}\text{K}$ ) kadar ısıtılmış ve akışkan hale getirilmiştir.  $C_A$  modifikasyonunda modifiyer malzemeler, topaklanma olmaması için orjinal bağlayıcı içerisine kademeli olarak katılmış ve tüm modifiyer eklendikten sonra 45 dk süreyle karıştırma işlemi uygulanmıştır. Modifiyer malzemenin boyut ve katılma yüzdelerinin modifikasyona etkilerini değerlendirmek amacıyla  $C_A$  numuneler 3 farklı boyutta elenmiş ve bitüm ağırlığına oranla %1-25 arasında çeşitli oranlarda ana bağlayıcıya katılmıştır (Şekil 40) [16,17,91].



Şekil 40. Üç farklı boyutta elenmiş  $C_A$  numuneleri

Furan reçinesi ile yapılan bitüm modifikasyonunda (Şekil 41), reçine ana bağlayıcı içerisine bitüm ağırlığına oranla %2-6 arasında değişen oranlarda katılmıştır. Reçinenin ısıtılmış bağlayıcı içerisine katılması sırasında, meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sebebiyle modifiye bağlayıcının karıştırma kabından taşmasını engellemek amacıyla reçine bitüm içerisine kademeli olarak eklenmiştir. Reçinenin orjinal bağlayıcıya eklenmesinden sonra 5 dk karıştırma işlemi uygulanmış ve reçinenin sertleşmesini sağlayan sertleştirici ajan (serter), üretici firmadan alınan kullanma talimatına göre reçine ağırlığının %30'u oranında ve kademeli olarak bağlayıcıya eklenmiştir. Sertleştirici ajanın tamamının karışıma eklenmesinden sonra 45 dk karıştırma süresi uygulanarak modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir [12,50].



Şekil 41. Furan reçinesi ve sertleştiricisi

$C_A$ 'nın bitüm ile karışması sırasında kimyasal bir reaksiyon gösterip göstermediğini tespit etmek amacıyla  $C_A$ , hazırlanan karışımdan bir filtre kâğıdı yardımıyla süzülmüş, süzüntü  $C_A$  etilen ile yıkanarak üzerindeki bitüm uzaklaştırılmıştır. Etilen muamelesinden sonra saf su ile yıkanan  $C_A$  105°C'de kurutulmuştur (Şekil 42).  $C_A$ 'nın bağ yapısında oluşan değişimleri gözlemlemek amacıyla FTIR analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar orijinal (bitüm ile karıştırılmamış)  $C_A$ 'nın FTIR sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 42.  $C_A$ 'nın modifiye karışım içinden süzülmesi ve kurutulması

### 2.3. Orijinal ve Modifiye Bitüm Özelliklerinin Belirlenmesi

Orijinal ve modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılara ait klasik özelliklerin belirlenmesi amacıyla, penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve parlama noktası deneyleri uygulanmıştır. Bitümlü bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetleri, penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerine bağlı olarak hesaplanan Penetrasyon İndeksi ile belirlenmiştir.

Orijinal ve modifiye edilmiş bağlayıcılara ait kısa dönem yaşlanma karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla TFOT deneyi uygulanmıştır. Yaşlandırma işlemi sonrasında bağlayıcılara penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanarak yaşlanma sonrası özellikleri tespit edilmiştir [50,53,64].

Bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını tespit etmek amacıyla DSR deneyi uygulanmış ve bağlayıcılara ait kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) ve faz açısı ( $\delta$ ) değerleri elde edilmiştir. DSR deneyi Bohlin DSR II aleti kullanılarak yapılmıştır. Deney gerilme kontrollü olarak yapılmış olup bağlayıcılara 120 Pa sabit gerilme uygulanmıştır. Deneyde 25 mm çapında paralel plaklar ve 1000 mikron numune kalınlığı kullanılmıştır. Bütün bağlayıcılar 58–76°C (331–349°K) sıcaklık aralığında 6°C

artıyla tekerlek izi dayanım parametresi ( $G^*/\sin\delta$ , Pa) şartname limiti altına düşene kadar deneye tabi tutulmuştur. Deneyde ortam şartlarını yansıtmaya amacıyla ön koşullandırma yapılmış ve daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmıştır [3,61,62].

Orijinal ve modifiye bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla RV deneyi uygulanmıştır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak Brookfield Viskozimetresi kullanılmıştır.

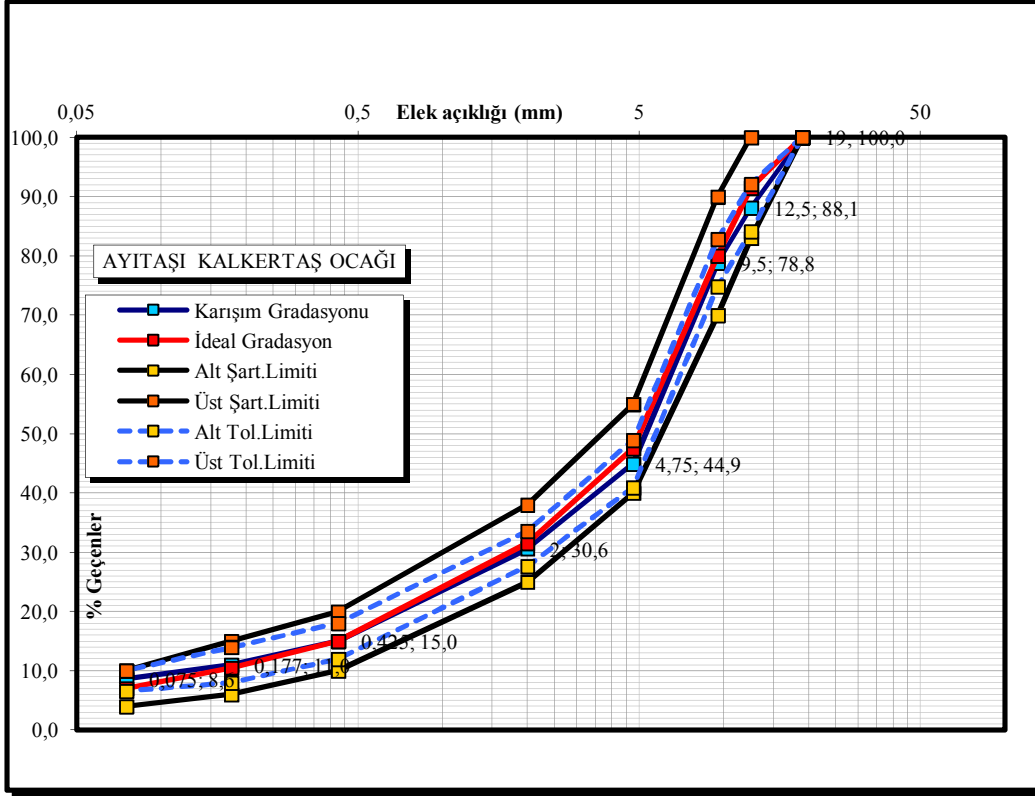
#### 2.4. Modifiye Edilmiş Bağlayıcılar ile Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması

Çalışmada Sivas Ayıtaşı kalker taş ocağından elde edilen agregaya kullanılmış ve kullanılan agregaya ait özellikler Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16. Kalker agregaya özellikleri

Özellikler	Standart	Kaba Agregaya	İnce Agregaya	Filler
Aşınma kaybı (%) (Los Angeles)	ASTM C131	25.2		
Donma kaybı (%) ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	ASTM C88	0.64		
Özgül ağırlık ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	ASTM C127			
Hacim özgül ağırlık		2.70		
Zahiri özgül ağırlık		2.72		
Özgül ağırlık ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	ASTM C128			
Hacim özgül ağırlık			2.70	
Zahiri özgül ağırlık			2.74	
Özgül ağırlık ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	ASTM D854			
Zahiri özgül ağırlık				2.75
Su emme (%)	ASTM C127	0.40		
Yassılık indeksi (%)	BS 812	13.9		

$C_A$  ve furan reçinesi modifiyeli bağlayıcılar ile BSK’nın hazırlanması amacıyla Karayolları Teknik Şartnamesi aşınma tabakası Tip-1 gradasyon limitlerine göre iş yeri agregaya karışım hesapları yapılmış ve şartname limitlerine uygun gradasyonda karışımlar hazırlanmıştır. Agregaya elek analizleri ve kullanılan gradasyon Tablo 17’de, agregaya gradasyon eğrisi ise Şekil 43’te verilmiştir.



Şekil 43. Karışımlarda kullanılan agrega gradasyon eğrisi

Tablo 17. Agrega elek analizleri ve kullanılan gradasyon

ELEK BOYU (inç/mm)		1		2		3		KARIŞIM GRADASYON	Filler azaltıldı (%3)	İDEAL KARIŞIM	ŞARTNAME GRADASYON		TOLERANS LİMITLERİ	
		3/4-3/8		3/8-No.4		No.4-0								
		%24		%35		%41								
1.5	37.5	<b>100.00</b>	24.00	<b>100.00</b>	35.00	<b>100.00</b>	41.00	100.0	100.0	100.0	100	100	0.00	0.00
1	25	<b>100.00</b>	24.00	<b>100.00</b>	35.00	<b>100.00</b>	41.00	100.0	100.0	0.0	0	0	0.00	0.00
3/4	19	<b>100.00</b>	24.00	<b>100.00</b>	35.00	<b>100.00</b>	41.00	100.0	100.0	100.0	100	100	100.00	100.00
1/2	12.5	<b>50.40</b>	12.10	<b>100.00</b>	35.00	<b>100.00</b>	41.00	88.1	87.7	91.5	83	100	84.1	92.1
3/8	9.5	<b>12.70</b>	3.05	<b>99.30</b>	34.76	<b>100.00</b>	41.00	78.8	78.1	80.0	70	90	74.8	82.8
NO 4	4.75	<b>0.90</b>	0.22	<b>11.30</b>	3.96	<b>99.30</b>	40.71	44.9	43.2	47.5	40	55	40.9	48.9
NO 10	2	<b>0.80</b>	0.19	<b>1.40</b>	0.49	<b>73.00</b>	29.93	30.6	28.5	31.5	25	38	27.6	33.6
NO 40	0.425	<b>0.80</b>	0.19	<b>1.30</b>	0.46	<b>35.00</b>	14.35	15.0	12.4	15.0	10	20	12.0	18.0
NO 80	0.177	<b>0.80</b>	0.19	<b>1.30</b>	0.46	<b>25.20</b>	10.33	11.0	8.2	10.5	6	15	8.0	14.0
NO 200	0.075	<b>0.80</b>	0.19	<b>1.30</b>	0.46	<b>19.40</b>	7.95	8.6	5.8	7.0	4	10	6.6	10.0

## 2.5. Bitümlü Sıcak Karışım Özelliklerinin Belirlenmesi

BSK'ya ait mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla ilk olarak Marshall dizaynı yapılmıştır. Orijinal ve modifiye edilmiş bağlayıcılar ile her bir Marshall dizaynı için 18 adet briket hazırlanarak (Şekil 44) briketlerin yoğunluk-boşluk analizleri yapılmış ve numunelere ait boşluk, bitümlü dolu boşluk ve agregalar arası boşluk değerleri hesaplanmıştır. Marshall stabilite cihazında kırılan numunelerin stabilite ve akma değerleri de belirlenerek karışımlara ait optimum bitüm içerikleri elde edilmiştir.



Şekil 44. Marshall briketlerinin hazırlanması

Dolaylı çekme mukavemeti, modifiye Lottman ve dolaylı çekme deneylerinde kullanılacak briketlerin hazırlanması için Marshall dizaynı ile bulunan optimum bitüm içerikleri kullanılmıştır.

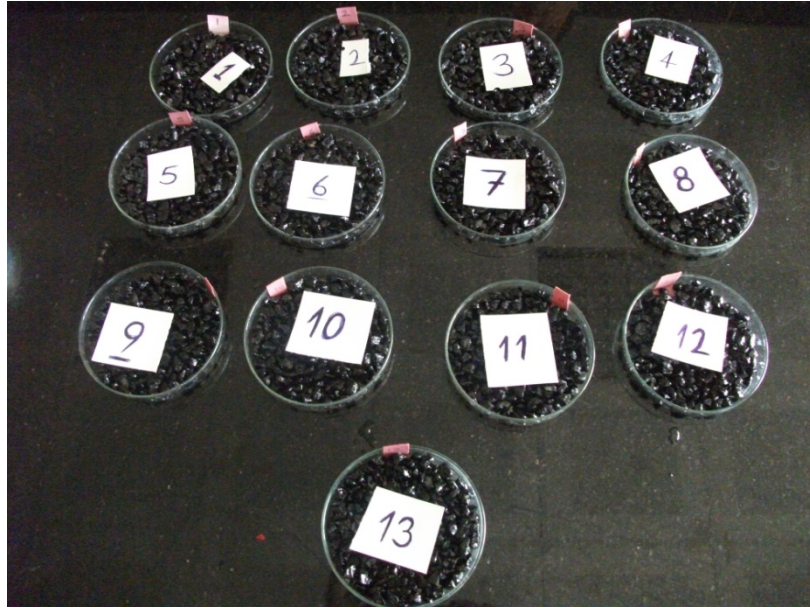
Dolaylı çekme mukavemeti ve modifiye Lottman deneylerinde kullanılmak üzere her bir farklı modifiye karışım için 3 adet kuru ve 3 adet koşullandırılmak üzere toplam 6 adet briket üretilmiştir. Koşullandırılmayan briketler 25°C su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra, koşullandırılan briketler ise bir seferlik donma-çözünme döngüsünden sonra Marshall stabilite cihazına entegre edilen dolaylı çekme başlığı ile 50 mm/dk hızda kırılarak koşullu ve koşulsuz dolaylı çekme mukavemetleri ile dolaylı çekme mukavemeti oranları belirlenmiştir.

Dolaylı çekme deneyinde kullanılmak üzere her bir farklı modifiye karışım için ikişer adet briket üretilmiştir. Deney 20°C'de deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. Maksimum deformasyon 6 µm, yükleme periyodu 3000 ms, yük artış süresi (rise time) 124 ms olarak alınmıştır. Deneye başlanmadan önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler tek tek yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek



yatay deformasyonu ölçecek sensörler (LVDT) ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı ve poisson oranı (0.35) bilgisayara girilmiş, cihaz kabini içindeki referans numunesinin içerisinde ve yüzeyinde bulunan sıcaklık ölçen sensörlerin aynı sıcaklık değerini göstermesinden sonra deneye başlanmıştır. Yükleme başlığı pnömatik olarak çalışan cihaz, ilk önce numunede 6  $\mu\text{m}$  deformasyon oluşturacak yük değerini ayarlamak için 5 adet deneme yüklemesi yapmaktadır. Deneme yüklemesinden sonra gerekli olan yükü otomatik olarak ayarlayan cihaz, esas yüklemeleri yapmakta ve her darbeye 6  $\mu\text{m}$  deformasyon oluşması için gerekli yük değerini kaydetmektedir. Sonuç olarak, yazılım tarafından 5 yüklemenin ortalama değeri ve standart sapmaları hesaplanmaktadır. Deneylerde standart sapması %10'dan fazla olan numuneler iptal edilmektedir.

Sıkıştırılmamış agrega-bitüm karışımının su etkisiyle soyulmaya karşı dayanımını belirlemek amacıyla Nicholson soyulma deneyi yapılmıştır (Şekil 45).



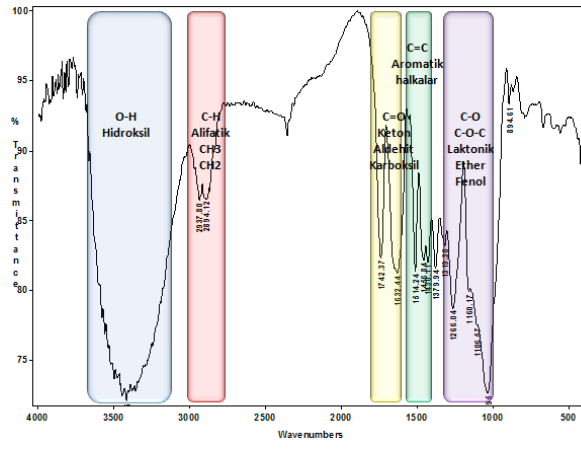
Şekil 45. Nicholson soyulma deneyi için hazırlanan numuneler



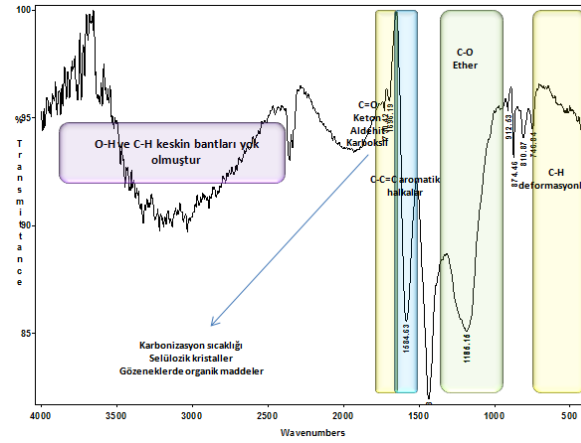
### 3. BULGULAR VE İRDELEME

#### 3.1. FTIR ve TEM Analizi Sonuçları

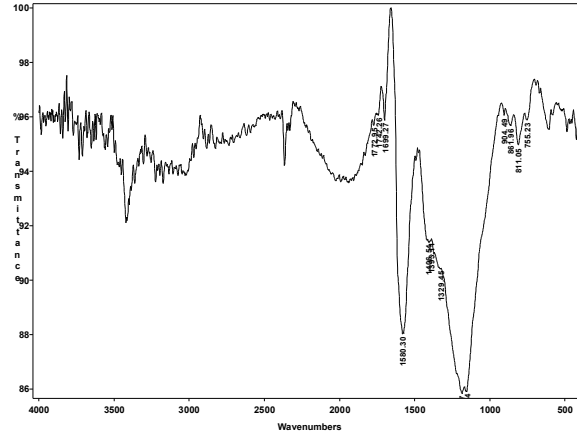
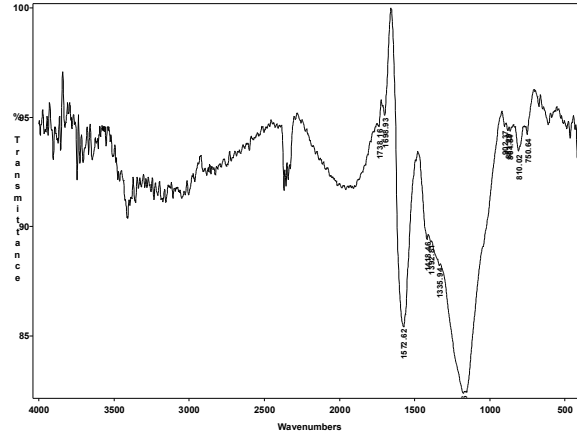
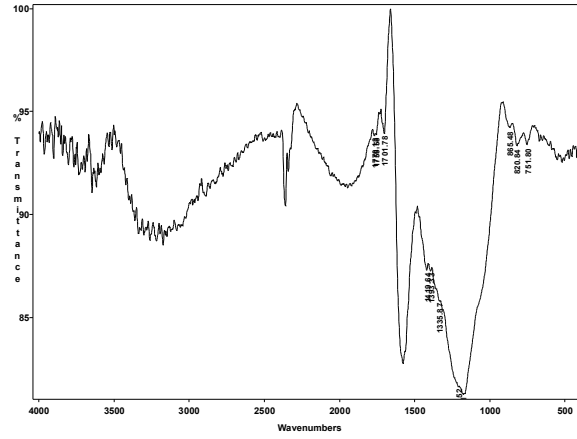
Numune kodları ve aktivasyon için kullanılan asit derişimleri Tablo 15'te verilen aktif karbonlara ait FTIR ve TEM analiz sonuçları Şekil 46-53 arasında verilmiştir.

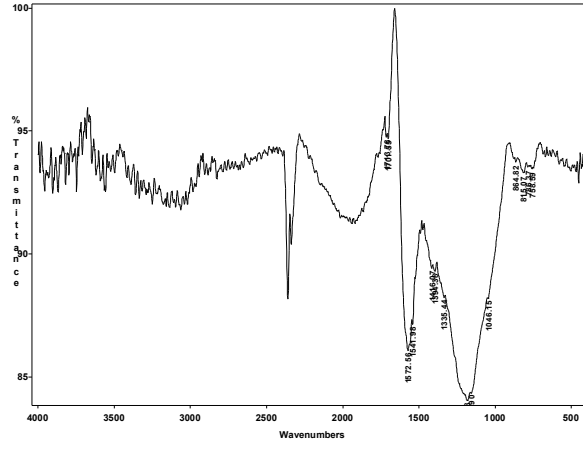
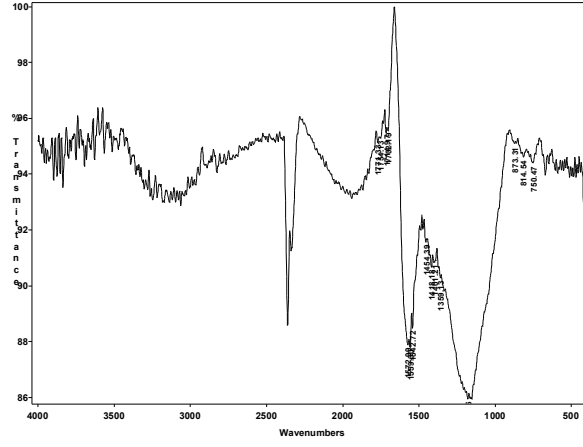


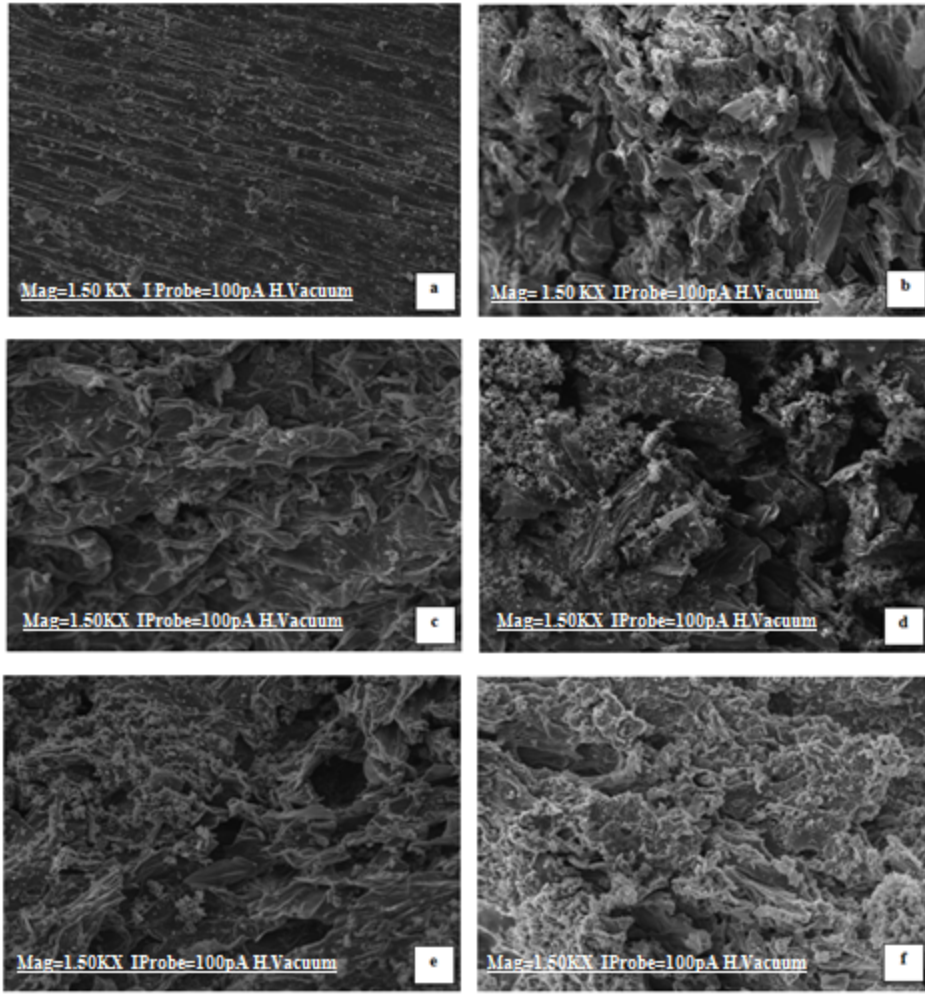
Şekil 46. TFK FTIR grafiği



Şekil 47. CA 0 FTIR grafiği

Şekil 48. C<sub>A</sub> 1 FTIR grafiğiŞekil 49. C<sub>A</sub> 2 FTIR grafiğiŞekil 50. C<sub>A</sub> 3 FTIR grafiği

Şekil 51. C<sub>A</sub> 4 FTIR grafiğiŞekil 52. C<sub>A</sub> 5 FTIR grafiği



Şekil 53. TEM fotoğrafları a) C<sub>A</sub> 0 b) C<sub>A</sub> 1 c) C<sub>A</sub> 2 d) C<sub>A</sub> 3 e) C<sub>A</sub> 4 f) C<sub>A</sub> 5

Hammaddeye (TFK) ait FTIR sonuçları incelendiğinde  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde görülen geniş bandın O-H gerilmesine bağlı hidroksil grubuna,  $2894\text{ cm}^{-1}$  ve  $2937\text{ cm}^{-1}$  bantlarındaki simetrik ve asimetrik C-H gerilme titreşimlerinin alifatik CH<sub>3</sub> ve CH<sub>2</sub> gruplarına ait olduğu düşünülmektedir.  $1742\text{ cm}^{-1}$  ve  $1632\text{ cm}^{-1}$  bantlarındaki C=O gerilmesi keton, aldehit veya karboksil gruplarının varlığına bağlanmıştır.  $1430-1560\text{ cm}^{-1}$  bölgesindeki C=C gerilim titreşimlerinin aromatik ve alifatik gruplara,  $1000-1300\text{ cm}^{-1}$  bölgesindeki C-O veya C-O-C gerilmelerinin laktonik, ether veya fenol gruplarına ait olduğu düşünülmektedir.

C<sub>A</sub> 1-5 numuneler ve C<sub>A</sub> 0 numunesine ait FTIR sonuçları incelendiğinde C<sub>A</sub> 1-5 numuneler ve C<sub>A</sub> 0'ın benzer bantlara sahip olduğu gözlenmiştir. C<sub>A</sub> 0 ve C<sub>A</sub> 1-5 numunelere ait FTIR sonuçlarına göre: Tüm karbonize ürünler için TFK numunesine göre  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$  bölgesindeki geniş bant ve  $2894\text{ cm}^{-1}$  ve  $2937\text{ cm}^{-1}$  deki keskin bantların

kaybolduğu ve bu bölgelerde birçok zayıf bandın oluştuğu belirtilebilir. Tüm karbonize ürünler için 1625-1750  $\text{cm}^{-1}$  bantlarında C=O gerilmesine bağlı keton, aldehit ve karboksil gruplar oluştuğu düşünülmektedir. Bu grupların varlığı karbonizasyonun tam olarak gerçekleşmediğini veya gözeneklerde hapsolmuş organik yapıların varlığını göstermektedir. Literatür bilgilerine dayanarak karbonizasyon sıcaklığının artırılmasının bu grupların varlığını engelleyeceği düşünülmektedir [80]. 1580  $\text{cm}^{-1}$  bandında C-C=C simetrik gerilmesine bağlı aromatik halkalar ve 1000-1300  $\text{cm}^{-1}$  bölgesinde C-O gerilmesine bağlı ether gruplar tüm karbonize ürünler için mevcuttur. Ayrıca 100-500  $\text{cm}^{-1}$  bölgesindeki zayıf piklerin de C-H deformasyonuna bağlı olduğu öngörülmektedir.  $C_A$  1-5 numunelerde 1380-1460  $\text{cm}^{-1}$  bölgelerinde gözlenen alkan grupların ise  $C_A$  0 numunesinde bulunmadığı belirtilebilir.

Yüzey dokusunu incelemek amacıyla yapılan TEM analizinde şu sonuçlara ulaşılmıştır.  $C_A$  0 ve  $C_A$  1-5 numuneler arasında yüzey morfolojisi açısından belirgin bir fark olduğu belirtilebilir.  $C_A$  0 numunesine ait yüzey dokusunda herhangi bir boşluk yapısı gözlenmemiştir, bu numunede pürüzsüz ve homojen bir yüzey morfolojisinden söz edilebilir.  $C_A$  1 ve  $C_A$  2 numunelerinde uniform boyutlarda ve yüzeye düzgün dağılan mikro ve mezo boşluklardan söz edilebilir. Bu numunelerdeki yüzey dokusunun  $C_A$  0 numunesine kıyasla daha pürüzlü olduğu gözlenmektedir.  $C_A$  3-5 numunelerine ait fotoğraflarda ise yüzeyde heterojen bir dağılım gösteren makro boşluklar ile mezo ve mikro boşlukların birarada bulunduğu söylenebilir.

Sonuç olarak karbonize ürünlerin tamamında benzer FTIR sonuçları elde edilmiştir. Bu durum elde edilen final ürünlerin kimyasal olarak birbirine benzediğini göstermektedir. Ancak yüzey dokuları incelendiğinde asit ile doyurularak karbonize edilen  $C_A$  numunelerin daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu belirtilebilir. Asit derişimindeki artış ise makro boşlukların oluşmasına katkıda bulunmuştur.

Elde edilen deney sonuçlarına göre, bitüm modifikasyonunda kullanılacak  $C_A$  üretimi için %30 asit derişiminin hem mikro ve mezo hem de makro boşluk oluşumunda etkili olduğu belirlenmiş ve  $C_A$  üretiminde bu derişimin kullanılmasına karar verilmiştir.

### 3.2. Optimum Modifiyer Boyutu ve Oranlarının Belirlenmesi

Modifiyer malzemelerin orjinal bağlayıcıya karıştırılma boyutu ( $C_A$  için) ve oranları ile optimum karıştırma koşullarının belirlenmesi amacıyla yapılan yumuşama noktası deney sonuçları Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 18. Farklı karışım koşulları için yumuşama noktası deney sonuçları ( $^{\circ}C/^{\circ}K$ )

Oranlar (%)	$C_A$ Boyutları			Reçine
	<0.063mm	0.063-0.125 mm	0.125-0.25mm	
1	51/324	50/323	50/323	-
2	-	-	-	54/327
3	52/325	51/324	51/324	54/327
4	-	-	-	55/328
5	51/324	50/323	51/324	56/329
6	-	-	-	57/330
7	52/325	51/324	51/324	-
10	52/325	51/324	51/324	-
15	53/326	53/326	52/325	-
20	53/326	54/327	53/326	-
25	53/326	54/327	53/326	-

Yumuşama noktası deney sonuçları incelendiğinde tüm modifiye karışımlar için yumuşama noktası değerlerinde, orjinal bağlayıcının yumuşama noktası değerine ( $48^{\circ}C$ ) oranla bir artış meydana geldiği gözlenmiştir.  $C_A$  modifiyer oranının %10 ve üzerinde olduğu modifikasyon koşullarında yumuşama noktasının anlamlı bir değişim gösterdiği söylenebilir. Furan reçinesi modifikasyonunda ise özellikle %3 reçine oranından itibaren reçine oranı artışının yumuşama noktası değerlerini sürekli artırdığı belirtilebilir. Elde edilen bu sonuçlara göre Tablo 19’da verilen karışımlar optimum karışım olarak seçilmiş ve diğer deneyler bu karışımlar üzerinde uygulanmıştır.

Tablo 19. Optimum karışımlar

Karışım No	Modifiyer tipi	Modifiyer boyutu (mm)	Modifiyer oranı (%)
1	Orjinal Bitüm	-	-
2	Aktif Karbon	0.063-0.125	10
3	Aktif Karbon	0.063-0.125	15
4	Aktif Karbon	0.063-0.125	20
5	Aktif Karbon	0.125-0.25	15
6	Aktif Karbon	0.125-0.25	20
7	Reçine+Serter	-	4
8	Reçine+Serter	-	5
9	Reçine+Serter	-	6
10	Aktif Karbon+Reçine+Serter	0.125-0.25	%20 C <sub>A</sub> , %5 Reçine
11	Aktif Karbon	<0.063	10
12	Aktif Karbon	<0.063	15
13	Aktif Karbon	<0.063	20

Karıştırma süresinin optimize edilmesi amacıyla C<sub>A</sub> ve furan reçinesi modifikasyonlarına ait birer boyut ve karıştırma oranı seçilerek 15, 30 ve 60 dk karıştırma sürelerinde yeni karışımlar hazırlanmış ve karıştırma süresinin yumuşama noktası üzerindeki etkisi incelenmiştir (Tablo 20).

Tablo20. Farklı karıştırma süreleri için yumuşama noktası deney sonuçları (°C/°K)

Karışım No	Karıştırma süresi (dk)			
	15	30	45	60
3	49/322	51/324	53/326	53/326
7	53/326	55/328	55/328	55/328

Tablo 20 incelendiğinde 45 dk karıştırma süresinin hem aktif karbon hemde furan reçinesi modifikasyonunda etkili olduğu gözlenmiş ve daha sonraki deneyler için hazırlanacak karışımlarda bu süre dikkate alınmıştır.

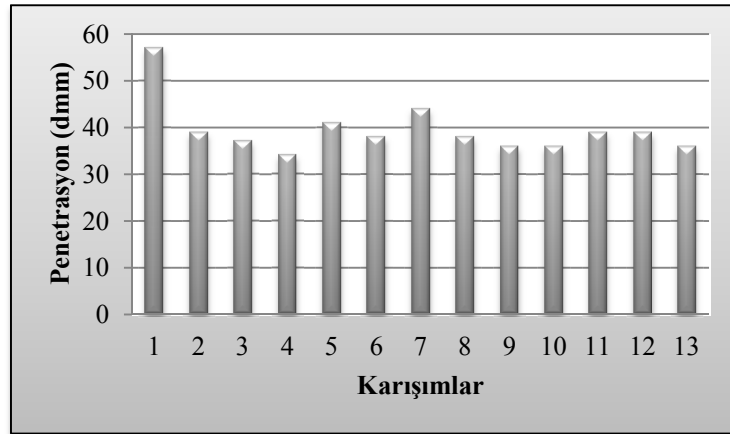
### 3.3. Penetrasyon, Yumuşama Noktası, Düktilite ve Parlama Noktası Deney Sonuçları

Tablo 19’da verilen karışımlar için penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite ve parlama noktası deneyleri yapılmış, elde edilen penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçlarına göre PI değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 21’de verilmiştir.

Tablo 21. Penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama noktası ve PI değerleri

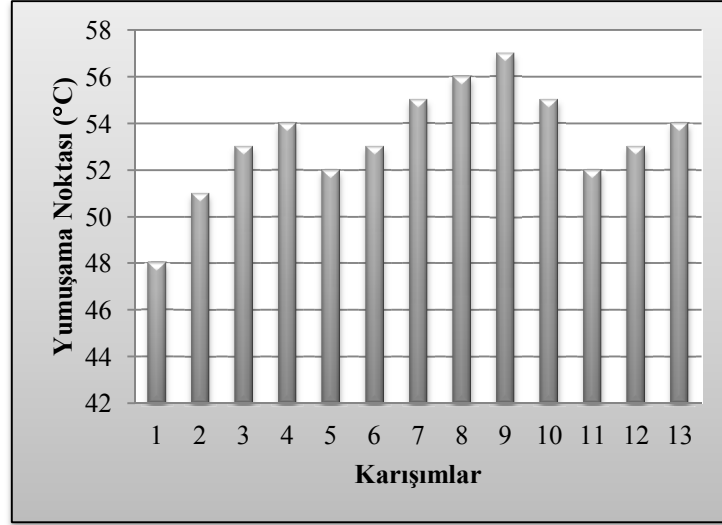
Karışım No	Penetrasyon (25°C, dmm)	Yumuşama Noktası (°C/°K)	PI	Duktilite (cm)	Parlama Noktası (°C/°K)
1	57	48/321	-1.41371	+100	255/528
2	39	51/324	-1.48483	89	265/538
3	37	53/326	-1.13404	81	270/543
4	34	54/327	-1.08428	75	275/548
5	41	52/325	-1.14902	79	260/533
6	38	53/326	-1.07951	72	265/538
7	44	55/328	-0.32069	+100	265/538
8	38	56/329	-0.42868	+100	270/543
9	36	57/330	-0.33615	+100	270/543
10	36	55/328	-0.75399	79	245/518
11	39	52/325	-1.25281	+100	270/543
12	39	53/326	-1.02576	+100	270/543
13	36	54/327	-0.96942	+100	275/548

Sonuçlar incelendiğinde tüm modifiyerler için orijinal bitüme kıyasla penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı gözlenmiştir (Şekil 54,55). Bu sonuçlara göre kullanılan modifiyerlerin bitümün kıvamlılığını artırdığı açıkça söylenebilir. Penetrasyon ve yumuşama noktalarındaki bu değişim PI değerlerinin yükselmesine ve sıcaklık hassasiyetlerinin azalmasına sebep olmuştur. Şekil 56 PI değerlerinin değişimini göstermektedir.

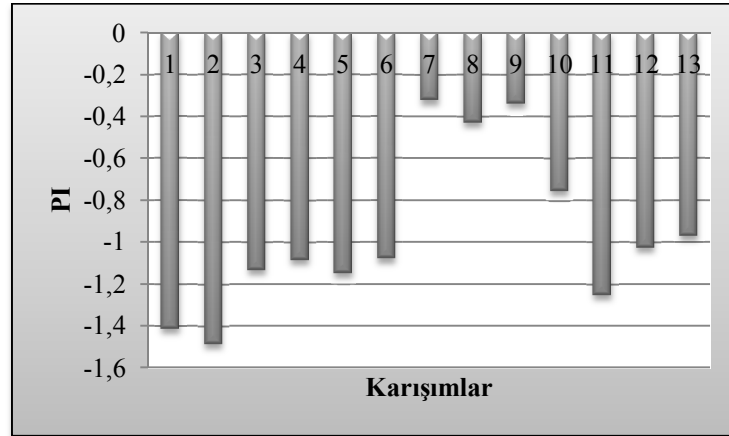


Şekil 54. Penetrasyon değerleri değişimi





Şekil 55. Yumuşama noktası değerleri değişimi



Şekil 56. PI değerleri

Şekil 56'ya göre reçine katkıli karışımların  $C_A$  katkıli karışımlara göre sıcaklık hassasiyeti üzerinde daha etkili olduğu söylenebilir,  $C_A$  modifikasyonunda ise %15 ve %20 oranlarının %10 karışım oranına göre sıcaklık hassasiyeti üzerinde daha etkili olduğu belirlenmiştir. 6 ve 8 numaralı karışımlardaki modifiyerlerin beraber kullanılması ile oluşturulmuş 10 numaralı kompozit karışımın sıcaklık hassasiyetinin 6 numaralı karışıma göre düştüğü ancak 8 numaralı karışıma göre arttığı gözlenmiştir. Buna göre reçine içerisine  $C_A$  eklemek reçinenin bağlayıcı üzerindeki etkinliğini düşürmüştür.

Düktilite değerleri incelendiğinde reçine ve çok ince öğütülmüş aktif karbon (<0.063 mm) katkıli bağlayıcıların orijinal bitümün düktilite değerini düşürmediği ancak daha

büyük boyutlu  $C_A$ 'nın (0.063-0.125 mm ve 0.125-0.25 mm) modifiyer olarak kullanılmasının düktilite değerlerini azalttığı gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre granüler olarak kullanılan aktif karbonların, bağlayıcının kohezyonuna negatif yönde etki yaptığı söylenebilir.

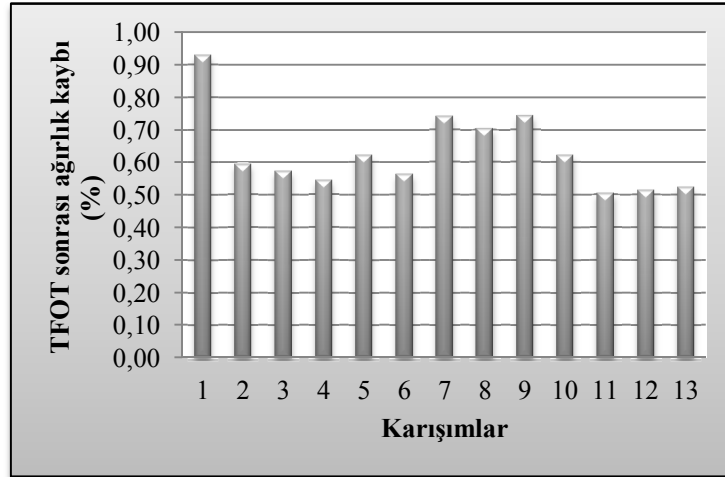
Parlama noktası değerleri incelendiğinde tüm karışımlarda parlama noktası değerlerinin saf bitüme kıyasla yükseldiği gözlenmiştir. Özellikle 0.063 mm'den ince ve 0.063-0.125 mm arası boyutlar için %20 modifiyer oranında parlama noktası değerleri %7.84 oranında artmıştır.

### 3.4. TFOT Sonuçları

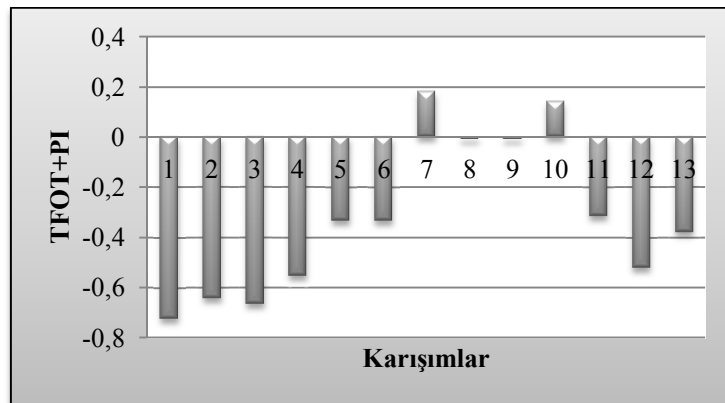
TFOT sonuçları incelendiğinde yaşlandırma sonucu ağırlık kaybını en aza indiren modifiyerin 0.063 mm'den ince  $C_A$  olduğu gözlenmiştir (Tablo 22, Şekil 57). Şekil 56 incelendiğinde  $C_A$  modifikasyonun yaşlanma özelliklerine etkisi reçine modifikasyonuna göre daha yüksek olarak belirlenmiştir.  $C_A$  modifikasyonunda her boyut için modifiyer yüzdesinin artması yaşlanma sonrası ağırlık kaybını azaltmıştır. Bu sonuçlara göre  $C_A$  yüzey fonksiyonel gruplarının bağlayıcı içerisindeki uçucu bileşenleri etkilediği ve uçan madde miktarını azalttığı söylenebilir. En etkili boyutun 0.063 mm'den ince  $C_A$  olması da bu boyutta  $C_A$  yüzey alanının daha büyük olması ve bağlayıcı içerisindeki uçucu bileşenler ile daha fazla bağ yapması ile açıklanabilir. TFOT sonrasında yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinde penetrasyon değerlerinin düştüğü, yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı gözlenmiştir. Yaşlandırılmış numunelerin penetrasyon değerleri ile yaşlandırılmamış numunelerin penetrasyon değerleri karşılaştırıldığında en büyük penetrasyon azalmasının reçine katkılı karışımlarda olduğu gözlenmiştir, buna göre reçine modifikasyonun yaşlanmaya karşı daha duyarlı olduğu sonucu çıkartılabilir. Yaşlandırma sonrası hesaplanan PI değerleri dikkate alındığında reçine modifikasyonunun yaşlandırılmamış PI değerlerinde olduğu gibi etkin olduğu ve reçinenin, bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini azalttığı söylenebilir (Şekil 58).

Tablo 22. TFOT sonuçları

Karışım No	Ağırlık Kaybı (%)	TFOT+Penetrasyon (25°C, dmm)	TFOT+Yumuşama Noktası (°C/°K)	TFOT+PI
1	0.93	33	56/329	-0.72123
2	0.59	28	58/331	-0.64242
3	0.57	25	59/332	-0.66425
4	0.54	24	60/333	-0.55279
5	0.62	27	60/333	-0.33027
6	0.56	27	60/333	-0.33027
7	0.74	29	62/335	0.18025
8	0.70	24	63/336	-0.01261
9	0.74	24	63/336	-0.01261
10	0.62	26	63/336	0.14182
11	0.50	30	59/332	-0.31324
12	0.51	27	59/332	-0.51924
13	0.52	29	59/332	-0.38049



Şekil 57. TFOT sonrası ağırlık kayıpları



Şekil 58. TFOT sonrası PI değerleri

### 3.5. DSR Deney Sonuçları

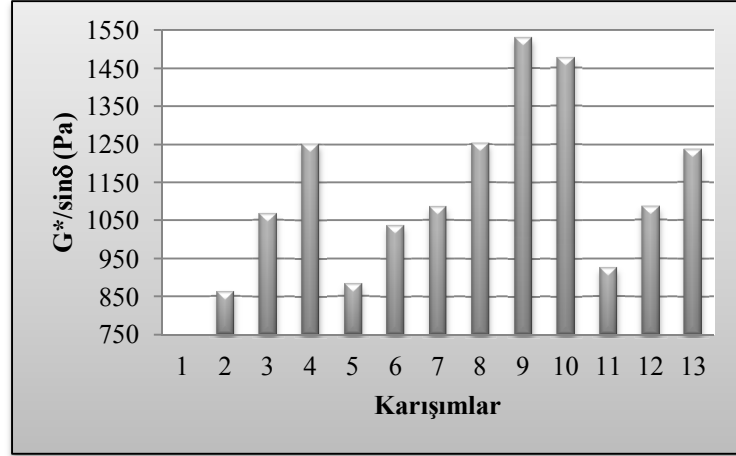
Orijinal ve modifiye bağlayıcıların yüksek sıcaklık performanslarının belirlenmesi amacıyla yapılan DSR deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 23'te verilmiştir.

DSR sonuçları incelendiğinde orjinal bitümün, şartname limiti olan 1000 Pa değerini sağlayabildiği en yüksek sıcaklık değerinin 64°C (337°K) olduğu, buna göre orijinal bitümün yüksek sıcaklık performans seviyesinin PG 64-Y olarak belirlenebileceği söylenebilir. 2,5 ve 11 numaralı karışımların yüksek sıcaklık performans seviyeleri orjinal bitüme göre bir seviye gelişmiş ve 70°C (343°K) olarak belirlenmiştir. Diğer modifiye karışımların ise yüksek sıcaklık performans seviyelerinin 76°C'ye (349°K) yükseldiği gözlenmiştir. Buna göre tüm modifiye karışımlar yüksek sıcaklıkta orjinal bağlayıcıya göre daha yüksek performans sergilemiştir.

Şekil 59'da modifiye karışımların 76°C'deki tekerlek izi dayanım parametreleri ( $G^*/\sin\delta$ , Pa) grafiği görülmektedir. Bu grafiğe göre yüksek sıcaklıkta tekerlek izi dayanımı en yüksek olan modifiyer tipi furan reçinesi ve reçine-  $C_A$  kompozitidir (Karışım 9 ve 10). Furan reçinesi modifikasyonunda reçine oranının %4'ten %6'ya çıkması tekerlek izi dayanım parametresini %41 artırmıştır. 0.063 mm'den ince ve 0.063-0.125 mm arası boyutlarındaki  $C_A$  modifikasyonunda %20  $C_A$  yüzdesinin, %6 reçine modifikasyonunun gösterdiği performansı gösteremese de %5 furan reçinesine benzer şekilde tekerlek izi dayanımı gösterdiği söylenebilir.

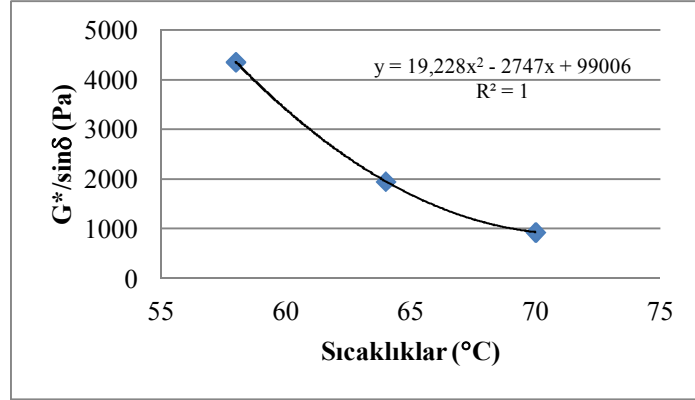
Tablo 23. DSR deney sonuçları

Karışım No	Sıcaklık (°C)	G* (Pa)	Faz Açısı ( $\delta$ )	G*/sin $\delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (AASHTO T5)
1	58	4314	81.2	4365	1000
	64	1944	83.23	1958	
	70	931.6	84.85	935.4	
	76	-	-	-	
2	58	7845	79.8	7971	
	64	3708	81.95	3745	
	70	1783	83.84	1793	
	76	858.2	85.17	861.3	
3	58	9902	79.74	10060	
	64	4542	81.84	4588	
	70	2113	83.64	2126	
	76	1063	85.09	1067	
4	58	11240	79.8	11420	
	64	5398	81.85	5453	
	70	2509	83.58	2525	
	76	1246	84.97	1251	
5	58	8365	79.7	8502	
	64	3955	81.84	3995	
	70	1845	83.66	1857	
	76	878.3	84.9	881.8	
6	58	9003	79.93	9143	
	64	4213	81.99	4254	
	70	2086	83.81	2098	
	76	1033	85.25	1037	
7	58	9685	75.61	9999	
	64	4392	78.32	4485	
	70	2144	80.85	2171	
	76	1077	83.05	1085	
8	58	11200	74.55	11620	
	64	5161	77.18	5293	
	70	2485	79.81	2525	
	76	1241	82.07	1253	
9	58	12980	73.5	13530	
	64	6346	76.23	6534	
	70	3151	78.91	3211	
	76	1513	81.39	1530	
10	58	12570	76.81	12910	
	64	6180	79.29	6290	
	70	2885	81.49	2917	
	76	1466	83.47	1476	
11	58	8428	79.46	8572	
	64	3927	81.68	3969	
	70	1849	83.53	1860	
	76	920.1	85.02	923.6	
12	58	9376	79.77	9527	
	64	4353	81.86	4397	
	70	2075	83.6	2088	
	76	1082	85.01	1086	
13	58	11210	79.69	11400	
	64	5014	81.5	5069	
	70	2531	83.37	2548	
	76	1231	84.81	1236	

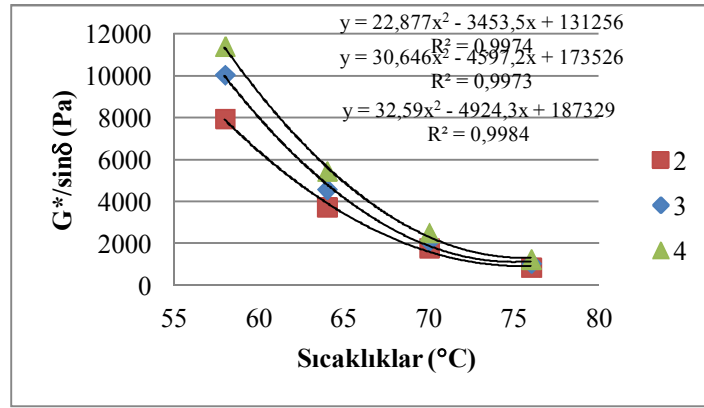


Şekil 59. 76°C'deki tekerlek izi dayanım parametreleri

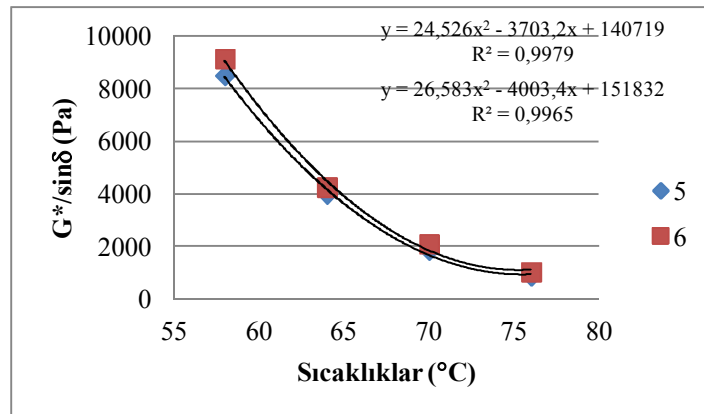
Orijinal ve modifiye karışımların  $G^*/\sin\delta$  - sıcaklık ilişkileri Şekil 60-64 arasında verilmiştir. Buna göre orijinal bağlayıcı, 1000 Pa olan şartname limitini 69°C'de sağlamış ancak bir üst PG seviyesi olan 70°C'yi sağlayamamıştır. 0.063-0.125 mm boyutlu  $C_A$  modifikasyonunda  $C_A$  oranının artması tüm sıcaklıklarda  $G^*/\sin\delta$  değerini artırmış ancak yüksek sıcaklıklarda (70 ve 76°C) oran değişiminin etkisi azalmıştır. Bu boyutta %10 oranında  $C_A$  modifikasyonu şartname limitini 73.6 °C'de sağlamış ve yüksek sıcaklık performans seviyesi PG 70-Y olarak belirlenmiştir. %15 ve %20  $C_A$  oranlarında ise performans seviyesi 76°C'ye ulaşmıştır. 0.125-0.25 mm boyutlu  $C_A$  modifikasyonunda %20 oranında  $C_A$  kullanılması performans seviyesini PG 76-Y'ye taşırken %15 oranında  $C_A$  kullanılması durumunda şartname limitini sağlayan en yüksek sıcaklık 73.8°C'de kalmaktadır. Reçine modifikasyonunda tüm oranlar için performans seviyesi PG 76-Y olarak belirlenmiş, reçine oranındaki artışın düşük sıcaklıklarda daha belirgin olmak üzere  $G^*/\sin\delta$  değerini artırdığı gözlenmiştir. 0.063 mm'den daha ince boyutlu  $C_A$  modifikasyonunda %10 oranındaki  $C_A$  katkısının 2 ve 5 numaralı karışımlarda olduğu gibi performans seviyesi PG 70-Y seviyesinde kalmış ve bu oranda şartname limitini sağlayan en yüksek sıcaklık değerinin 74.3°C olduğu belirlenmiştir.  $C_A$  modifiyerinin %10 oranında kullanıldığı tüm karışımlarda (karışım 2,5 ve 11) performans seviyesi 70°C olarak belirlense de 0.063 mm den ince boyutun diğer iki boyuta oranla bir miktar daha etkin olduğu söylenebilir.



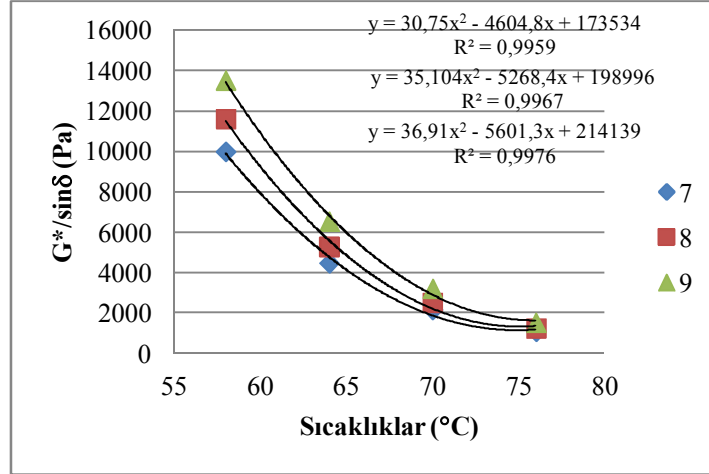
Şekil 60. Orijinal bitümün  $G^*/\sin\delta$  - sıcaklık ilişkisi



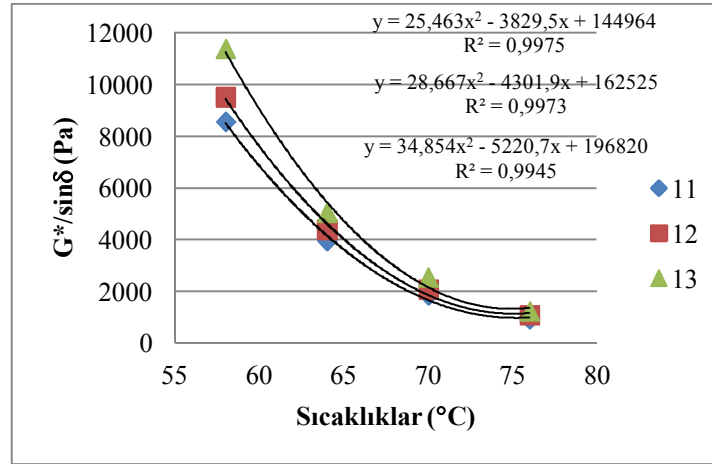
Şekil 61. 0.063-0.125 mm boyutlu  $C_A$  modifikasyonu için  $G^*/\sin\delta$  - sıcaklık ilişkisi



Şekil 62. 0.125-0.25 mm boyutlu  $C_A$  modifikasyonu için  $G^*/\sin\delta$  - sıcaklık ilişkisi



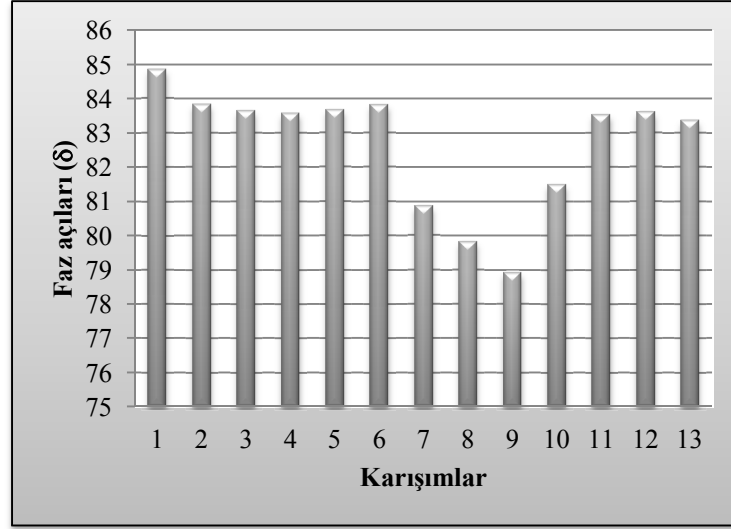
Şekil 63. Reçine modifikasyonu için  $G^*/\sin\delta$  - sıcaklık ilişkisi



Şekil 64. 0.063 mm'den küçük boyutlu  $C_A$  modifikasyonu için  $G^*/\sin\delta$  - sıcaklık ilişkisi

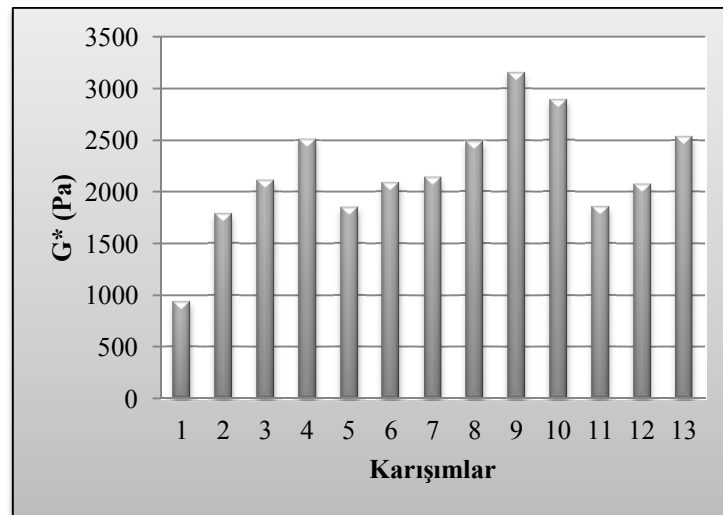
Karışımların faz açılarındaki ve dolayısıyla elastik-viskoz davranışlarındaki değişimi incelemek amacıyla çizilen 70°C'deki faz açıları grafiği (Şekil 65) incelendiğinde orijinal ve modifiye edilmiş tüm karışımların faz açılarının yüksek olduğu ve viskoz davranışa daha yatkın oldukları söylenebilir. Ancak  $C_A$  ve reçine modifikasyonları, faz açısı bakımından kıyaslandığında, reçine katkılı bağlayıcıların faz açılarının  $C_A$  katkılı bağlayıcılara oranla azaldığı ve buna göre reçine katkısının bağlayıcının elastik davranışını artırdığı söylenebilir. %4,5 ve 6 reçine katkılı bağlayıcılar orijinal bağlayıcının faz açısını sırasıyla %4.71, %5.94 ve %7.00 oranlarında düşürmüştür.





Şekil 65. 70°C'deki faz açıları

Karışımların 70°C'deki  $G^*$  değerleri incelendiğinde (Şekil 66) kaymaya karşı mukavemeti en yüksek karışımın %6 reçine katkılı karışım olduğu gözlenmektedir. %5 reçine katkısının ve tüm boyutlardaki %20  $C_A$  katkısının benzer kayma mukavemeti değerleri sağladığı söylenebilir. Kompozit karışımın  $G^*$  performansı kompoziti oluşturan bileşenlerin ayrı ayrı performanslarından (karışım 6 ve 8) daha yüksek olarak elde edilmiştir.  $C_A$  katkılı karışımlarda ise  $C_A$  oranının artırılması kayma mukavemetini artırmıştır.



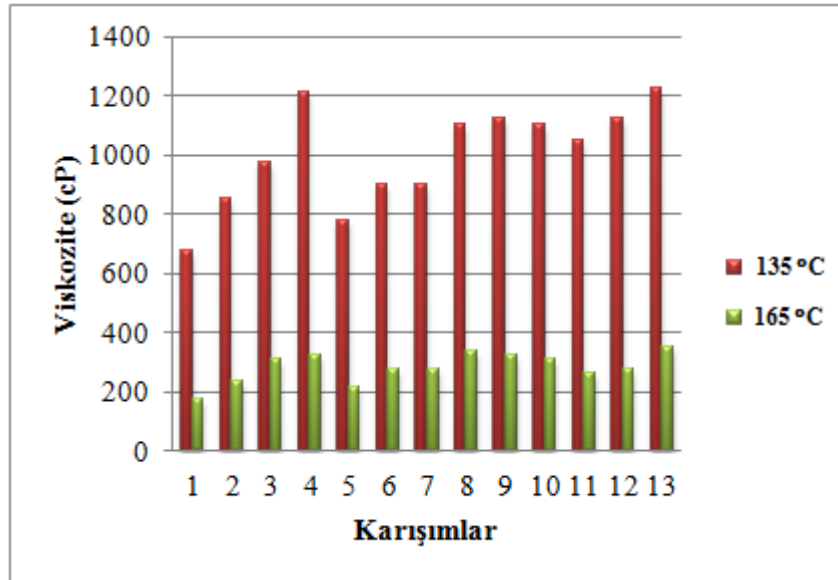
Şekil 66. 70°C'deki  $G^*$  değerleri

### 3.6. RV Deney Sonuçları

Saf ve modifiye bağlayıcılara 135 ve 165°C sıcaklıkta dönel viskozimetre deneyi uygulanmıştır. Deneyde 27 numaralı mil ve 20 rpm hız kullanılmıştır. Modifikasyon indisi değerleri modifiye bitümün viskozite değerinin orjinal bağlayıcının viskozite değerine oranından elde edilmiştir. RV deneyinden elde edilen sonuçlar ( $cP=Pa.s \times 1000$ ) ve modifikasyon indisi ( $\eta_{\text{modified}} / \eta_{\text{neat}}$ ) değerleri Tablo 24'te ve Şekil 67'de verilmiştir.

Tablo 24. RV deney sonuçları

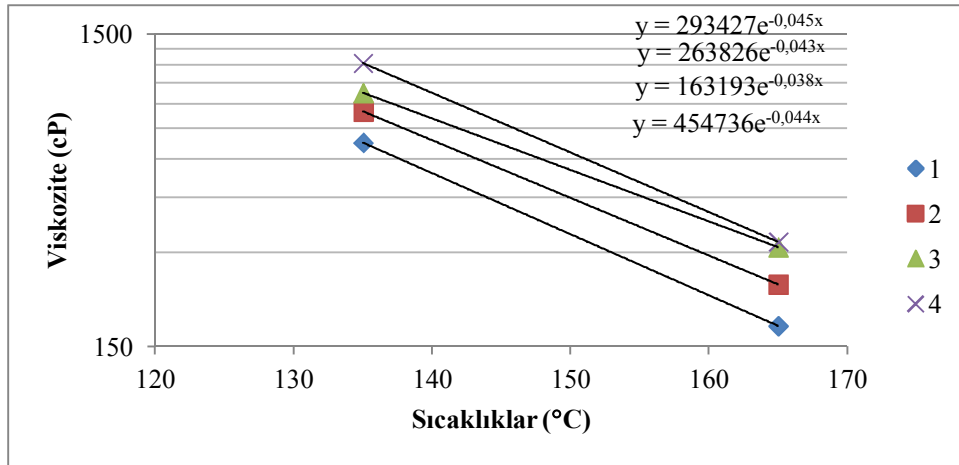
Karışım No	Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modified}} / \eta_{\text{neat}}$	
	135°C	165°C	135°C	165°C
1	675	175	1.00	1.00
2	850	237.5	1.26	1.36
3	975	312.5	1.44	1.79
4	1213	325	1.80	1.86
5	775	212.5	1.15	1.21
6	900	275	1.33	1.57
7	900	275	1.33	1.57
8	1100	337.5	1.63	1.93
9	1125	325	1.67	1.86
10	1100	312.5	1.63	1.79
11	1050	262.5	1.56	1.50
12	1125	275	1.67	1.57
13	1225	350	1.81	2.00



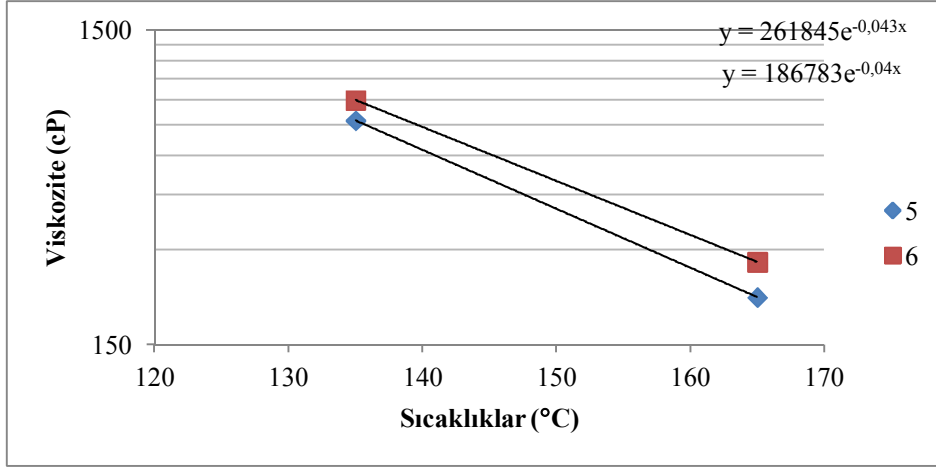
Şekil 67. Bağlayıcıların 135 ve 165°C'deki viskozite değerleri

135 ve 165°C’de belirlenen viskozite ve modifikasyon indisi değerlerinden hem  $C_A$ ’nın hem de furan reçinesinin bağlayıcıların sertliğini artırdığı, yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirliğini ise azalttığı tespit edilmiştir. Şekil 67 incelendiğinde en yüksek viskozite değerlerini veren karışımların %20 modifiyer oranında 0.063-0.125 mm ve 0.063 mm’den ince  $C_A$  katkılı karışımlar olduğu belirlenmiştir (karışım 4 ve 13). Hem  $C_A$  hem de reçine modifikasyonunda modifiyer oranının artışı viskozite değerlerini artırmıştır.  $C_A$  modifikasyonunda boyut değişiminin viskoziteye olan etkisi incelendiğinde kullanılan en iri boyut olan 0.125-0.25 mm boyutunda, hem %15 hem de %20 oranlarında diğer iki boyuta kıyasla daha düşük viskozite değerleri elde edilmiştir. Bunun sebebi diğer iki boyuta oranla daha iri elenmiş  $C_A$ ’nın yüksek sıcaklıklarda bitüm içerisindeki homojen dağılımını muhafaza edemeyerek çökmesi olarak açıklanabilir.

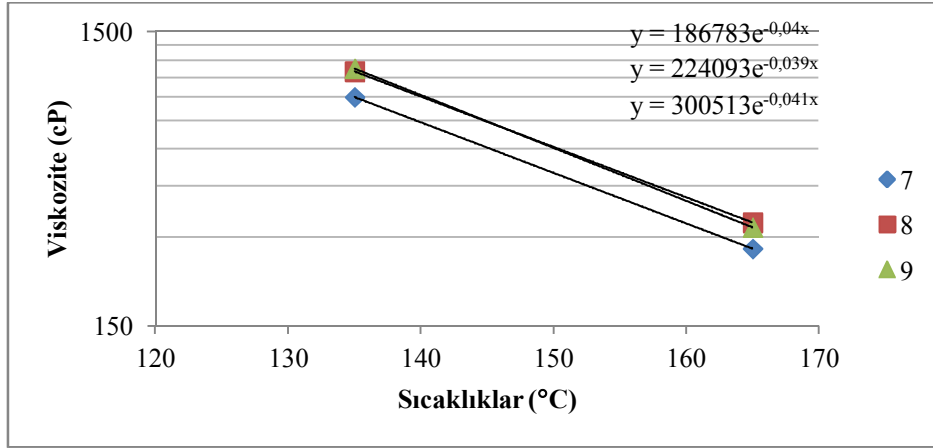
Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla ölçülen viskozite değerleri sıcaklık-viskozite grafiğinde işaretlenmiş ve elde edilen doğrulara ait denklemler yardımıyla  $170 \pm 20$  cP ve  $280 \pm 30$  cP limitlerine karşılık gelen sıcaklıklar belirlenmiştir (Şekil 68-71). Karıştırma ve sıkıştırmadaki sıcaklık aralıkları Tablo 25’te, ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarına göre çizilen grafik ise Şekil 72’de verilmiştir.



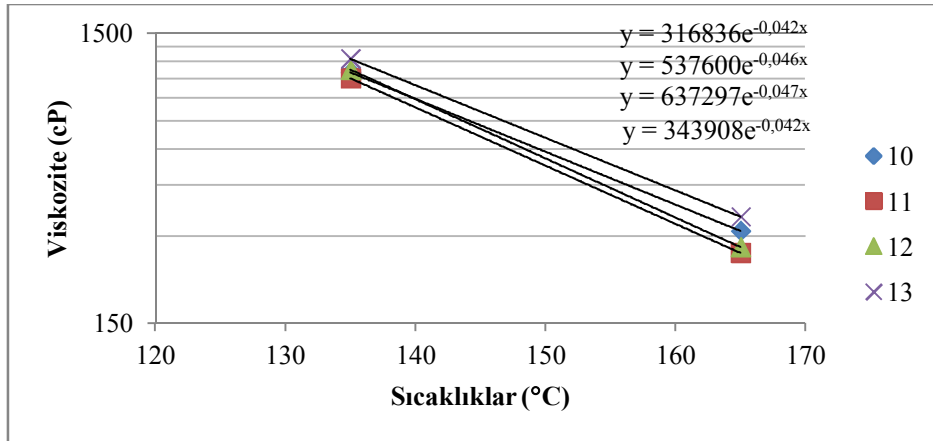
Şekil 68. Sıcaklık-viskozite grafiği (1,2,3 ve 4 no’lu karışımlar)



Şekil 69. Sıcaklık-viskozite grafiği (5 ve 6 no'lu karışımlar)



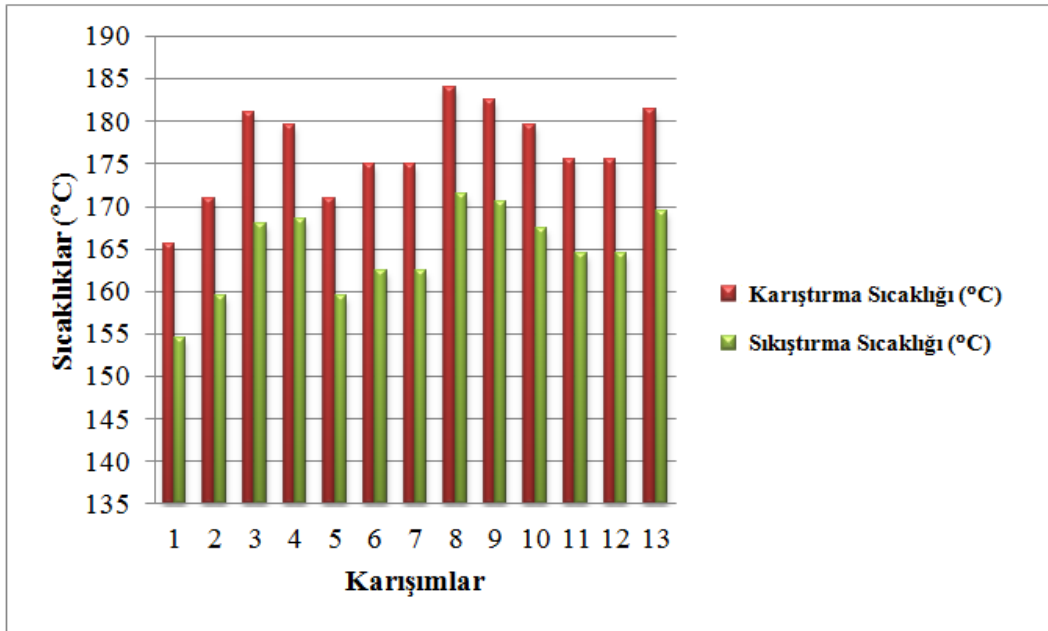
Şekil 70. Sıcaklık-viskozite grafiği (7,8 ve 9 no'lu karışımlar)



Şekil 71. Sıcaklık-viskozite grafiği (10,11,12 ve 13 no'lu karışımlar)

Tablo 25. Modifiye bitümlere ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Karışım No	Karıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)
1	168-163	157-152
2	174-168	162-157
3	184-178	171-165
4	182-177	171-166
5	174-168	162-157
6	178-172	165-160
7	178-172	165-160
8	187-181	174-169
9	185-180	173-168
10	182-177	170-165
11	178-173	167-162
12	178-173	167-162
13	184-179	172-167



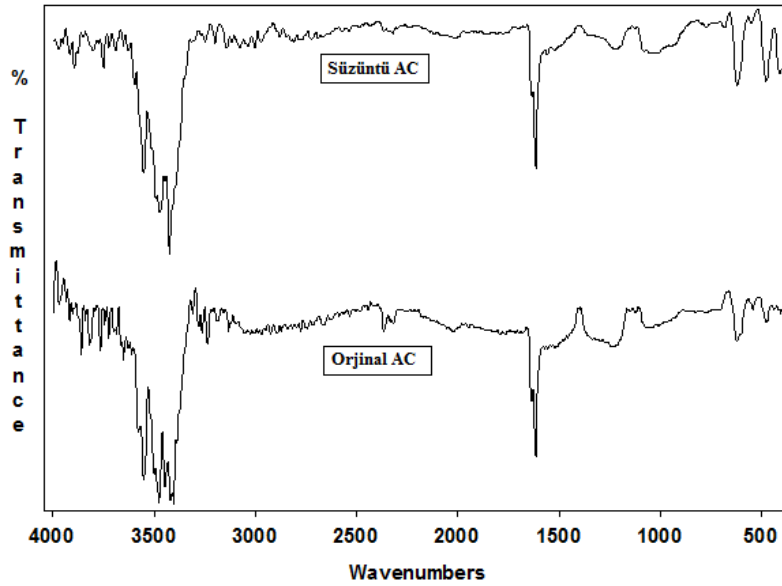
Şekil 72. Ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Hesaplanan değerlere göre  $C_A$  ve furan reçinesi katkıli bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları artmıştır. Hem  $C_A$  hem de furan reçinesi katkıli bağlayıcılar için tüm boyutlarda  $C_A$  ve furan reçinesi oranı arttıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık değerlerinin yükseldiği gözlenmiştir. Şekil 72 incelendiğinde karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını en çok yükselten modifiyerlerin %5 ve %6 oranlarında reçine (karışım 8 ve 9) ile %20 oranında ve 0.063 mm'den ince boyutta  $C_A$  (karışım 13) olduğu belirlenmiştir. Bu modifiyerlerin orijinal bağlayıcının karıştırma sıcaklığını artırma oranları sırasıyla

%11.17, %10.27 ve %9.67 sıkıştırma sıcaklığını artırma oranları ise sırasıyla %11.00, %10.35 ve %9.71 olarak hesaplanmıştır.

### 3.7. Modifiye Bağlayıcıdan Süzülen C<sub>A</sub>'nın FTIR Analizi Sonuçları

C<sub>A</sub>'nın bitüm ile karışması sonucunda kimyasal bir tepkime olup olmadığını belirlemek amacıyla orijinal (bağlayıcı ile karışmamış) C<sub>A</sub>'nın FTIR analiz sonuçları ile 4 no'lu karışımdan (0.063-0.125 mm boyutunda %20 C<sub>A</sub> ile hazırlanmış karışım) süzülerek geri kazanılan süzöntü C<sub>A</sub>'nın FTIR analizleri karşılaştırılmıştır (Şekil 73).



Şekil 73. Orijinal ve süzöntü C<sub>A</sub> FTIR grafiği

Şekil 73 incelendiğinde süzöntü C<sub>A</sub>'nın yüzey fonksiyonel gruplarında orijinal C<sub>A</sub>'ya göre belirgin bir değişim olmadığı, orijinal C<sub>A</sub>'da 1625-1750 cm<sup>-1</sup> bantlarında görülen ve C=O gerilmesine bağlı keton, aldehit ve karboksil grupların, 1580 cm<sup>-1</sup> bantlarında görülen C-C=C simetrik gerilmesine bağlı aromatik halkaların ve 1000-1300 cm<sup>-1</sup> bölgesinde görülen C-O gerilmesine bağlı ether grupların, süzöntü C<sub>A</sub>'nın FTIR grafiğinde de benzer bölgelerde bulunduğu tespit edilmiştir. Buna göre C<sub>A</sub>'nın bitüm modifikasyonunda kullanılması durumunda bağlayıcıda gözlenen değişimlerin kimyasal bir reaksiyondan

ziyade elektrostatik, van der Waals ve dipol-dipol etkileşimleri veya oluşan hidrojen bağları ile meydana geldiği düşünülmektedir.

### 3.8. Bitümlü Sıcak Karışım Deney Sonuçları

Modifiye edilmiş bağlayıcılara uygulanan deneylerde, granüler  $C_A$ 'nın ( $>0.063$  mm)  $0.063$  mm'den daha ince boyutlu  $C_A$ 'ya göre bitüm içerisinde çökeltme eğiliminde olduğu ve yüksek sıcaklıkta bitüm içerisindeki homojen dağılımını kaybettiği gözlenmiştir. Bu sebeple karışım deneylerinde  $C_A$  modifikasyonu amacıyla sadece  $0.063$  mm'den ince boyutlu  $C_A$  ile modifiye edilmiş bağlayıcılar, reçine modifikasyonu amacıyla ise bağlayıcı deneylerinde olduğu gibi %4, 5 ve 6 oranlarında reçine ile modifiye edilmiş bağlayıcılar kullanılmıştır. Karışım deneylerinde kullanılan karışım kodları ve modifiyer tipleri Tablo 26'da verilmiştir.

Tablo 26. Karışım deneylerinde kullanılan kodlar ve modifiyer tipleri

Karışım kodu	Modifiyer tipi	Modifiyer boyutu	Modifiyer oranı
K1	Orijinal bağlayıcı	-	-
K2	Furan reçinesi + Serter	-	%4
K3	Furan reçinesi + Serter	-	%5
K4	Furan reçinesi + Serter	-	%6
K5	$C_A$	$<0.063$	%10
K6	$C_A$	$<0.063$	%15
K7	$C_A$	$<0.063$	%20

#### 3.8.1. Marshall Stabilite Deneyi Sonuçları

Marshall stabilite deneyinde, agrega ağırlığına oranla %4-6.5 oranlarında orijinal ve modifiye bağlayıcı kullanılarak %0.5'lik artışlarla her bitüm içeriği için üçer adet Marshall briketi hazırlanmış, hazırlanan briketlerin yoğunluk-boşluk analizleri yapılarak stabilite ve akma değerleri elde edilmiştir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerine bağlı olarak Marshall oranları hesaplanmıştır. Marshall stabilite deneyinden elde edilen optimum bitüm içerikleri ve optimum bitüm içeriğindeki Marshall deneyi sonuçları Tablo 27'de verilmiştir.

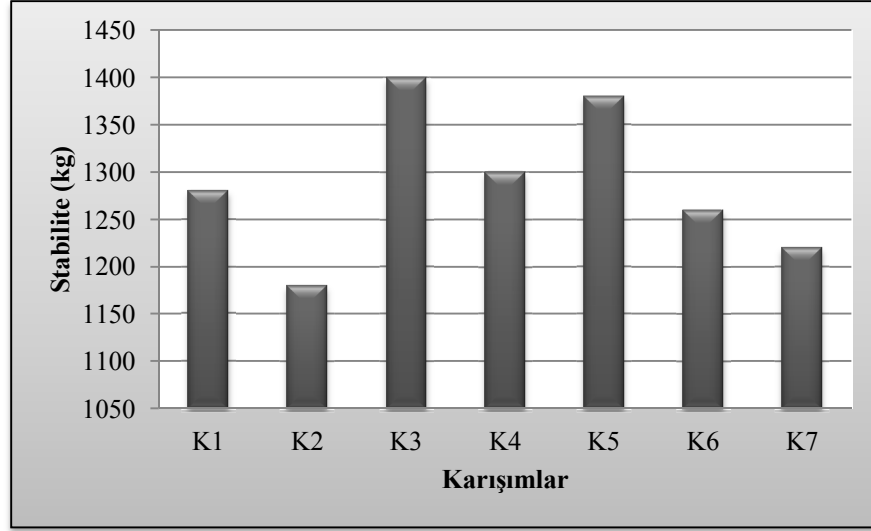
Tablo 27. Marshall stabilite deneyi sonuçları

Karışım No	Optimum bitüm (%)	Hacim özgül ağırlık (Dp)	Hava boşluğu (%) (Vh)	Asfaltla dolu boşluk (%) (Vf)	Agregalar arası boşluk (%) (VMA)	Stabilite (kg)	Akma (mm)	Marshall oranı (kg/mm)	Filler/Bitüm	Bağlayıcı özgül ağırlığı (Gb)
K1	4.5	2.451	3.2	74	13.2	1280	3.3	387.88	1.30	1.031
K2	4.5	2.446	3.6	73	13.4	1180	3	393.33	1.29	1.039
K3	4.4	2.454	3.5	73	13.1	1400	2.9	482.76	1.32	1.039
K4	4.5	2.448	3.6	74	13.5	1300	2.9	448.28	1.27	1.039
K5	4.7	2.444	3.6	73	13.5	1380	3.1	445.16	1.25	1.053
K6	4.8	2.446	3.6	73	13.7	1260	3	420.00	1.22	1.065
K7	4.9	2.436	3.8	73	14.1	1220	3	406.67	1.19	1.072

Tablo 27 incelendiğinde reçine modifiyeli bağlayıcılar ile hazırlanan karışımlarda optimum bitüm içeriği orijinal bağlayıcıya göre önemli bir değişme göstermezken  $C_A$  modifiyeli bağlayıcılar ile hazırlanan karışımlarda optimum bitüm içeriği %10,15 ve 20  $C_A$  içeriği için sırasıyla %4.4, 6.7 ve 8.9 oranlarında artmıştır. Sıkıştırılmış briketlere ait özgül ağırlıklar orijinal ve modifiyeli bağlayıcılar için önemli bir değişme göstermemiştir. Bağlayıcılara ait özgül ağırlıklar incelendiğinde her iki modifiyerinde orijinal bağlayıcının özgül ağırlığını artırdığı özellikle  $C_A$  modifikasyonunda bu artışın %4'e ulaştığı gözlenmiştir. Briketlere ait hava boşluğu oranları incelendiğinde hem reçine hem de  $C_A$  katkılı bağlayıcılar ile hazırlanan karışımların boşluk oranlarının arttığı görülmektedir. Şartname limitleri içerisinde kalan bu boşluk oranı artışının yüksek sıcaklıklarda etkili bir parametre olacağı, ağır taşıt trafiği ve yüksek sıcaklık sebebiyle kaplamada meydana gelebilecek terleme ve kasma olayları sonucunda açığa çıkacak bağlayıcının, oluşan bu boşluklara dolarak tekerlek izinde oturma dayanımına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

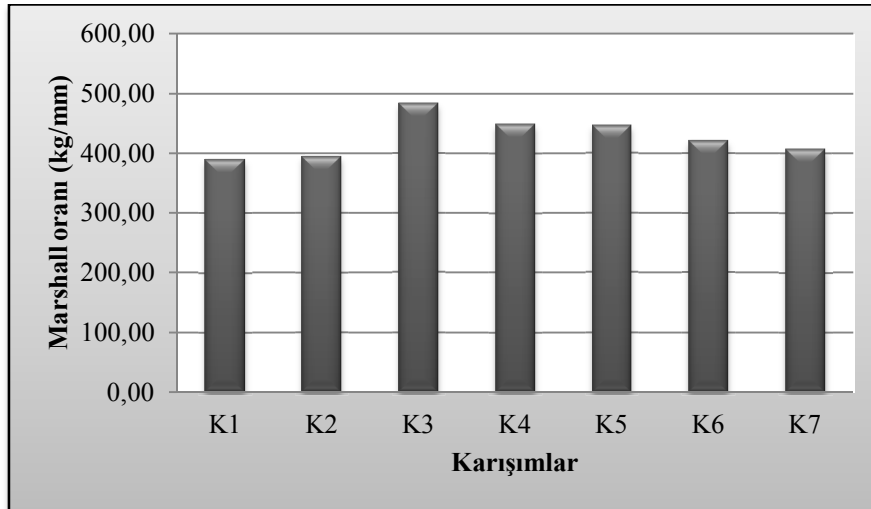
Briketlere ait stabilite değerleri incelendiğinde (Şekil 74) furan reçinesi modifikasyonunda %5 reçine oranının en yüksek stabilite değerini sağladığı ve orijinal bağlayıcı ile hazırlanmış karışımın stabilite değerini %9.4 oranında artırdığı belirlenmiştir.  $C_A$  modifikasyonunda ise %10  $C_A$  katılarak modifiye edilmiş bağlayıcı ile hazırlanan karışımın stabilite değerinin orijinal karışıma göre %7.8 arttığı ancak  $C_A$  oranı arttıkça stabilite değerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu stabilite kaybı, artan  $C_A$  miktarına bağlı olarak bitüm ile agrega arasındaki adezyonun zayıflaması ile açıklanabilir.





Şekil 74. Marshall stabilite değerleri

Marshall stabilitesinin akma oranı olarak hesaplanan ve karışımların tekerlek izi dayanımını karakterize eden Marshall oranları incelendiğinde (Şekil 75) bağlayıcının sertleşmesi ve dolayısıyla orijinal karışıma oranla akma değerlerinin düşmesine bağlı olarak Marshall oranları artmıştır. En yüksek Marshall oranına %5 reçine modifikasyonu ile ulaşılmış ve bu karışım için tekerlek izi dayanımı orijinal karışıma oranla %24.5 artış göstermiştir.



Şekil 75. Marshall oranları

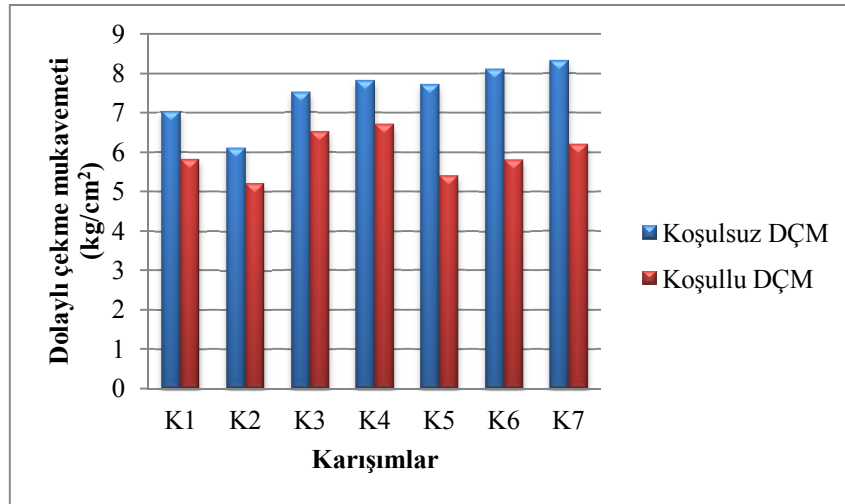
Marshall stabilite deneyinde üretilen briketlere ait özellikler ve optimum bitüm içeriklerinin bulunması amacıyla çizilen grafikler Ek Tablo 2-8'de ve Ek Şekil 1-7'de verilmiştir.

### 3.8.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti ve Modifiye Lottman Deneyi Sonuçları

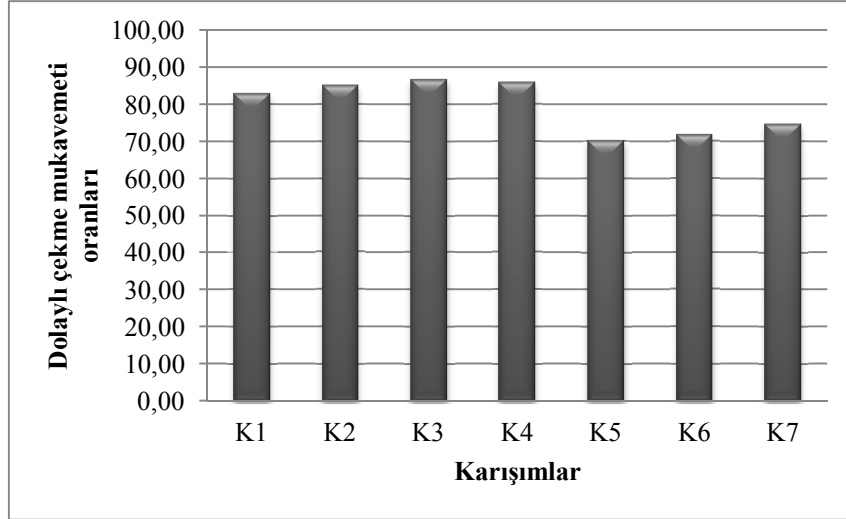
Marshall stabilite deneyinden elde edilen optimum bitüm içeriklerinde her bir karışım için üçer adet koşullu ve üçer adet koşulsuz olmak üzere toplam altı adet briket üretilmiş ve briketlere ait koşullu ve koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti değerleri hesaplanmıştır (Tablo 28). Hesaplanan değerlere göre koşullu ve koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti ve dolaylı çekme mukavemeti oranları grafikleri çizilmiştir (Şekil 76,77).

Tablo 28. Dolaylı çekme mukavemeti ve modifiye Lottman deneyi sonuçları

Karışım No	Koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti (kg/cm <sup>2</sup> )	Koşullu dolaylı çekme mukavemeti (kg/cm <sup>2</sup> )	Dolaylı çekme mukavemeti oranı
K1	7	5,8	82,86
K2	6,1	5,2	85,25
K3	7,5	6,5	86,67
K4	7,8	6,7	85,90
K5	7,7	5,4	70,13
K6	8,1	5,8	71,60
K7	8,3	6,2	74,70



Şekil 76. Koşullu ve koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti değerleri



Şekil 77. Dolaylı çekme mukavemeti oranları

Şekil 76 incelendiğinde  $C_A$  modifikasyonunun koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti değerleri bakımından orijinal ve reçine ile modifiye edilmiş karışımlara kıyasla daha yüksek değerler sağladığı ancak koşullandırma işlemi sonrasında bu değerlerin düştüğü gözlenmektedir. Hem  $C_A$  hem de furan reçinesi modifikasyonu için modifiyer oranının artması koşullu ve koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti değerlerini artırmıştır.

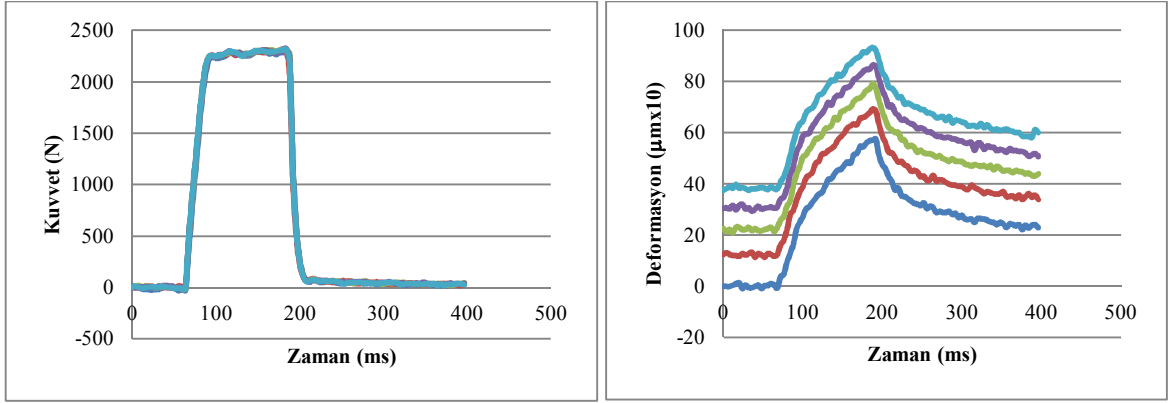
Şekil 77 incelendiğinde reçine ile modifiye edilmiş karışımların dolaylı çekme mukavemeti oranlarının orijinal karışıma oranla arttığı,  $C_A$  ile modifiye edilmiş karışımların dolaylı çekme mukavemeti oranlarının ise azaldığı ve Superpave şartname limiti olan %80 değerinin altında kaldığı gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre reçine modifikasyonunun bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı direncini artırdığı açıkça söylenebilir.

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi için hazırlanan briketlere ait özellikler ve deney sonuçları Ek Tablo 9-15'te verilmiştir.

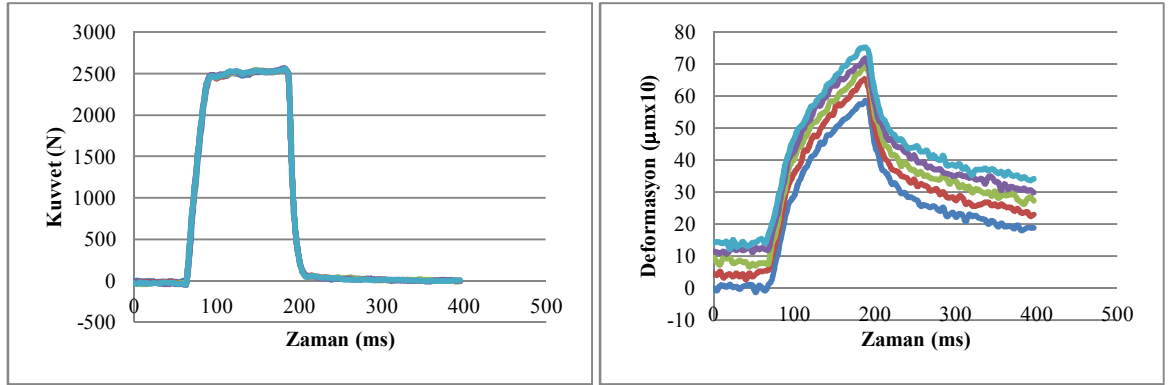
### 3.8.3. Dolaylı Çekme Deney Sonuçları

Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan karışımlara ait esneklik modülü değerlerinin belirlenmesi amacıyla 20°C sıcaklıkta dolaylı çekme deneyi uygulanmıştır. Numunelerin 0-400 ms arasındaki birim şekil değiştirme-zaman ve yük-zaman grafikleri Şekil 78-84'te esneklik modülü deney sonuçları ise Tablo 29'da ve Şekil 85'te verilmiştir. Birim şekil

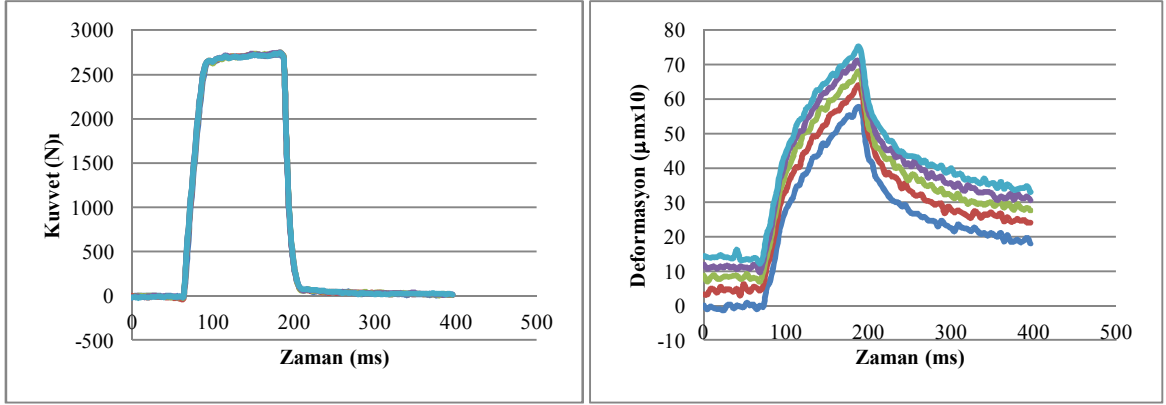
değiştirme-zaman ve yük-zaman grafikleri incelendiğinde yükün uygulanmaya başlanması ile numunede yatay deformasyonların artış gösterdiği, yük maksimumuna eriştiğinde hedef deformasyonun sağlandığı, yükün kalkması ile birlikte deformasyonların önemli bir kısmının geri dönmesine rağmen, numune üzerinde bir miktar kalıcı deformasyonun olduğu görülmektedir.



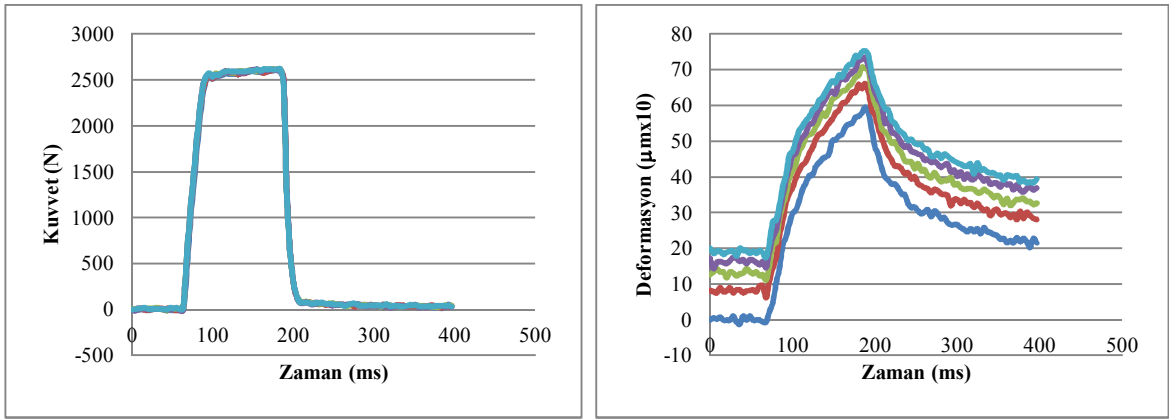
Şekil 78. Orijinal karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri



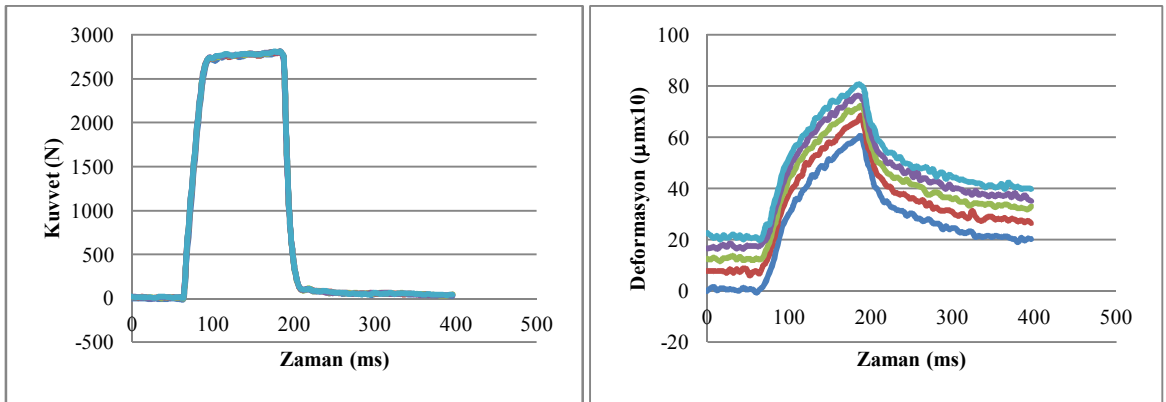
Şekil 79. %4 reçine katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri



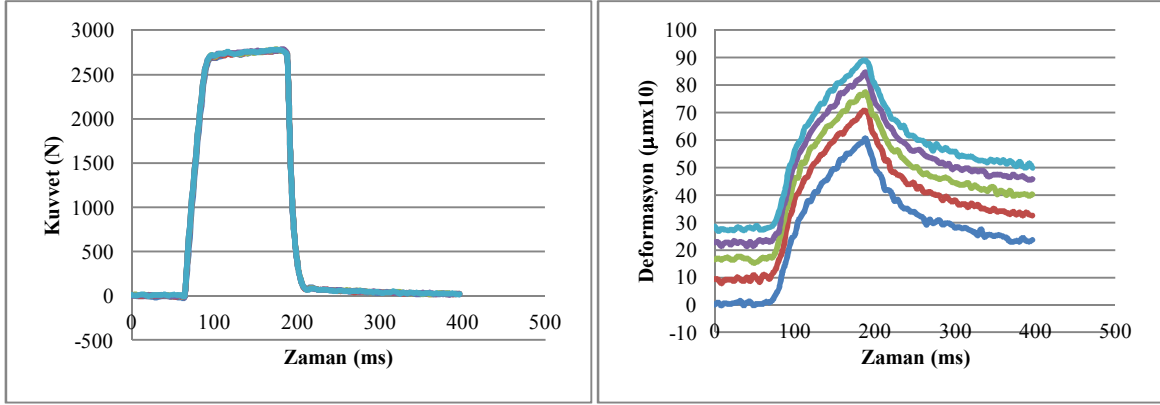
Şekil 80. %5 reçine katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri



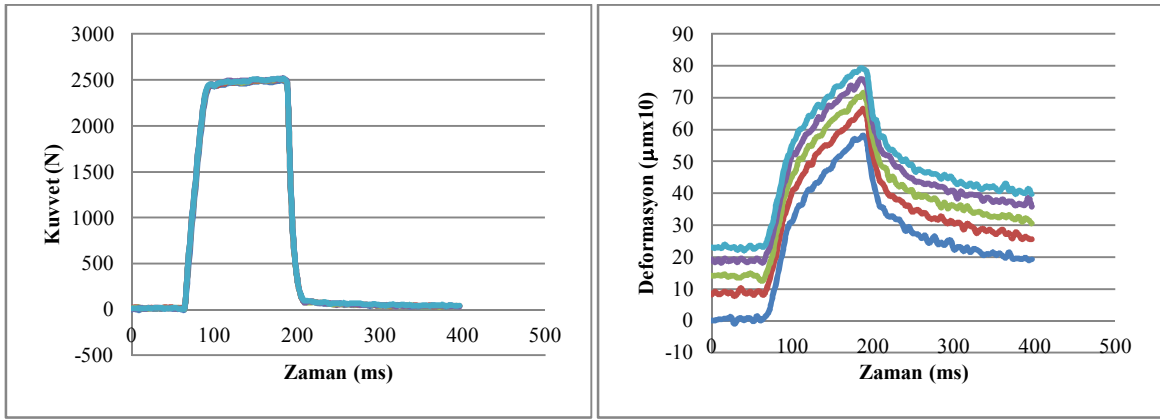
Şekil 81. %6 reçine katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri



Şekil 82. %10  $C_A$  katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri



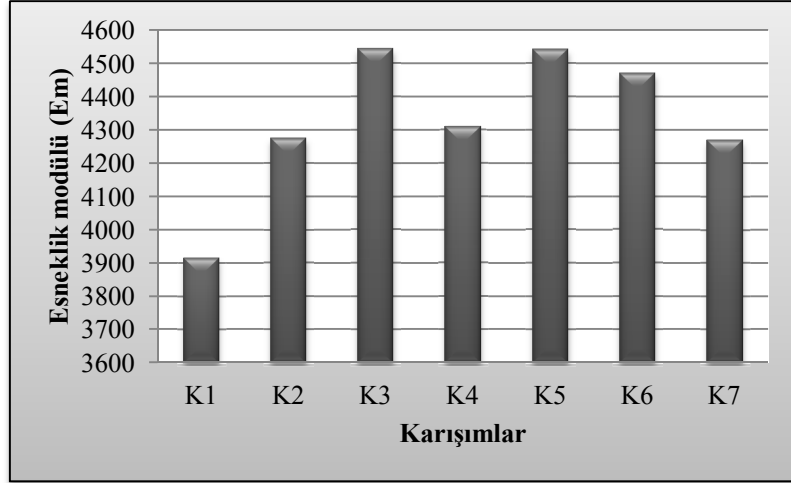
Şekil 83. %15 C<sub>A</sub> katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri



Şekil 84. %20 C<sub>A</sub> katkılı karışımın yük-zaman ve birim şekil değiştirme-zaman grafikleri

Tablo 29. Dolaylı çekme deney sonuçları

Karışım No	Briket No	Kalınlık (mm)	Em (Mpa)	Ortalama Em (Mpa)
K1	1	60.0	3874	3915
	2	61.2	3956	
K2	3	60.5	4292	4275
	4	61.0	4258	
K3	5	61.3	4305	4544
	6	61.4	4783	
K4	7	62.4	4468	4309
	8	63.0	4149	
K5	9	62.0	4901	4543
	10	63.1	4185	
K6	11	61.5	4546	4472
	12	61.5	4398	
K7	13	61.5	4227	4270
	14	61.6	4313	



Şekil 85. Esneklik modülü değerleri

Tablo 29 ve Şekil 85 incelendiğinde modifiye bağlayıcılar ile hazırlanmış tüm karışımların esneklik modülü değerlerinin orijinal karışıma göre yükseldiği gözlenmektedir. Furan reçinesi modifikasyonunda %5 reçine katkılı karışımın,  $C_A$  modifikasyonunda ise %10  $C_A$  katkılı karışımın esneklik modülü değerlerinin diğer karışımlardan yüksek olduğu ve bu karışımların, orijinal karışımın esneklik modülü değerini %16 oranında artırdığı belirlenmiştir. %4 ve 6 oranlarında reçine kullanılarak hazırlanan karışımların esneklik modülü değerleri orijinal karışıma göre daha yüksek olsa da %5 reçine modifikasyonuna göre bu değerlerin sırasıyla %6.3 ve %5.5 daha düşük olduğu belirtilebilir.  $C_A$  kullanılarak modifiye edilmiş karışımların esneklik modülü değerleri ise  $C_A$  oranının artmasına bağlı olarak azalmıştır. Bu azalma %10  $C_A$  ile %20  $C_A$  kullanımı arasında %6 olarak hesaplanmıştır.

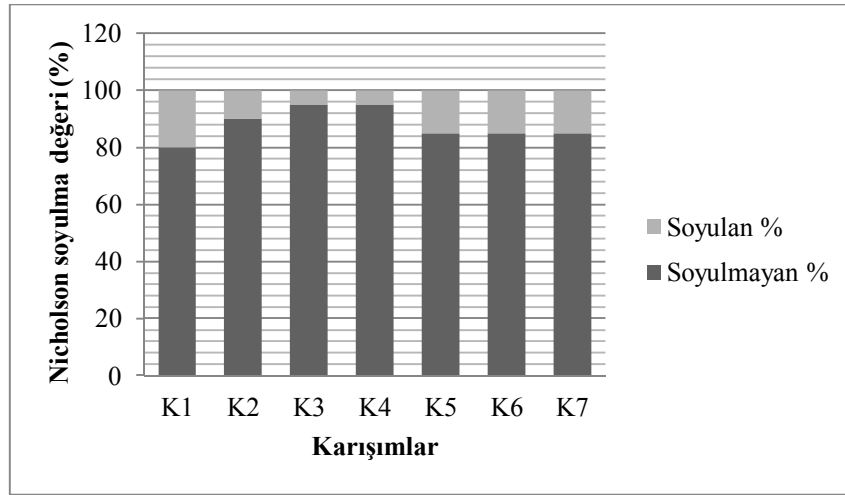
Bu sonuçlara göre genel anlamda furan reçinesi ve  $C_A$  modifikasyonunun, orijinal karışımın yük dağıtma kabiliyetini ve trafik yükleri altında oluşan yorulma çatlaklarına karşı gösterdiği dayanımı artırdığı söylenebilir.

#### 3.8.4. Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları

Karışımlarda kullanılan bağlayıcı ile agrega arasındaki adezyonun su etkisindeki değişimini incelemek amacıyla Nicholson soyulma deneyi yapılmış ve sonuçları Tablo 30'da ve Şekil 86'da verilmiştir.

Tablo 30. Nicholson soyulma değerleri

Karışım No	Nicholson soyulma değeri (%)
K1	80
K2	90
K3	95
K4	95
K5	85
K6	85
K7	85



Şekil 86. Nicholson soyulma değerleri

Sonuçlar incelendiğinde furan reçinesi kullanılarak modifiye edilmiş bağlayıcılar ile agrega arasındaki adezyonun özellikle %5 ve 6 reçine oranlarında orijinal bağlayıcıya oranla %18.8 oranında arttığı  $C_A$  ile modifiye edilen bağlayıcılarda ise bu değerin daha düşük olduğu gözlenmektedir. Bu sonuçlara göre özellikle furan reçinesinin agrega ile bitüm arasındaki adezyonu artıran ve soyulmayı önleyici özellikleri olan bir katkı malzemesi olduğu açıkça belirtilebilir.

### 3.8.5. Karışımların Ekonomik Analizi

Karışımlara ait ekonomik analiz yapılabilmesi amacıyla Marshall stabilite deneyinde bulunan optimum bitüm içerikleri kullanılmış ve bir biriket yapımı için gerekli olan bağlayıcı miktarı dikkate alınmıştır. Karışım hazırlanması sırasında kullanılan agrega miktarı değişmediğinden agrega maliyeti analize dahil edilmemiştir. Çalışmada kullanılan



$C_A$  laboratuvar ortamında üretilmiş olmasına karşın üretim maliyeti net olarak belirlenemediğinden (ürün verimliliği değişimi, sarfedilen enerjinin net olarak tespit edilememesi vb sebeplerle) objektif bir analiz çalışması yapmak amacıyla  $C_A$  birim maliyeti piyasadan edinilmiştir. Ekonomik analizde kullanılan birim fiyatlar ve fiyatların alındığı kurumlar Tablo 31’de belirtilmiştir.

Tablo 31. Ekonomik analizde kullanılan birim fiyatlar

Malzeme tipi	Birim fiyatı (KDV dahil) (TL/kg)	Fiyatın alındığı kurum
Bitüm (50/70 Kırıkkale Rafinerisi)	1.32	Tüpraş
Furan reçinesi (CS1077)	6.74	Çukurova Kimya Endüstrisi A.Ş.
Serter (CS30)	3.72	Çukurova Kimya Endüstrisi A.Ş.
Aktif karbon	6.76	Dizayn Su ve Çevre Teknolojileri Merkezi
Birim fiyatlar 07.03.2012 tarihi itibarıyla geçerli döviz kurları dikkate alınarak hesaplanmıştır		

Verilen birim fiyatlar üzerinden yapılan ekonomik analiz sonuçları Tablo 32’de verilmiştir. Tablo 32 incelendiğinde bitüm modifikasyonunun sıcak karışım üretim maliyetlerini artırdığı, reçine modifikasyonunda bu artışın %13-20 aralığında sınırlı kalmasına rağmen  $C_A$  modifikasyonunda maliyet artış oranının önemli ölçüde yükseldiği belirlenmiştir.

$C_A$ , furan reçinesi ile yaklaşık olarak eşit birim fiyata sahip olmasına rağmen oran olarak karışım içerisine daha fazla katılması ve optimum bitüm içeriğini yükseltmesine bağlı olarak kullanılan bitüm miktarını artırması sebepleriyle furan reçinesine kıyasla daha fazla maliyet artışına neden olmuştur.

Tablo 32. Karışımlara ait ekonomik analiz sonuçları

A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M
Karışım no	Karışımın optimum bitüm muhtevası (Agrega ağırlığına oranla)	Karışımında kullanılan toplam bağlayıcı miktarı (Oriijinal bağlayıcı+modifiyer+serter)	Karışımında kullanılan oriijinal bağlayıcı miktarı	Karışımında kullanılan modifiyer miktarı	Karışımında kullanılan serter miktarı	Bitüm birim fiyatı	Modifiyer birim fiyatı	Serter birim fiyatı	Bir briket için bağlayıcı maliyeti (DxG+ExH+FxI)	100 kg bitümlü sıcak karışım için bağlayıcı maliyeti (100/(1150+D))/1000xK	Orijinal karışım maliyetine kıyasla maliyet artış oranı
	(%)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(TL/gr)	(TL/gr)	(TL)	(TL)	(TL)	(%)
K1	4.5	51.75	51.75	0	0	0.00132	-	-	0.068	5.68	0
K2	4.5	51.75	49.76	1.53	0.46	0.00132	0.0067	0.0037	0.078	6.47	13.85
K3	4.4	50.60	48.19	1.85	0.56	0.00132	0.0067	0.0037	0.078	6.51	14.63
K4	4.5	51.75	48.82	2.25	0.68	0.00132	0.0067	0.0037	0.082	6.84	20.34
K5	4.7	54.05	49.14	4.91	0	0.00132	0.0068	-	0.098	8.15	43.41
K6	4.8	55.20	48.00	7.20	0	0.00132	0.0068	-	0.112	9.30	63.66
K7	4.9	56.35	46.96	9.39	0	0.00132	0.0068	-	0.125	10.40	83.12
Standart Marshall briketi için agrega ağırlığı 1150 gr olarak alınmıştır											

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Fındık kabuğu atıklarından elde edilen  $C_A$  ve bitkisel atıkların asidik hidrolizi ile elde edilen furfuraldan üretilmiş furan reçinesi ile modifiye edilmiş bağlayıcıların ve bitümlü sıcak karışımların performanslarının incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Fındık kabuğu atıklarına farklı derişimlerde asit ile muamale edilmesi sonucunda üretilen  $C_A$ 'ların yüzey fonksiyonel grupları incelendiğinde, asit derişimi farkının üretilen  $C_A$ 'ların kimyasal yapısında önemli bir değişikliğe sebep olmadığı belirlenmiştir. Üretilen  $C_A$ 'ların yüzey dokuları incelendiğinde düşük asit derişimleri ile hazırlanan numunelerin boşluk yapılarının mikro ve mezo boyutta olduğu, asit derişimi artırıldığında ise yüzeyde hem mikro ve mezo hem de makro boşlukların oluştuğu ve bu boşlukların  $C_A$  yüzeyine heterojen bir şekilde dağıldığı gözlenmiştir. Çalışmada optimum asit derişimi %30 olarak tespit edilmiş, bu derişimde hazırlanan  $C_A$ 'ların yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey alanlarının yeterli seviyede olduğu belirlenmiştir.
- Üç farklı boyutta (0.125-0.25 mm, 0.063-0.125 mm, <0.063 mm) elenen  $C_A$  numunler ve furan reçinesi orijinal bağlayıcı içerisine farklı oranlarda katılarak yumuşama noktası deneyleri uygulanmış ve modifiyerlerin orijinal bağlayıcı içerisine optimum katılma yüzdeleri elde edilmiştir. Buna göre  $C_A$  numunlerin %10 ve üzerindeki oranlarda furan reçinesinin ise %4 ve üzerindeki oranlarda orijinal bağlayıcı üzerinde daha etkili oldukları tespit edilmiştir. Modifiye bitüm hazırlanması sırasında karıştırma sıcaklığı 150°C olarak sabit tutulmuş ve farklı karıştırma süreleri denenerak karıştırma süresinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Buna göre 45 dk karıştırma süresinin hem  $C_A$  hem de furan reçinesi modifikasyonu için yeterli olduğu belirlenmiştir.
- Belirlenen optimum oran ve karıştırma süresinde hazırlanan modifiye bağlayıcılara ve orijinal bağlayıcıya uygulanan klasik bağlayıcı deneyleri sonucunda tüm modifiyerlerin orijinal bağlayıcının penetrasyon değerini düşürdüğü yumuşama noktasını ise artırdığı belirlenmiştir. Buna göre modifiyerlerin, orijinal bağlayıcının sertliğini ve kıvamlılığını artırdığı söylenebilir. Penetrasyon ve yumuşama noktası

değerlerine göre hesaplanan PI değerleri göz önüne alındığında modifikasyon işleminin (hem  $C_A$ 'nın hem de furan reçinesinin) orijinal bitümün sıcaklık hassasiyetini düşürdüğü gözlenmiştir. Bu aşamada PI değerleri incelendiğinde furan reçinesinin sıcaklık hassasiyeti üzerinde  $C_A$ 'ya göre çok daha etkili olduğu söylenebilir.

- Orijinal ve modifiye bağlayıcılara uygulanan düktilite deneyi sonucunda furan reçinesi ve 0.063 mm'den daha ince boyutta elenmiş  $C_A$  ile modifiye edilmiş bağlayıcıların düktilite değerlerinin orijinal bağlayıcıya göre değişmediği ancak 0.063 mm üzerinde elenmiş  $C_A$ 'larla hazırlanmış bağlayıcıların düktilite değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Buna göre granüler boyutta kullanılan  $C_A$ 'ların bitüm kohezyonunu düşürücü bir etki yaptığı söylenebilir.
- Orijinal ve modifiye bağlayıcılara uygulanan parlama noktası deneyinde tüm modifiyerlerin orijinal bitümün parlama noktası değerini artırdığı ve şantiyede kullanımı sırasında iş güvenliği açısından bir tehlike oluşturmayacağı belirlenmiştir.
- Bağlayıcıların yaşlanma karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla uygulanan TFOT deneyinde hem  $C_A$  hem de furan reçinesi modifikasyonunun orijinal bağlayıcının yaşlanmasını geciktirdiği belirlenmiştir. Özellikle 0.063 mm'den ince boyutta  $C_A$  modifikasyonun yaşlanma özellikleri üzerinde çok daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Yaşlandırılmış numunelere uygulanan penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerine bağlı olarak hesaplanan PI değerleri incelendiğinde furan reçinesi modifikasyonunun sıcaklık hassasiyeti üzerinde yaşlandırılmamış numunelerde olduğu gibi daha etkili olduğu görülmüştür.
- DSR sonuçları incelendiğinde orijinal bağlayıcının yüksek sıcaklık performans seviyesi 64°C olarak belirlenmiştir.  $C_A$  modifikasyonunda modifiyer oranının %10 olduğu karışımlarda yüksek sıcaklık performans seviyesi 70°C'ye yükselirken diğer  $C_A$  oranlarında ve tüm furan reçinesi oranlarında yüksek sıcaklık performans seviyesinin iki sınıf yükseldiği ve 76°C'ye ulaştığı tespit edilmiştir. Hem  $C_A$  hem de furan reçinesi modifikasyonunda modifiyer oranının artması yüksek sıcaklıktaki performansı artırmıştır. Orijinal ve modifiye bağlayıcılara ait faz açıları incelendiğinde tüm bağlayıcıların faz açılarının yüksek olduğu ve viskoz davranışa daha yatkın oldukları belirlenmiştir. Ancak furan reçinesi katkılı bağlayıcıların

diğer bağlayıcılara oranla faz açılarının daha düşük olduğu ve furan reçinesinin elastik davranışa katkı sağlayan bir modifiyer olduğu da gözlenmiştir.

- Bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki işlenebilirliklerinin tespiti amacıyla yapılan RV deneyinde  $C_A$  ve furan reçinesi modifikasyonlarının, orijinal bağlayıcının sertliğini artırdığı ve işlenebilirliğini azalttığı tespit edilmiştir. 0.125-0.25 mm boyutundaki  $C_A$ 'ların kullanımı diğer modifiyerlere kıyasla daha düşük RV değerleri sağlamış ve bu durum granüler  $C_A$ 'ların yüksek sıcaklıkta çökeldiği ve bitüm içerisindeki homojenliğini kaybettiği sonucunu doğurmuştur.
- Modifikasyonda kullanılan  $C_A$ 'ların bitüm ile karıştırılması sonucunda kimyasal bir değişime uğrayıp uğramadıklarını tespit etmek amacıyla karışımdan süzülen aktif karbonlara FTIR analizi uygulanmış ve sonuçlar bitüm içerisine karıştırılmayan  $C_A$ 'ların analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma neticesinde süzülen  $C_A$  ve saf  $C_A$ 'ların yüzey fonksiyonel gruplarının birbirine benzer olduğu ve bitüm ile karıştırılması sonucunda kimyasal bir değişime uğramadığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Düktilite ve RV sonuçları dikkate alındığında granüler aktif karbonların bağlayıcı içerisinde yüksek sıcaklıkta çökme eğiliminde oldukları belirlenmiş; bu bağlamda karışım deneyleri için sadece 0.063 mm'den daha ince boyuttaki  $C_A$ 'ların kullanılmasına karar verilmiştir.
- Marshall stabilite deneyi sonuçları incelendiğinde %5 furan reçinesi ve %10  $C_A$  katkılı karışımların stabilite değerlerini önemli derecede artırdıkları ve sırasıyla %9.4 ve 7.8 oranlarında stabilite artışı sağladıkları tespit edilmiştir. Tekerlek izi dayanımını karakterize eden Marshall oranı değerleri incelendiğinde de %5 furan reçinesi katkısının karışımın tekerlek izi dayanımını %24.5 artırdığı belirlenmiştir.
- Karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını tespit etmek amacıyla yapılan su hasarı (modifiye Lottman) deney sonuçlarına göre furan reçinesi katkılı karışımların orijinal karışıma göre nem hasarına karşı direncini artırdığı ve Superpave şartname limiti olan %80 değerini sağladığı görülmektedir. Ancak,  $C_A$  katkılı karışımlarda bu değerlerin %70 seviyelerinde kaldığı belirlenmiştir.
- Dolaylı çekme deney sonuçları incelendiğinde tüm modifiyerlerin orijinal karışıma kıyasla esneklik modülü değerlerini yükselttiği ve bu yükselişin %5 furan reçinesi ve %10  $C_A$  modifikasyonları için %16 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Bu

sonuçlara göre her iki modifiyerin de karışımların yük dağıtma kabiliyetlerini ve tekrarlı trafik yükleri altında yorulma dayanımlarını artırdığı söylenebilir.

- Karışımlarda kullanılan bitüm ile agrega arasındaki adezyonun su etkisi altındaki değişimini incelemek amacıyla yapılan Nicholson deney sonuçlarına göre furan reçinesinin özellikle %5 ve 6 oranlarında kullanılması durumunda bitüm-agrega adezyonunu %18.8 oranında artırdığı belirlenmiştir.
- Modifiye Lottman ve Nicholson deney sonuçları beraber değerlendirildiğinde furan reçinesinin nem hasarına karşı direnci artıran ve soyulmayı önleyen önemli bir katkı malzemesi olduğu söylenebilir.
- Karışımlara ait ekonomik analiz sonuçları incelendiğinde her iki modifiyerinde karışımlarda kullanılan bağlayıcı maliyetini artırdığı ancak bu artışın furan reçinesi için %13-20 gibi makul seviyelerde iken  $C_A$  için %43-83 seviyelerine çıktığı belirlenmiştir.  $C_A$ 'nın bu çalışmada olduğu gibi yerli hammaddeden üretilmesi ve dışarıdan ithal edilmemesi durumunda birim fiyatlarının azalacağı ve daha makul fiyatlar ile modifikasyon amaçlı kullanılabilmesi düşünülmektedir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar dikkate alındığında kullanılan her iki modifiyerin de bitüm modifikasyonunda olumlu etkilere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma baz alınarak yapılacak ileriki çalışmalarda aşağıda sıralanan hususlar dikkate alınabilir:

- Çalışmada kullanılan her iki modifiyerin de bitümün sertliğini artırdığı ve elastik davranışı üzerinde etkili olduğu, ancak, bu çalışmada kullanılan modifiyerlerin, SBS, SBR ve EVA gibi polimerler ile birlikte kullanılarak bağlayıcı ve karışım performansının (karışım rijitliği ve elastik özelliklerinin) daha da geliştirilmesini esas alan araştırma çalışmalarının yapılabileceği düşünülmektedir.
- Çalışmada tek bir agrega türü ile yapılan karışım deneyleri, soyulmaya karşı direnç ve yüksek adezyon kabiliyeti gibi olumlu özellikleri sebebiyle furan reçinesi modifiyeli bağlayıcılar ve farklı kökenli agregalar ile hazırlanmış karışımlara da uygulanmak suretiyle farklı kökenli agregalarla birlikte karışım performansı araştırılabilir.
- Kullanılan modifiyerlerin bağlayıcı sertliğini artırması sebebiyle özellikle daha yumuşak bağlayıcılar (70/100 veya 160/220 gibi) üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- $C_A$  modifikasyonunda belirlenen yüksek maliyetin düşürülmesi amacıyla  $C_A$  üretim maliyetinin düşürülmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.

- Furan reçinesinin bitüm ile karıştırılması sırasında meydana gelen reaksiyonlar sebebiyle gözlemlenen karıştırma problemlerinin şantiyedeki karıştırma sırasında meydana gelmemesi için alınacak önlemler belirlenmelidir. Bu kapsamda karışım modifikasyonunu esas alan çalışmalar yapılarak elde edilecek sonuçların bu çalışma sonuçları ile karşılaştırılmasının yerinde olacağı düşünülmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Geçkil, T., Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
2. Kök, B.V., Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007.
3. Yılmaz, M. ve Kök, B.V., Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 23,4 (2008) 811-819.
4. T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı Ulaşım Etütleri Şubesi Müdürlüğü, Karayolu Ulaşım İstatistikleri (2010), Ankara, 2011.
5. <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx>, Yol Ağı Bilgileri, 09 Şubat 2012.
6. Ahmedzade, P., Alataş, T. ve Geçkil, T., Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı, İMO Teknik Dergi, 297 (2008) 4493-4507.
7. Ahmedzade, P., Alataş, T. ve Geçkil, T., The Effect of Carbon Black on the Mechanical Properties of Asphalt Mixtures, Sigma, 25, 2 (2007) 179-189.
8. Atasagun, N., Piroliz Yöntemi Kullanılarak Sıvılaştırılmış Çörekotu Küspesi ile Modifiye Edilen Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009.
9. Çubuk, M., Gürü, M. ve Çubuk, M.K., Improvement of Bitumen Performance with Epoxy Resin, Fuel, 88 (2009) 1324-1328.
10. Namlı, R. ve Kuloğlu N., Farklı Tasarım Yöntemlerine Göre Hazırlanmış Asfalt Beton Numunelerin Rijitliği, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der., 18,2 (2006) 235-241.
11. Habib, N.Z., Kamaruddin, I., Napiah, M. ve Tan, I.M., Rheological Properties of Polyethylene and Polypropylene Modified Bitumen, World Academy of Science, Engineering and Technology, 72 (2010).
12. Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M., Polyester Reçinenin Bitümlü Bağlayıcıların Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesi Üzerindeki Etkisi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24, 1-2 (2008) 227-240.



13. Arabani, M., Mirabdolazimi, S.M. ve Sasani, A.R., The Effect of Waste Tire Thread Mesh on the Dynamic Behaviour of Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 24 (2010) 1060-1068.
14. Yildirim, Y., Polymer Modified Asphalt Binders, Construction and Building Materials, 21 (2007) 66-72.
15. Romeo, E., Birgisson, B., Montepara, A. ve Tebaldi, G., The Effect of Polymer Modification on Hot Mix Asphalt Fracture at Tensile Loading Conditions, International Journal of Pavement Engineering, 11,5 (2010) 403-413.
16. Zhang, J., Wang, J., Wu, Y., Wang, Y. ve Wang, Y., Evaluation of the Improved Properties of SBR/Weathered Coal Modified Bitumen Containing Carbon Black, Construction and Building Materials, 23 (2009) 2678-2687.
17. Chebil, S., Chaala, A. ve Roy, C., Use of Softwood Bark Charcoal as a Modifier for Road Bitumen, Fuel, 79 (2000) 671-683.
18. Yousefi, A.A., Ait-Kadi, A. ve Roy, C., Effect of Used-Tire-Derived Pyrolytic Oil Residue on the Properties of Polymer-Modified Asphalts, Fuel, 79 (2000) 975-986.
19. Apeageyi, A.K., Laboratory Evaluation of Antioxidants for Asphalt Binders, Construction and Building Materials, 25 (2011) 47-53.
20. Huang, Y., Bird, R.N. ve Heidrich, O., A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements, Resources Conservation and Recycling, 52 (2007) 58-73.
21. Hınıslioğlu, S. ve Ağar, E., Use of Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix, Materials Letters, 58 (2004) 267-271.
22. Sengoz, B. ve Topal, A., Use of Asphalt Roofing Shingle Waste in HMA, Construction and Building Materials, 19 (2005) 337-346.
23. Kk, B.V., Yılmaz, M. ve Yılmaz M., Sivas Divriği elik Crufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliği, C.. Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi, 30,1 (2009).
24. Lu, X. ve Redelius, P., Effect of Bitumen Wax on Asphalt Mixture Performance, Construction and Building Materials, 21 (2007) 1961-1970.
25. Akbulut, H. ve Grer C., Use of Aggregates produced from Marble Quarry Waste in Asphalt Pavements, Building and Environment, 42 (2007) 1921-1930.
26. Su, N. ve Chen, J.S., Engineering Properties of Asphalt Concrete Made with Recycled Glass, Resources, Conservation and Recycling, 35 (2002) 259-274.
27. Karaşahin, M. ve Terzi, S., Evaluation of Marble Waste Dust in the Mixture of Asphaltic Concrete, Construction and Building Materials, 21 (2007) 616-620.

28. Do, H.S., Mun, P.H. ve Keun, R.S., A Study on Engineering Characteristics of Asphalt Concrete Using Filler with Recycled Waste Lime, Waste Management, 28 (2008) 191-199.
29. Yildirim, Y., Hazlett, D. ve Davio, R., Toner-Modified Asphalt Demonstration Projects, Resources, Conservation and Recycling, 42 (2004) 295-308.
30. Anurag, K., Xiao, F. ve Amirkhanian, S.N., Laboratory Investigation of Indirect Tensile Strength Using Roofing Polyester Waste Fibers in Hot Mix Asphalt, Construction and Building Materials, 23 (2009) 2035-2040.
31. Çelik, O.N., Öğütölmüş Atık Otomobil Lastiğiyle Modifiye Edilmiş Bitümler ile Yapılan Asfalt Betonunun Yorulma Davranışı, Turk J Engin Environ Sci, 25 (2001) 487-495.
32. Özçimen, D. ve Ersoy-Meriçboyu, A., Fındık Kabuğu Karbonizasyon Sonuçlarının İstatistiksel Değerlendirilmesi, İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 8,1 (2009) 116-124.
33. Mutlu, S.F., İki Basamaklı Tepkime ile Sıvı Özütlemeli Yöntem Kullanılarak Fındık Tohum Kabuklarından Furfural Üretimi İçin En Uygun Koşulların İstatistik yöntem ile Belirlenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 25,1 (2010) 21-26.
34. Çöteli-Aslan, B., Fındık Kabuklarından Tek Kademeli Özütlemeli Sistemde Furfural Üretimi İçin Uygun Koşulların Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
35. Şen, N., Fındık Kabuklarından Aktif Karbon Eldesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2009.
36. Çuhadar, Ç., Fındık Kabuğu ve Fındık Çotanağından Aktif Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
37. Hayashi, J., Kazehaya, A., Muroyama, K. ve Watkinson, A.P., Preperation of Activated Carbon from Lignin by Chemical Activation, Carbon, 38 (2000) 1873-1878.
38. Guo, J., Xu, W.S., Chen, Y.L. ve Lua, A.C., Adsorption of NH<sub>3</sub> onto Activated Carbon Prepared from Palm Shells Impregnated with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Journal of Colloid and Interface Science, 281 (2005) 285-290.
39. Sengoz, B. ve Isikyakar, G., Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen, Construction and Building Materials, 22 (2008) 1897-1905.
40. Kök, B.V., Yılmaz, M. ve Güler, M., Evaluation of High Temperature Performance of SBS+Gilsonite Modified Binder, Fuel, 90 (2011) 3093-3099.

41. Görkem, İ.Ç. ve Şengöz, B, Polimer Modifiye Bitümlerle Elde Edilen Sıcak Karışımların Suya Karşı Duyarlılıklarının İncelenmesi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 10,3 (2008) 59-72.
42. Yılmaz, M. ve Ahmedzade, P., Saf ve SBS Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Kısa Dönem Yaşlanmadan Sonraki Özelliklerinin İki Farklı Yaşlandırma Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 23,3 (2008) 569-575.
43. Kumar, P. ve Garg, R., Rheology of Waste Plastic Fibre-Modified Bitumen, International Journal of Pavement Engineering, 12,5 (2011) 449-459.
44. Kök, B.V., Yılmaz, M. ve Kuloğlu, N., Asfaltın Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi, İMO Teknik Dergi, 371 (2012) 5813-5826.
45. Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S.S. ve Yadollahi, G., Technical Study on the Iranian Gilsonite as an Additive for Modification of Asphalt Binders Used in Pavement Construction, Construction and Building Materials, 25 (2011) 1379-1387.
46. Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K. ve Çubuk, M., Improvement of Bitumen and Bituminous Mixtures Performances by Triethylene Glycol Based Synthetic Polyboron, Construction and Building Materials, 25 (2011) 3863-3868.
47. Chala, A., Ciochina, O.G. ve Roy, C., Vacuum Pyrolysis of Automobile Shredder Residues: Use of Pyrolytic Oil as a Modifier for Road Bitumen, Resources, Conservation and Recycling, 26 (1999) 155-172.
48. Goh, S.W., Akin, M., You, Z. ve Shi, X., Effect of Deicing Solutions on the Tensile Strength of Micro-or Nano- Modified Asphalt Mixture, Construction and Building Materials, 25 (2011) 195-200.
49. Tunç, A., Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2007.
50. Çubuk, M., Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
51. Doğan, M., Polimer Katkı Maddelerinin Bitüm Bazlı Kompozitlerin Fiziksel Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
52. Whiteoak, D., Shell Bitüm El Kitabı, Lav, A.H. ve Lav, A., İsfalt Bilimsel Yayın No:3, İstanbul, 2004.
53. Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K. ve Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, Asfalt ve Uygulamaları, İsfalt Bilimsel Yayın No:1, İstanbul, 2001.

54. Michalica, P., Kazatchkov, I., Stastna, J. ve Zanzotto, L., Relationship Between Chemical and Rheological Properties of Two Asphalt of Different Origins, Fuel, 87 (2008) 3247-3253.
55. Sayın, E. ve Tanyıldızı, H., Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğinin Bulanık Mantık ile Bulunması, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 21,4 (2006) 645-649.
56. Kuloğlu, N., Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler, Turk J Engin Environ Sci, 25 (2001) 61-67.
57. Arıkan Öztürk, E. ve Çubuk, M.K., Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 19,2 (2004) 175-184.
58. Altaş, Ö.Y., Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
59. Avcı, E., sıcak İklimli Bölgelerde Kullanılan Asfalt Beton Karışım Değişkenlerinin Kaplama Tabakası Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2009.
60. Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara, 2006.
61. Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Geçkil, T., Superpave Sistemine Göre Uygulama Bölgesine Uygun Bağlayıcı Seçimi: Bingöl Örneği, Sigma, 25,4 (2008) 338-348.
62. Geçkil, T., Alataş, T. ve Ahmedzade, P., Superpave Sisteminde Bölge Meteorolojik Hava Verileri Kullanılarak Performans Dereceli (PG) Bağlayıcı Sınıfı Seçimi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 27(1) (2011) 88-106.
63. Hadavand, B.S., Bitumen Modification with Polysulphide Polymer Prepared from Heavy End Waste, Iranian Polymer Journal, 19(5) (2010) 363-373.
64. Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M., Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlandırılmasında Kullanılan Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23, 1-2 (2007) 112-126.
65. Oruç, Ş., Torul Kalker Taşocağı Agregalarının Asfalt Beton İçerisindeki Performansının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1997.
66. Yılmaz, M., Polyester Reçinenin Bitüm ve Bitümlü sıcak Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2005.
67. Ekşioğlu Üstünkol, F.N., Endüstriyel Atıkların Esnek Yol Üstyapısında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2006.

68. Alataş, T., Ahmedzade, P. ve Doğan, Y., Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agrega Cinsinin Kaplamanın Fiziksel Özelliklerine Etkisi, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der., 18, 1 (2006) 81-89.
69. Umar, F. ve Ağar, E., Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1985.
70. Önal, M.A. ve Kahramangil M., Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1993.
71. Gençtürk, G., Sönmüş Kireç ile Çimento ve Pr Plast Kullanımının Asfalt Kaplamaların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011.
72. Kutluhan, S., Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunun Modellenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
73. Çetin, A., Bitümlü Sıcak Karışımların Deformasyon Direncinin Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deneyi ile İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
74. Hunter, E.R. ve Ksaibati, K., Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes, Department Civil and Architectural Engineering University of Wyoming, Laramie, 2002.
75. Şengöz, B., Asfalt Film Kalınlığının Bitümlü Karışımların Yaşlanmasına ve Suya Duyarlılığına Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
76. Arslan, Y., Fındık Kabuğunun Etil Alkol Üretiminde Kullanılabilirliği, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
77. Özçimen, D., Çeşitli Bitkisel Atıkların Karbonizasyon Yoluyla Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
78. Tozoğlu, A., Şahin, H.İ. ve Bekar, İ., Tarımsal Atık Bileşenlerinden Kimyasal ve Enerji Üretiminde Faydalanma, 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Mayıs, 2009, Karabük, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 38-44.
79. Demirbaş, A., Furfural Production from Fruit Shells by Acid-Catalyzed Hydrolysis, Energy Sources, Part A, 28 (2006) 157-165.
80. Akyıldız, H., H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> Aktivasyonu ile Zeytin Çekirdeğinden Aktif Karbon Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.

81. Aygün, A., Karakaş-Yenisoy, S. ve Duman, I., Production of Granular Activated Carbon from Agricultural Wastes and Determination of Their Physical, Chemical and Adsorption Properties, Key Engineering Materials, 264,268 (2004) 2287-2292.
82. Khah, A.M. ve Ansari, R., Activated Charcoal: Preperation, Characterization and Applications: A Review Article, International Journal of Chem Tech Research, 1,4 (2009) 859-864.
83. [http://www.deltamedarge.com.tr/cfiles/file/FTIR\\_Spektroskopisi.pdf](http://www.deltamedarge.com.tr/cfiles/file/FTIR_Spektroskopisi.pdf), FTIR Spektroskopisi, 21 Nisan 2009
84. Thermo Nicolet Corporation, Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry, 2001.
85. Sangarunlert, W., Piumsomboon, P. ve Ngamprasertsith, S., Furfural Production by Acid Hydrolysis and Supercritical Carbon Dioxide Extraction from Rice Husk, Korean J.Chem. Eng., 24, 6 (2007) 936-941.
86. Mansilla, H.D., Baeza, J., Urzua, S., Maturana, G., Villasenor, J. ve Duran, N., Acid-Catalysed Hydrolysis of Rice Hull: Evaluation of Furfural Production, Bioresource Technology, 66 (1998) 189-193.
87. Aytakin, G., İki Kademeli Tepkime ile Şeker Pancarı Küspesinden Sıvı Özütlemeli Yöntemle Furfural Üretimi İçin En Uygun Sıcaklık ve Asit Derişiminin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
88. Sabio, M.M. ve Reinoso, F.R., Role of Chemical Activation in the Development of Carbon Porosity, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 241 (2004) 15-25.
89. Çetinkaya, E., Zeytin Çekirdeğinden Üretilen Aktif Karbonun Baca Gazı Desülfirizasyonunda Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2009.
90. Kim, D.S., Activated Carbon from Peach Stones Using Phosphoric Acid Activation at Medium Temperatures, Journal of Environmental Science and Health Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, A39,5 (2004) 1301-1318.
91. Geçkil, T., Alataş, T. ve Ahmedzade, P., Siyah Karbonun Bitümün Tekerlek İzi Dayanımı Üzerindeki Etkisi, 6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium, Mayıs, 2011, Elazığ, Turkey.

## 6. EKLER

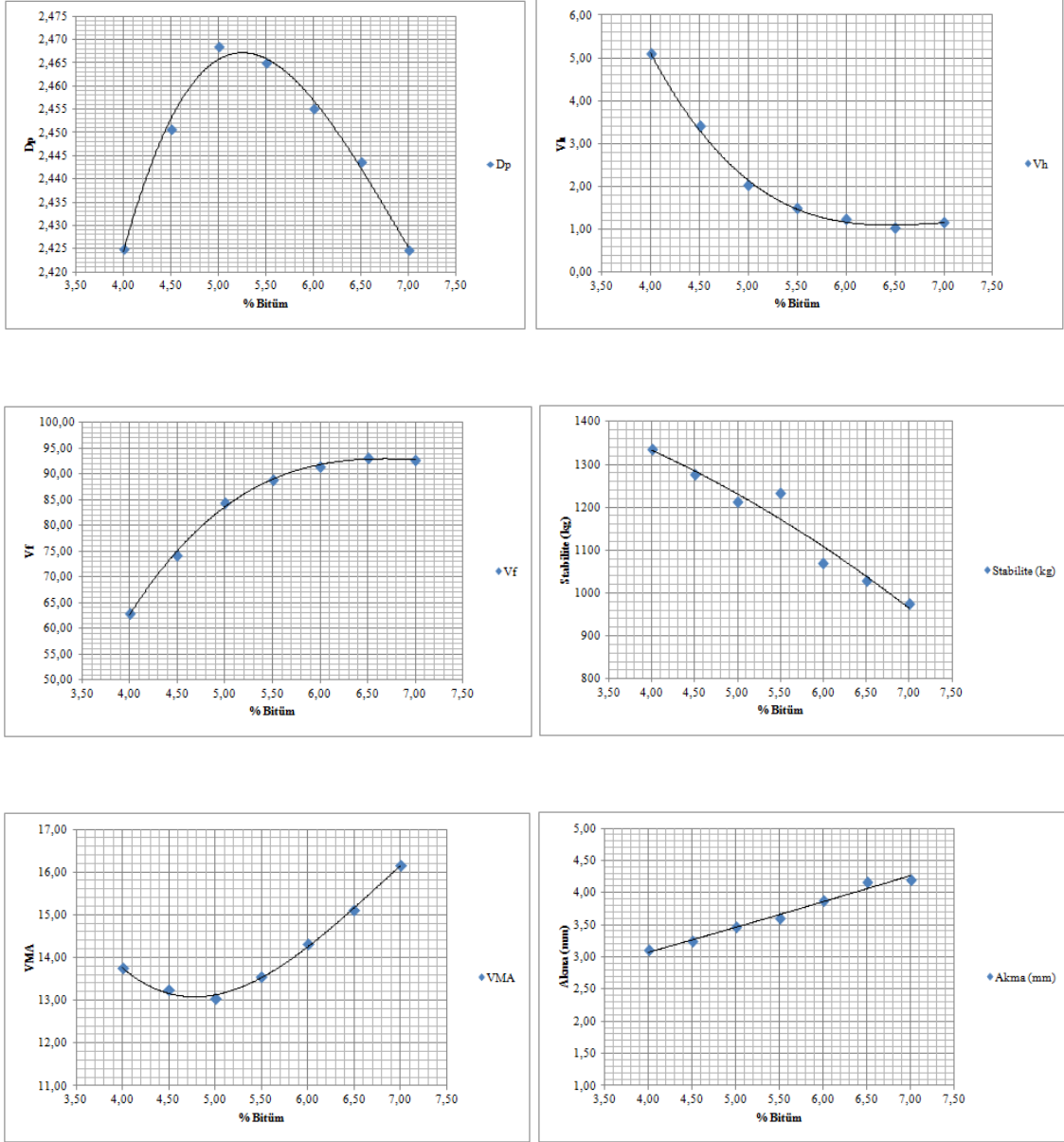
Ek Tablo 1. Marshall stabilite düzeltme katsayıları

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

Ek Tablo 2. Orijinal karışıma (K1) ait Marshall föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüzey	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Ar.	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzl.	Düzeltilmiş
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	(kg)
1	4,00	46	61,9	62,3	62,8	62,3	1193,1	703,9	1196,6	492,7	2,422					3,10	1326	1,030	1366
2	4,00	46	61,2	60,8	60,6	60,9	1192,5	704,4	1196,9	492,5	2,421					3,10	1214	1,071	1300
3	4,00	46	61,9	62,5	61,9	62,1	1195,3	706,0	1197,5	491,5	2,432					3,10	1298	1,035	1343
											<b>2,425</b>	<b>2,555</b>	<b>5,10</b>	<b>13,74</b>	<b>62,89</b>	<b>3,10</b>			<b>1336</b>
4	4,50	51,75	61,6	61,0	60,8	61,1	1198,9	713,0	1200,9	487,9	2,457					3,30	1210	1,065	1289
5	4,50	51,75	61,6	61,6	61,4	61,5	1201,1	711,4	1202,8	491,4	2,444					3,20	1208	1,053	1272
6	4,50	51,75	61,3	61,2	61,6	61,4	1201,5	712,6	1202,8	490,2	2,451					3,20	1199	1,056	1266
											<b>2,451</b>	<b>2,537</b>	<b>3,41</b>	<b>13,23</b>	<b>74,26</b>	<b>3,23</b>			<b>1276</b>
7	5,00	57,5	61,2	60,8	61,3	61,1	1205,9	717,8	1206,2	488,4	2,469					3,40	1174	1,065	1250
8	5,00	57,5	61,3	60,8	61,2	61,1	1204,9	717,9	1205,6	487,7	2,471					3,50	1176	1,065	1253
9	5,00	57,5	61,5	60,8	61,0	61,1	1205,2	717,1	1205,8	488,7	2,466					3,50	1068	1,065	1138
											<b>2,469</b>	<b>2,520</b>	<b>2,03</b>	<b>13,02</b>	<b>84,41</b>	<b>3,47</b>			<b>1214</b>
10	5,50	63,25	61,7	61,3	61,3	61,4	1209,9	718,7	1210,4	491,7	2,461					3,50	1214	1,056	1282
11	5,50	63,25	60,8	61,4	60,6	60,9	1209,6	720,1	1210,4	490,3	2,467					3,70	1162	1,071	1245
12	5,50	63,25	61,3	61,1	60,6	61,0	1212,9	721,9	1213,4	491,5	2,468					3,60	1096	1,068	1171
											2,465	2,503	1,50	13,55	88,96	<b>3,60</b>			<b>1232</b>
13	6,00	69	61,1	61,8	61,8	61,6	1214,8	720,4	1215,4	495,0	2,454					3,90	1013	1,049	1063
14	6,00	69	61,7	61,2	61,6	61,5	1214,3	720,6	1214,9	494,3	2,457					3,80	996	1,053	1049
15	6,00	69	61,6	61,3	62,0	61,6	1213,0	719,2	1213,3	494,1	2,455					3,90	1044	1,049	1096
											<b>2,455</b>	<b>2,486</b>	<b>1,23</b>	<b>14,31</b>	<b>91,38</b>	<b>3,87</b>			<b>1069</b>
16	6,50	74,75	61,6	61,7	62,1	61,8	1213,2	717,7	1213,5	495,8	2,447					4,10	1018	1,043	1062
17	6,50	74,75	62,4	62,2	61,8	62,1	1213,1	716,3	1213,8	497,5	2,438					4,20	937	1,035	970
18	6,50	74,75	61,9	61,6	60,9	61,5	1212,5	717,0	1212,7	495,7	2,446					4,20	1002	1,053	1055
											<b>2,444</b>	<b>2,470</b>	<b>1,04</b>	<b>15,11</b>	<b>93,10</b>	<b>4,17</b>			<b>1029</b>
19	7,00	80,5	62,3	62,5	62,4	62,4	1219,0	716,1	1219,6	503,5	2,421					4,20	981	1,028	1008
20	7,00	80,5	62,5	62,5	61,7	62,2	1216,2	715,8	1216,6	500,8	2,429					4,20	916	1,033	946
21	7,00	80,5	62,6	62,5	62,4	62,5	1213,3	713,9	1214,2	500,3	2,425					4,20	949	1,025	973
											<b>2,425</b>	<b>2,454</b>	<b>1,17</b>	<b>16,16</b>	<b>92,78</b>	<b>4,20</b>			<b>976</b>

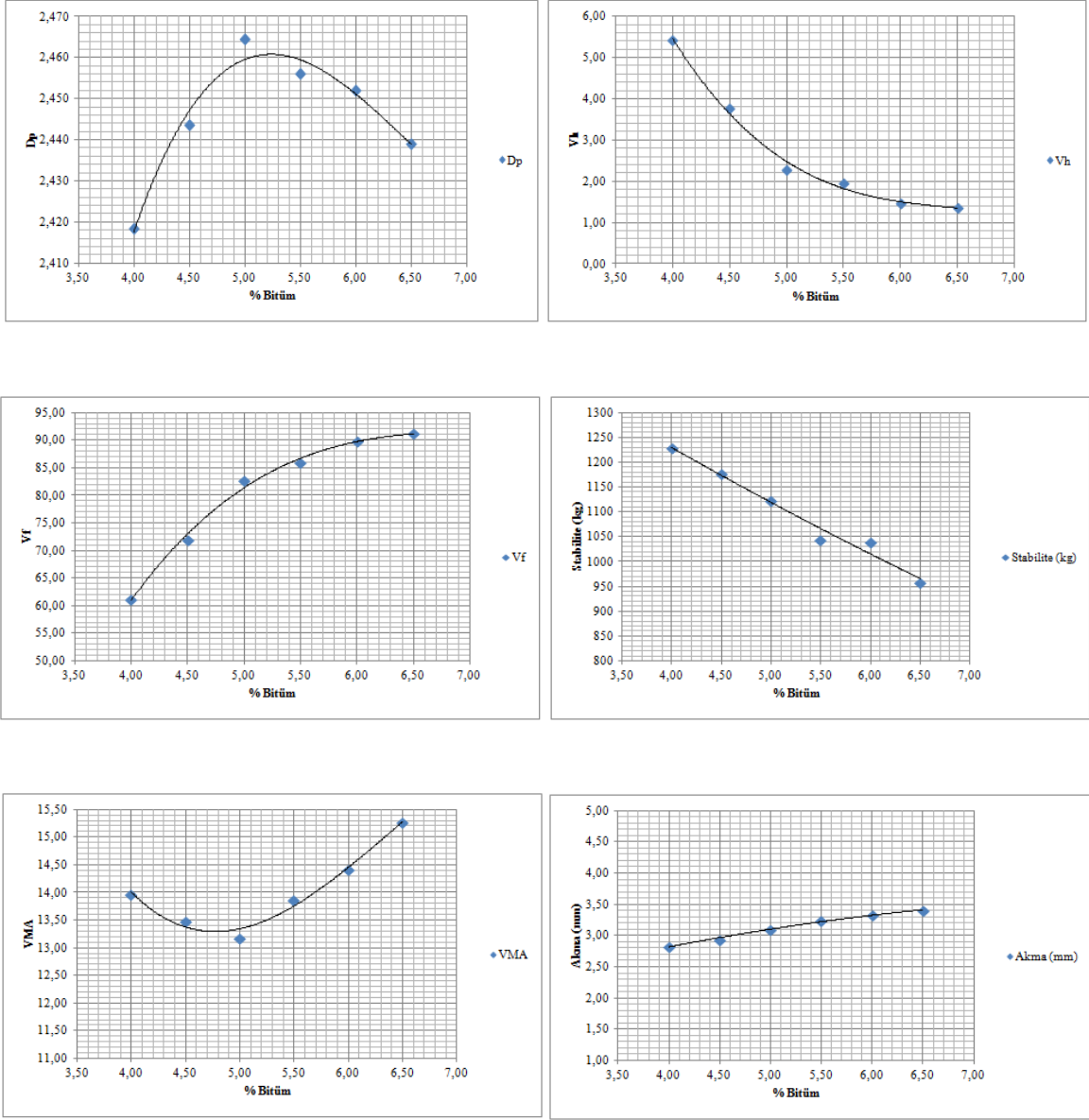




Ek Şekil 1. Orijinal karışım için Marshall grafikleri

Ek Tablo 3. %4 furan reçinesi katkılı karışıma (K2) ait Marshall föyü

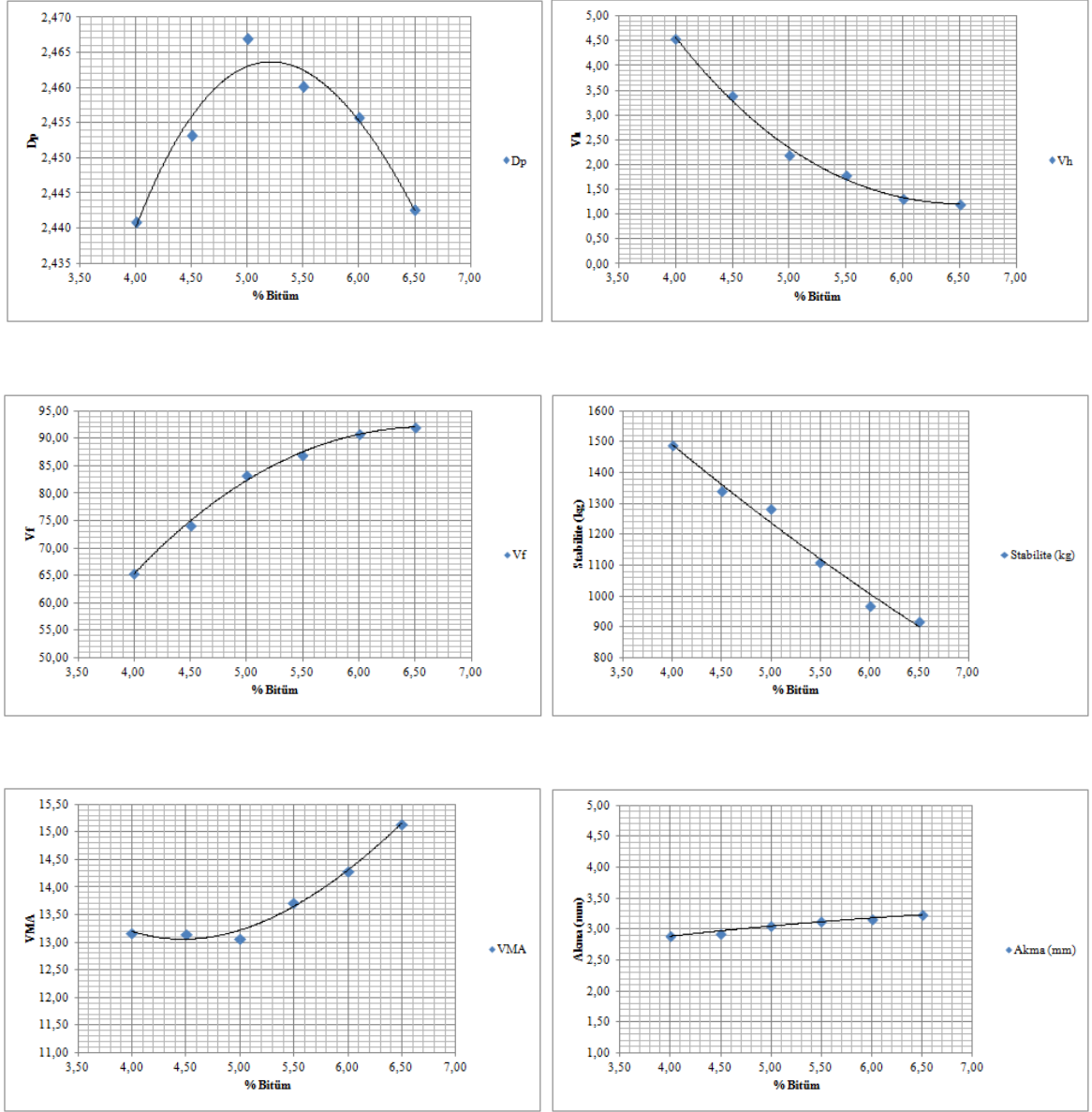
Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüzey	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Ar.	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzl.	Düzeltilmiş
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	(kg)
1	4,00	46	61,2	61,5	61,9	61,5	1195,1	709,6	1199,9	490,3	2,437				2,80	1235	1,053	1300	
2	4,00	46	63,1	62,7	62,0	62,6	1194,0	702,8	1200,0	497,2	2,401				2,90	1179	1,023	1206	
3	4,00	46	61,8	61,4	62,0	61,7	1196,7	706,5	1201,8	495,3	2,416				2,80	1127	1,046	1179	
											<b>2,418</b>	<b>2,557</b>	<b>5,43</b>	<b>13,97</b>	<b>61,17</b>	<b>2,83</b>			<b>1228</b>
4	4,50	51,75	61,3	61,3	61,6	61,4	1201,3	713,2	1203,4	490,2	2,451				3,00	1173	1,056	1239	
5	4,50	51,75	61,7	61,9	62,5	62,0	1201,2	713,0	1205,0	492,0	2,441				2,90	1084	1,038	1125	
6	4,50	51,75	62,0	62,2	62,2	62,1	1202,8	712,2	1205,4	493,2	2,439				2,90	1126	1,035	1165	
											<b>2,444</b>	<b>2,539</b>	<b>3,77</b>	<b>13,49</b>	<b>72,05</b>	<b>2,93</b>			<b>1176</b>
7	5,00	57,5	61,9	61,3	61,2	61,5	1207,5	718,9	1208,2	489,3	2,468				3,10	990	1,053	1042	
8	5,00	57,5	61,3	61,6	61,7	61,5	1206,2	718,4	1207,6	489,2	2,466				3,10	1124	1,053	1184	
9	5,00	57,5	61,8	61,4	61,3	61,5	1206,9	717,7	1208,3	490,6	2,460				3,10	1085	1,053	1143	
											<b>2,465</b>	<b>2,522</b>	<b>2,28</b>	<b>13,17</b>	<b>82,68</b>	<b>3,10</b>			<b>1123</b>
10	5,50	63,25	62,2	62,1	62,6	62,3	1212,4	719,8	1213,8	494,0	2,454				3,30	962	1,030	991	
11	5,50	63,25	62,7	62,5	62,7	62,6	1211,9	719,2	1213,3	494,1	2,453				3,30	1056	1,023	1080	
12	5,50	63,25	61,6	61,1	61,8	61,5	1211,8	720,4	1212,7	492,3	2,462				3,10	1009	1,053	1062	
											<b>2,456</b>	<b>2,505</b>	<b>1,95</b>	<b>13,87</b>	<b>85,93</b>	<b>3,23</b>			<b>1045</b>
13	6,00	69	61,0	61,4	61,3	61,2	1216,7	720,8	1217,5	496,7	2,450				3,20	1017	1,062	1080	
14	6,00	69	61,9	62,1	62,0	62,0	1215,5	720,3	1216,3	496,0	2,451				3,40	965	1,038	1002	
15	6,00	69	61,3	61,6	62,2	61,7	1214,3	720,1	1214,6	494,5	2,456				3,40	989	1,046	1034	
											<b>2,452</b>	<b>2,488</b>	<b>1,47</b>	<b>14,42</b>	<b>89,81</b>	<b>3,33</b>			<b>1039</b>
16	6,50	74,75	62,6	62,2	63,2	62,7	1219,3	719,7	1220,1	500,4	2,437				3,30	915	1,020	933	
17	6,50	74,75	62,1	61,9	63,1	62,4	1220,6	720,8	1221,2	500,4	2,439				3,50	962	1,028	989	
18	6,50	74,75	62,7	62,1	62,1	62,3	1222,2	721,8	1222,5	500,7	2,441				3,40	923	1,030	951	
											<b>2,439</b>	<b>2,472</b>	<b>1,35</b>	<b>15,28</b>	<b>91,17</b>	<b>3,40</b>			<b>958</b>



Ek Şekil 2. %4 reçine katkıli karışım için Marshall grafikleri

Ek Tablo 4. %5 furan reçinesi katkılı karışıma (K3) ait Marshall föyü

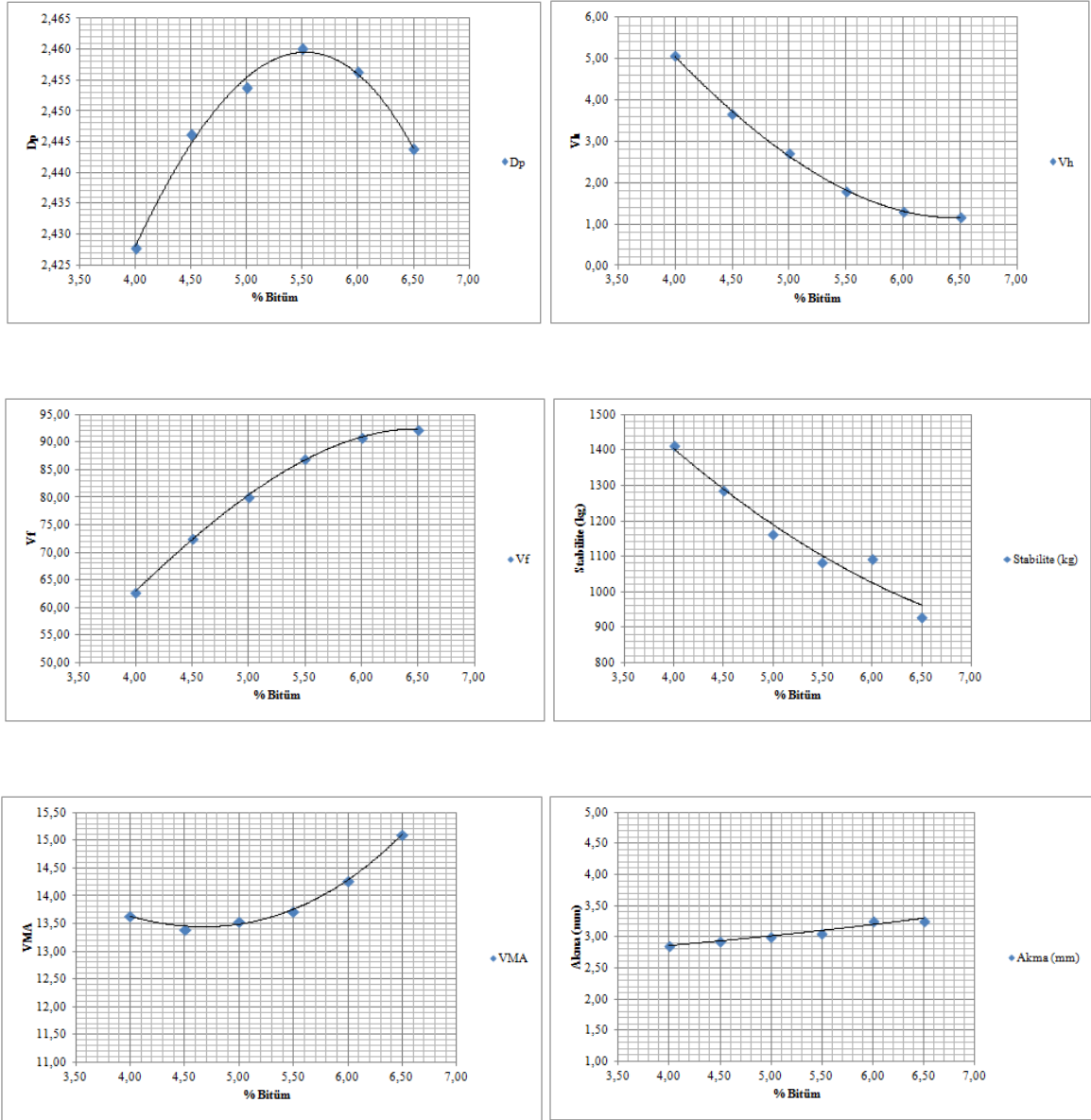
Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüzev	Hacim (cm3)	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Ar.	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzl.	Düzeltilmiş
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	(kg)
1	4,00	46	61,0	62,0	62,3	61,8	1195,6	709,7	1199,0	489,3	2,443					2,90	1444	1,074	1551
2	4,00	46	62,0	61,6	61,5	61,7	1195,2	708,0	1199,3	491,3	2,433					2,90	1402	1,046	1466
3	4,00	46	61,5	61,1	61,5	61,4	1195,5	709,9	1198,6	488,7	2,446					2,90	1374	1,056	1451
											<b>2,441</b>	<b>2,557</b>	<b>4,55</b>	<b>13,17</b>	<b>65,48</b>	<b>2,90</b>			<b>1489</b>
4	4,50	51,75	61,3	62,0	62,3	61,9	1202,1	714,1	1203,9	489,8	2,454					3,00	1296	1,040	1348
5	4,50	51,75	62,0	61,7	61,9	61,9	1201,4	713,0	1204,3	491,3	2,445					2,90	1225	1,040	1274
6	4,50	51,75	61,1	61,6	62,0	61,6	1201,9	715,6	1204,2	488,6	2,460					2,90	1335	1,049	1400
											<b>2,453</b>	<b>2,539</b>	<b>3,39</b>	<b>13,15</b>	<b>74,19</b>	<b>2,93</b>			<b>1341</b>
7	5,00	57,5	61,2	60,8	61,2	61,1	1206,7	719,1	1207,9	488,8	2,469					3,10	1259	1,065	1341
8	5,00	57,5	61,0	60,9	60,6	60,8	1207,0	718,6	1208,2	489,6	2,465					3,00	1154	1,074	1239
9	5,00	57,5	60,8	61,4	61,6	61,3	1206,7	718,3	1207,5	489,2	2,467					3,10	1204	1,059	1275
											<b>2,467</b>	<b>2,522</b>	<b>2,19</b>	<b>13,08</b>	<b>83,29</b>	<b>3,07</b>			<b>1285</b>
10	5,50	63,25	61,4	61,7	61,6	61,6	1211,9	720,3	1212,8	492,5	2,461					3,10	1105	1,049	1159
11	5,50	63,25	61,2	61,6	62,1	61,6	1211,4	720,0	1212,2	492,2	2,461					3,10	1070	1,049	1122
12	5,50	63,25	61,7	61,5	62,2	61,8	1211,8	720,0	1212,9	492,9	2,459					3,20	1006	1,043	1049
											<b>2,460</b>	<b>2,505</b>	<b>1,79</b>	<b>13,73</b>	<b>86,94</b>	<b>3,13</b>			<b>1110</b>
13	6,00	69	61,9	62,3	62,3	62,2	1219,2	722,4	1219,1	496,7	2,455					3,20	949	1,033	980
14	6,00	69	61,5	62,4	62,2	62,0	1218,4	722,6	1218,7	496,1	2,456					3,20	968	1,038	1005
15	6,00	69	62,1	62,6	61,9	62,2	1218,4	722,5	1218,5	496,0	2,456					3,10	896	1,033	926
											<b>2,456</b>	<b>2,488</b>	<b>1,32</b>	<b>14,29</b>	<b>90,77</b>	<b>3,17</b>			<b>970</b>
16	6,50	74,75	62,3	62,5	63,1	62,6	1217,7	719,5	1218,5	499,0	2,440					3,30	955	1,023	977
17	6,50	74,75	62,2	62,3	62,6	62,4	1218,0	719,6	1218,4	498,8	2,442					3,30	872	1,028	896
18	6,50	74,75	62,4	62,4	62,5	62,4	1221,6	721,7	1221,2	499,5	2,446					3,10	865	1,028	889
											<b>2,443</b>	<b>2,472</b>	<b>1,20</b>	<b>15,15</b>	<b>92,07</b>	<b>3,23</b>			<b>921</b>



Ek Şekil 3. %5 reçine katkılı karışım için Marshall grafikleri

Ek Tablo 5. %6 furan reçinesi katkılı karışıma (K4) ait Marshall föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüzey	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Ar.	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzl.	Düzeltilmiş
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	(kg)
1	4,00	46	62,2	62,4	62,0	62,2	1199,8	711,9	1204,7	492,8	2,435					2,90	1408	1,033	1454
2	4,00	46	62,0	62,9	62,7	62,5	1195,7	706,7	1199,9	493,2	2,424					2,80	1320	1,025	1353
3	4,00	46	62,0	62,3	63,1	62,5	1200,6	708,2	1203,5	495,3	2,424					2,90	1401	1,025	1436
											<b>2,428</b>	<b>2,557</b>	<b>5,06</b>	<b>13,64</b>	<b>62,89</b>	<b>2,87</b>			<b>1414</b>
4	4,50	51,75	62,0	61,6	62,3	62,0	1203,6	713,6	1205,4	491,8	2,447					2,90	1278	1,038	1327
5	4,50	51,75	61,2	60,5	61,3	61,0	1201,7	711,5	1203,5	492,0	2,442					3,00	1194	1,068	1275
6	4,50	51,75	61,1	61,6	61,9	61,5	1203,9	714,1	1205,8	491,7	2,448					2,90	1195	1,053	1258
											<b>2,446</b>	<b>2,539</b>	<b>3,67</b>	<b>13,40</b>	<b>72,60</b>	<b>2,93</b>			<b>1287</b>
7	5,00	57,5	62,5	62,5	61,8	62,3	1206,1	716,4	1207,7	491,3	2,455					3,00	1186	1,030	1222
8	5,00	57,5	61,7	62,1	62,3	62,0	1208,6	716,9	1210,4	493,5	2,449					3,00	1069	1,038	1110
9	5,00	57,5	61,5	62,2	62,0	61,9	1205,9	716,4	1207,2	490,8	2,457					3,00	1116	1,040	1161
											<b>2,454</b>	<b>2,522</b>	<b>2,71</b>	<b>13,55</b>	<b>80,00</b>	<b>3,00</b>			<b>1164</b>
10	5,50	63,25	62,0	61,9	62,9	62,3	1216,1	722,1	1217,5	495,4	2,455					3,00	1098	1,030	1131
11	5,50	63,25	61,5	61,8	61,7	61,7	1215,9	722,6	1216,7	494,1	2,461					3,10	1047	1,046	1095
12	5,50	63,25	61,9	61,8	61,5	61,7	1214,1	722,7	1215,3	492,6	2,465					3,10	981	1,046	1026
											<b>2,460</b>	<b>2,505</b>	<b>1,79</b>	<b>13,73</b>	<b>86,93</b>	<b>3,07</b>			<b>1084</b>
13	6,00	69	62,2	62,5	62,8	62,5	1218,4	722,2	1219,3	497,1	2,451					3,20	1013	1,025	1038
14	6,00	69	62,4	61,8	61,3	61,8	1217,1	722,0	1217,1	495,1	2,458					3,30	1048	1,043	1093
15	6,00	69	60,9	61,8	61,1	61,3	1217,6	723,0	1218,1	495,1	2,459					3,30	1083	1,059	1147
											<b>2,456</b>	<b>2,488</b>	<b>1,30</b>	<b>14,27</b>	<b>90,91</b>	<b>3,27</b>			<b>1093</b>
16	6,50	74,75	61,8	61,8	62,3	62,0	1217,2	719,3	1217,6	498,3	2,443					3,30	992	1,038	1030
17	6,50	74,75	62,1	61,8	62,9	62,3	1224,4	723,5	1224,7	501,2	2,443					3,20	860	1,030	886
18	6,50	74,75	62,4	62,4	62,5	62,4	1221,6	721,7	1221,2	499,5	2,446					3,30	850	1,028	874
											<b>2,444</b>	<b>2,472</b>	<b>1,15</b>	<b>15,11</b>	<b>92,36</b>	<b>3,27</b>			<b>930</b>

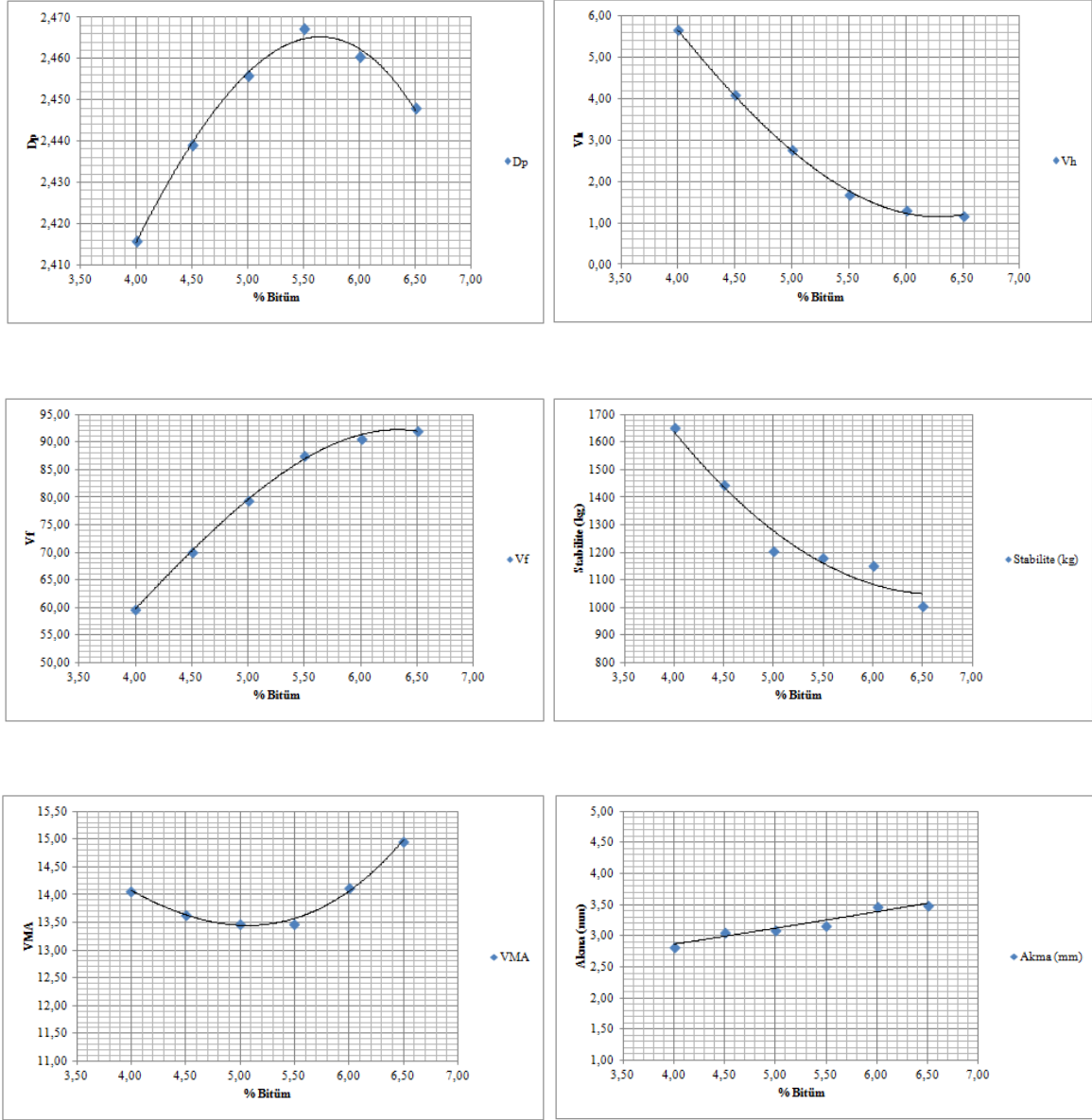


Ek Şekil 4. %6 reçine katkılı karışım için Marshall grafikleri

Ek Tablo 6. %10 C<sub>A</sub> katkılı karışıma (K5) ait Marshall föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüzey	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Ar.	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzl.	Düzeltilmiş	
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite	
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	(kg)	
1	4,00	46	60,7	60,9	61,9	61,2	1196,4	705,0	1202,5	497,5	2,405					2,80	1630	1,062	1731	
2	4,00	46	61,4	61,5	60,7	61,2	1193,5	705,5	1199,0	493,5	2,418					2,90	1520	1,062	1614	
3	4,00	46	63,0	62,8	62,2	62,7	1196,0	706,0	1199,5	493,5	2,424					2,80	1580	1,020	1612	
											<b>2,416</b>	<b>2,560</b>	<b>5,65</b>	<b>14,07</b>	<b>59,83</b>	<b>2,83</b>				1652
4	4,50	51,75	63,2	63,6	62,3	63,0	1201,5	711,0	1204,5	493,5	2,435					3,00	1480	1,013	1499	
5	4,50	51,75	61,8	62,9	62,7	62,5	1202,5	711,5	1205,0	493,5	2,437					3,10	1362	1,025	1396	
6	4,50	51,75	61,7	61,9	62,3	62,0	1201,0	711,5	1202,5	491,0	2,446					3,10	1388	1,038	1441	
											<b>2,439</b>	<b>2,543</b>	<b>4,08</b>	<b>13,65</b>	<b>70,10</b>	<b>3,07</b>				1445
7	5,00	57,5	61,9	62,3	61,2	61,8	1206,5	716,5	1207,0	490,5	2,460					3,10	1186	1,043	1237	
8	5,00	57,5	62,1	61,9	61,5	61,8	1207,5	716,0	1208,5	492,5	2,452					3,20	1105	1,043	1153	
9	5,00	57,5	62,6	61,9	62,4	62,3	1207,0	716,5	1208,0	491,5	2,456					3,00	1190	1,030	1226	
											<b>2,456</b>	<b>2,526</b>	<b>2,78</b>	<b>13,47</b>	<b>79,39</b>	<b>3,10</b>				1205
10	5,50	63,25	61,0	61,3	61,9	61,4	1212,5	721,5	1213,0	491,5	2,467					3,30	1055	1,056	1114	
11	5,50	63,25	61,8	61,7	61,0	61,5	1212,0	721,0	1212,5	491,5	2,466					3,20	1143	1,053	1204	
12	5,50	63,25	60,9	61,8	62,0	61,6	1212,0	721,5	1212,5	491,0	2,468					3,00	1170	1,049	1227	
											<b>2,467</b>	<b>2,509</b>	<b>1,68</b>	<b>13,49</b>	<b>87,54</b>	<b>3,17</b>				1182
13	6,00	69	62,5	62,7	62,1	62,4	1217,0	722,5	1217,0	494,5	2,461					3,50	1097	1,028	1128	
14	6,00	69	62,4	61,5	61,0	61,6	1216,5	722,0	1216,5	494,5	2,460					3,50	1164	1,049	1221	
15	6,00	69	61,8	61,1	61,9	61,6	1216,5	722,5	1217,0	494,5	2,460					3,40	1061	1,049	1113	
											<b>2,460</b>	<b>2,493</b>	<b>1,31</b>	<b>14,13</b>	<b>90,75</b>	<b>3,47</b>				1154
16	6,50	74,75	62,3	62,0	61,7	62,0	1218,5	721,0	1218,5	497,5	2,449					3,40	974	1,038	1011	
17	6,50	74,75	62,5	62,3	62,6	62,5	1219,5	721,5	1220,0	498,5	2,446					3,60	1056	1,025	1082	
18	6,50	74,75	61,8	62,4	62,2	62,1	1218,0	720,5	1218,0	497,5	2,448					3,50	906	1,030	933	
											<b>2,448</b>	<b>2,477</b>	<b>1,18</b>	<b>14,96</b>	<b>92,14</b>	<b>3,50</b>				1009

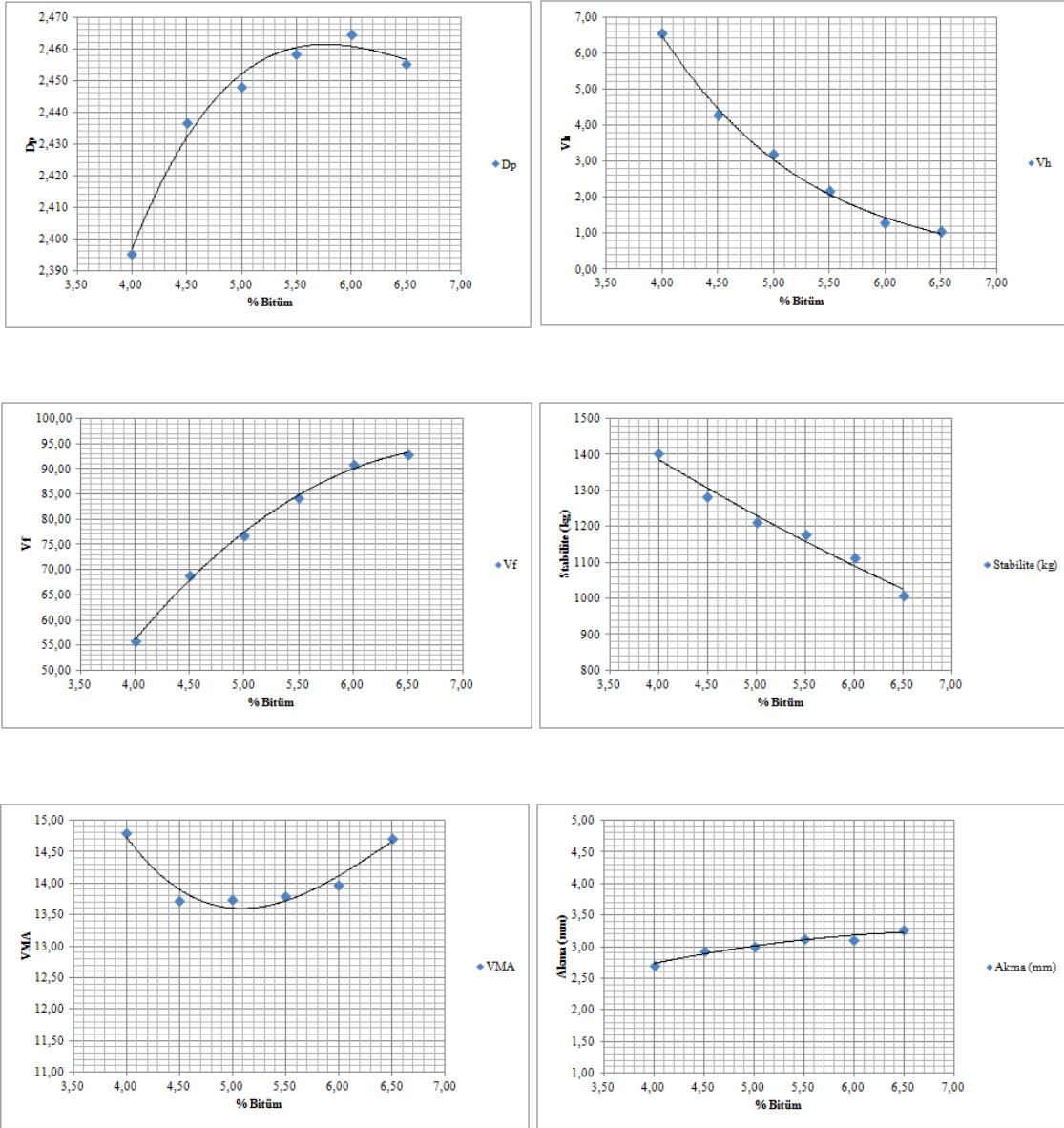




Ek Şekil 5. %10 C<sub>A</sub> katkılı karışım için Marshall grafikleri

Ek Tablo 7. %15 C<sub>A</sub> katkılı karışıma (K6) ait Marshall föyü

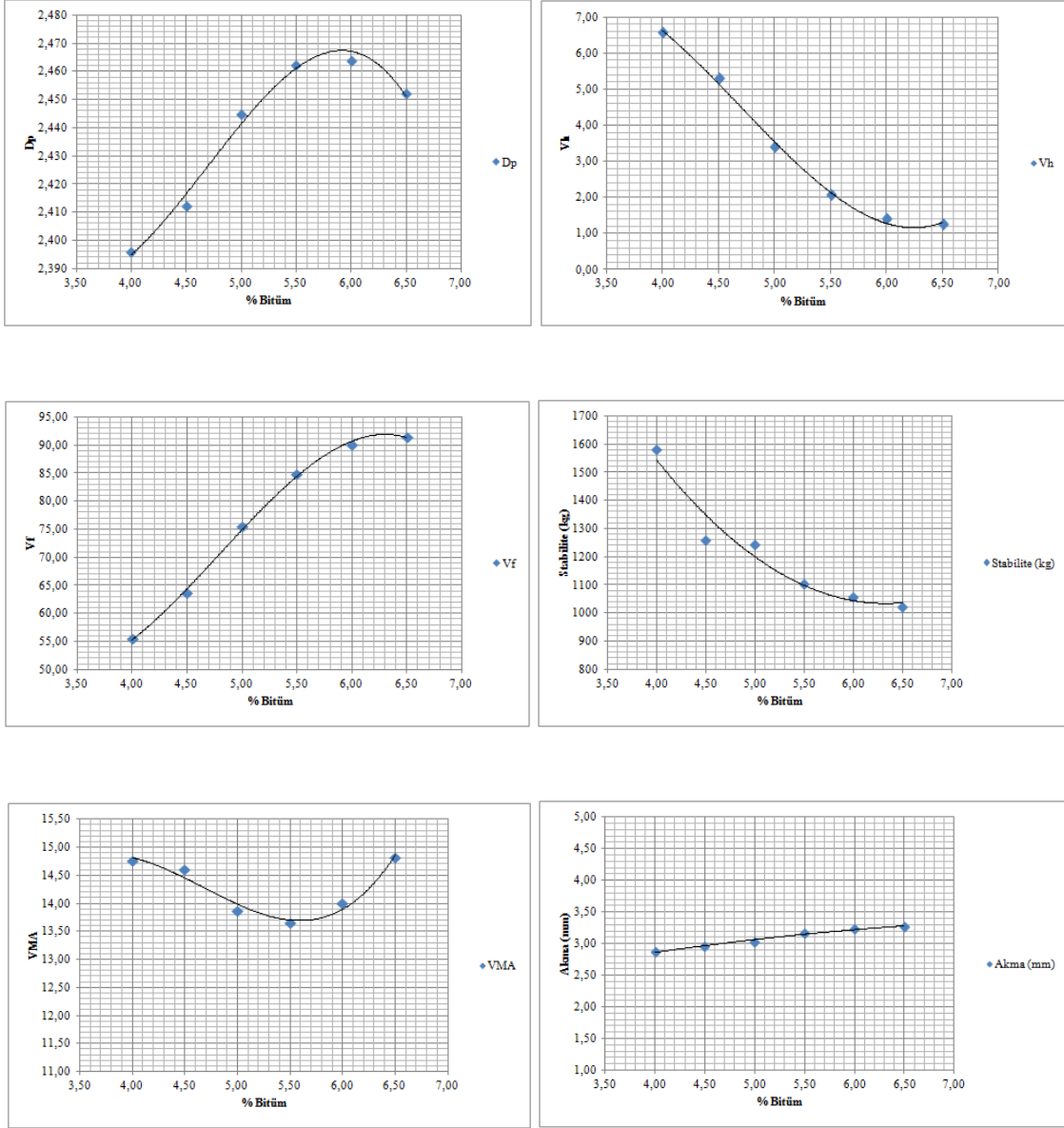
Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüze	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Ar.	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzl.	Düzeltilmiş
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	(kg)
1	4,00	46	63,5	63,4	62,8	63,2	1195,5	703,5	1203,5	500,0	2,391				2,70	1408	1,008	1419	
2	4,00	46	63,3	62,9	63,4	63,2	1195,5	703,0	1202,0	499,0	2,396				2,70	1370	1,008	1381	
3	4,00	46	62,8	62,6	62,6	62,7	1197,0	704,5	1203,5	499,0	2,399				2,70	1384	1,020	1412	
											<b>2,395</b>	<b>2,563</b>	<b>6,55</b>	<b>14,80</b>	<b>55,75</b>	<b>2,70</b>			<b>1404</b>
4	4,50	51,75	60,9	61,4	60,9	61,1	1201,5	710,5	1203,5	493,0	2,437				2,90	1230	1,065	1310	
5	4,50	51,75	62,8	62,1	62,2	62,4	1203,0	712,0	1205,5	493,5	2,438				2,90	1180	1,028	1213	
6	4,50	51,75	62,8	61,8	62,2	62,3	1202,0	711,0	1204,5	493,5	2,436				3,00	1290	1,030	1329	
											<b>2,437</b>	<b>2,546</b>	<b>4,28</b>	<b>13,73</b>	<b>68,80</b>	<b>2,93</b>			<b>1284</b>
7	5,00	57,5	62,2	61,9	61,8	62,0	1207,0	716,0	1208,5	492,5	2,451				3,00	1151	1,038	1195	
8	5,00	57,5	61,8	61,8	62,4	62,0	1206,5	716,5	1208,5	492,0	2,452				3,00	1157	1,038	1201	
9	5,00	57,5	61,8	62,6	61,9	62,1	1207,5	715,0	1209,5	494,5	2,442				3,00	1197	1,035	1239	
											<b>2,448</b>	<b>2,529</b>	<b>3,20</b>	<b>13,74</b>	<b>76,73</b>	<b>3,00</b>			<b>1212</b>
10	5,50	63,25	62,3	61,6	61,8	61,9	1211,0	719,0	1212,5	493,5	2,454				3,10	1096	1,040	1140	
11	5,50	63,25	61,6	62,1	61,7	61,8	1212,0	721,0	1213,5	492,5	2,461				3,20	1197	1,043	1248	
12	5,50	63,25	61,0	61,7	61,6	61,4	1213,0	721,0	1214,0	493,0	2,460				3,10	1084	1,056	1145	
											<b>2,458</b>	<b>2,513</b>	<b>2,16</b>	<b>13,79</b>	<b>84,32</b>	<b>3,13</b>			<b>1178</b>
13	6,00	69	63,0	62,0	61,9	62,3	1218,0	723,5	1218,5	495,0	2,461				3,10	1120	1,030	1154	
14	6,00	69	61,6	61,7	62,5	61,9	1216,0	723,0	1216,5	493,5	2,464				3,10	1090	1,040	1134	
15	6,00	69	61,5	61,8	61,4	61,6	1217,5	725,0	1218,0	493,0	2,470				3,10	1004	1,049	1053	
											<b>2,465</b>	<b>2,497</b>	<b>1,28</b>	<b>13,98</b>	<b>90,82</b>	<b>3,10</b>			<b>1113</b>
16	6,50	74,75	61,8	62,3	62,9	62,3	1223,0	725,5	1223,5	498,0	2,456				3,20	965	1,030	994	
17	6,50	74,75	62,2	62,3	62,0	62,2	1219,0	723,0	1219,5	496,5	2,455				3,30	943	1,033	974	
18	6,50	74,75	62,7	61,5	62,6	62,3	1220,0	723,5	1220,5	497,0	2,455				3,30	1027	1,030	1058	
											<b>2,455</b>	<b>2,481</b>	<b>1,04</b>	<b>14,71</b>	<b>92,92</b>	<b>3,27</b>			<b>1009</b>



Ek Şekil 6. %15 C<sub>A</sub> katkıli karışım için Marshall grafikleri

Ek Tablo 8. %20 C<sub>A</sub> katkılı karışıma (K7) ait Marshall föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüze	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Ar.	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzl.	Düzeltilmiş	
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)				Stabilite	
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)	Faktörü	(kg)	
1	4,00	46	63,1	62,6	63,2	63,0	1195,5	704,0	1204,5	500,5	2,389					2,90	1575	1,013	1595	
2	4,00	46	62,9	63,2	64,0	63,4	1196,5	706,0	1206,0	500,0	2,393					2,90	1535	1,003	1540	
3	4,00	46	62,0	62,1	61,1	61,7	1195,0	704,0	1200,5	496,5	2,407					2,80	1542	1,046	1613	
											<b>2,396</b>	<b>2,565</b>	<b>6,57</b>	<b>14,76</b>	<b>55,51</b>	<b>2,87</b>				1583
4	4,50	51,75	62,1	63,1	63,5	62,9	1202,5	709,5	1205,5	496,0	2,424					2,90	1205	1,015	1223	
5	4,50	51,75	63,3	62,8	63,6	63,2	1201,0	705,5	1207,5	502,0	2,392					3,00	1175	1,085	1275	
6	4,50	51,75	63,8	63,2	62,6	63,2	1201,5	709,5	1206,0	496,5	2,420					3,00	1185	1,085	1286	
											<b>2,412</b>	<b>2,548</b>	<b>5,31</b>	<b>14,60</b>	<b>63,61</b>	<b>2,97</b>				1261
7	5,00	57,5	61,5	61,9	62,4	61,9	1208,0	716,0	1209,0	493,0	2,450					3,00	1265	1,040	1316	
8	5,00	57,5	61,7	63,0	62,2	62,3	1207,0	715,5	1209,0	493,5	2,446					3,00	1196	1,030	1232	
9	5,00	57,5	61,8	62,4	62,7	62,3	1207,0	714,0	1209,0	495,0	2,438					3,10	1150	1,030	1185	
											<b>2,445</b>	<b>2,531</b>	<b>3,41</b>	<b>13,86</b>	<b>75,43</b>	<b>3,03</b>				1244
10	5,50	63,25	62,1	61,2	62,4	61,9	1213,5	721,0	1214,5	493,5	2,459					3,10	1073	1,040	1116	
11	5,50	63,25	62,3	63,1	62,1	62,5	1212,5	720,0	1213,0	493,0	2,459					3,20	1082	1,025	1109	
12	5,50	63,25	61,6	61,7	62,5	61,9	1213,5	722,0	1213,5	491,5	2,469					3,20	1042	1,040	1084	
											<b>2,462</b>	<b>2,515</b>	<b>2,08</b>	<b>13,65</b>	<b>84,75</b>	<b>3,17</b>				1103
13	6,00	69	62,3	61,5	62,3	62,0	1216,5	723,0	1216,5	493,5	2,465					3,30	967	1,038	1004	
14	6,00	69	61,7	61,9	61,8	61,8	1218,5	725,5	1219,0	493,5	2,469					3,20	1012	1,043	1056	
15	6,00	69	62,3	62,4	62,5	62,4	1221,5	725,0	1222,0	497,0	2,458					3,20	1081	1,028	1111	
											<b>2,464</b>	<b>2,499</b>	<b>1,40</b>	<b>14,00</b>	<b>90,01</b>	<b>3,23</b>				1057
16	6,50	74,75	62,8	62,5	62,1	62,5	1224,0	725,0	1224,5	499,5	2,450					3,40	1010	1,025	1035	
17	6,50	74,75	62,4	62,1	62,0	62,2	1222,0	725,0	1222,5	497,5	2,456					3,10	1009	1,033	1042	
18	6,50	74,75	62,3	61,4	61,8	61,8	1222,5	724,0	1223,0	499,0	2,450					3,30	960	1,030	989	
											<b>2,452</b>	<b>2,483</b>	<b>1,26</b>	<b>14,82</b>	<b>91,52</b>	<b>3,27</b>				1022



Ek Şekil 7. %20 C<sub>A</sub> katkıli karışım için Marshall grafikleri

Ek Tablo 9. Orijinal karışıma (K1) ait dolaylı çekme mukavemeti föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüzey	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk	Boşluk hacmi	Boşluk hacmi		Koşullandırılmış Havadaki ağırlık (gr)	
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	(cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>3</sup> )			
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	V*Vh/100	70%	80%	70%	80%
1	4,50	51,75	60,5	61,8	61,2	61,2	1200,5	709,5	1213,5	504,0	2,382	2,537	6,11	30,80	21,56	24,64	1222,06	1225,14
2	4,50	51,75	62,0	61,8	60,6	61,5	1200,5	709,1	1213,4	504,3	2,381	2,537	6,17	31,10	21,77	24,88	1222,27	1225,38
3	4,50	51,75	61,4	61,1	61,3	61,3	1201	708	1215	507,0	2,369	2,537	6,63	33,61	23,52	26,88	1224,52	1227,88
4	4,50	51,75	61,9	61,2	62,2	61,8	1202,5	709	1214,6	505,6	2,378	2,537	6,25	31,61	22,13	25,29	1224,63	1227,79
5	4,50	51,75	61,6	61,8	61,3	61,6	1202	709,2	1215,1	505,9	2,376	2,537	6,35	32,11	22,48	25,69	1224,48	1227,69
6	4,50	51,75	61,5	60,7	62	61,4	1202	709,3	1214,2	504,9	2,381	2,537	6,16	31,11	21,78	24,89	1223,78	1226,89

Sıra No	Numune yüksekliği (h)	Numune çapı (d)	Pmaks.	Koşullu İÇM	Koşulsuz İÇM	İÇM oranı
	(cm)	(cm)	(kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	
1	6,12	10,16	550,00	5,63		82,86
2	6,15	10,16	580,00	5,91		
3	6,13	10,16	560,00	5,73		
4	6,18	10,16	660,00		6,70	
5	6,16	10,16	710,00		7,23	
6	6,14	10,16	680,00		6,94	
				5,8	7,0	

1,2,3 no'lu briketler koşullandırılmak üzere hazırlanmıştır  
4,5,6 no'lu briketler koşullandırılmadan kırılmıştır.

Ek Tablo 10. %4 furan reçenesi katkılı karışıma (K2) ait dolaylı çekme mukavemeti föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüze	Hacim (cm3)	Hacim	Maks.	Boşluk	Boşluk hacmi	Boşluk hacmi (cm3)		Koşullandırılmış Havadaki ağırlık (gr)	
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	(cm3)				
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	V*Vh/100	70%	80%	70%	80%
1	4,50	51,75	61,8	60,8	61,9	61,5	1202,5	705,5	1215,4	509,9	2,358	2,539	7,12	36,29	25,40	29,03	1227,90	1231,53
2	4,50	51,75	61,8	61,1	61,8	61,6	1200,5	708,2	1211,9	503,7	2,383	2,539	6,13	30,88	21,61	24,70	1222,11	1225,20
3	4,50	51,75	61,6	61,6	61,7	61,6	1203,5	709,1	1214,3	505,2	2,382	2,539	6,17	31,19	21,84	24,96	1225,34	1228,46
4	4,50	51,75	62,6	61,5	61,7	61,9	1202	708,2	1214,1	505,9	2,376	2,539	6,42	32,49	22,74	25,99	1224,74	1227,99
5	4,50	51,75	61,2	62,1	61,1	61,5	1202	707,5	1215,5	508,0	2,366	2,539	6,81	34,59	24,21	27,67	1226,21	1229,67
6	4,50	51,75	62,7	63	62,7	62,8	1202,5	705,5	1214,6	509,1	2,362	2,539	6,97	35,49	24,84	28,39	1227,34	1230,89

Sıra No	Numune yüksekliği (h)	Numune çapı (d)	Pmaks.	Koşullu İÇM	Koşulsuz İÇM	İÇM oranı
	(cm)	(cm)	(kg)	(kg/cm2)	(kg/cm2)	
1	6,15	10,16	475,00	4,84		85,25
2	6,16	10,16	550,00	5,60		
3	6,16	10,16	520,00	5,29		
4	6,19	10,16	615,00		6,22	
5	6,15	10,16	565,00		5,76	
6	6,28	10,16	620,00		6,19	
				5,2	6,1	

1,2,3 no'lu briketler koşullandırılmak üzere hazırlanmıştır

4,5,6 no'lu briketler koşullandırılmadan kırılmıştır.

Ek Tablo 11. %5 furan reçenesi katkılı karışıma (K3) ait dolaylı çekme mukavemeti föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüze	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk (%)	Boşluk hacmi (cm <sup>3</sup> )	Boşluk hacmi (cm <sup>3</sup> )		Koşullandırılmış Havadaki ağırlık (gr)	
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.						
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	V*Vh/100	70%	80%	70%	80%
1	4,40	50,6	62,2	61,3	62,1	61,9	1201,6	709,8	1213,4	503,6	2,386	2,543	6,17	31,09	21,76	24,87	1223,36	1226,47
2	4,40	50,6	61	62	61,5	61,5	1200,3	709,6	1213,7	504,1	2,381	2,543	6,37	32,10	22,47	25,68	1222,77	1225,98
3	4,40	50,6	61,5	61,4	62,1	61,7	1201	710,2	1212,9	502,7	2,389	2,543	6,05	30,42	21,30	24,34	1222,30	1225,34
4	4,40	50,6	61,2	61,6	62,2	61,7	1201	707,4	1213,2	505,8	2,374	2,543	6,63	33,52	23,47	26,82	1224,47	1227,82
5	4,40	50,6	61,0	61,7	61,7	61,5	1201,5	707,6	1212,1	504,5	2,382	2,543	6,35	32,03	22,42	25,62	1223,92	1227,12
6	4,40	50,6	62,3	62,6	61,7	62,2	1200	709,5	1211,7	502,2	2,389	2,543	6,04	30,32	21,22	24,25	1221,22	1224,25

Sıra No	Numune yüksekliği (h)	Numune çapı (d)	Pmaks.	Koşullu İÇM	Koşulsuz İÇM	İÇM oranı
	(cm)	(cm)	(kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	
1	6,19	10,16	640,00	6,48		86,67
2	6,15	10,16	660,00	6,72		
3	6,17	10,16	606,00	6,16		
4	6,17	10,16	640,00		6,50	
5	6,15	10,16	810,00		8,26	
6	6,22	10,16	760,00		7,66	
				6,5	7,5	

1,2,3 no'lu briketler koşullandırılmak üzere hazırlanmıştır

4,5,6 no'lu briketler koşullandırılmadan kırılmıştır.



Ek Tablo 12. %6 furan reçenesi katkılı karışıma (K4) ait dolaylı çekme mukavemeti föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havadaki	Sudaki	Doygun Yüzey	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk (%)	Boşluk hacmi (cm <sup>3</sup> )	Boşluk hacmi (cm <sup>3</sup> )		Koşullandırılmış Havadaki ağırlık (gr)	
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.						
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	V*Vh/100	70%	80%	70%	80%
1	4,50	51,75	61,6	61	61,8	61,5	1201	707,5	1212,5	505,0	2,378	2,539	6,33	31,98	22,39	25,58	1223,39	1226,58
2	4,50	51,75	61,7	62,2	62,8	62,2	1202	704,3	1213,1	508,8	2,362	2,539	6,95	35,39	24,77	28,31	1226,77	1230,31
3	4,50	51,75	62,2	62,1	62,8	62,4	1203	704,8	1214,3	509,5	2,361	2,539	7,01	35,69	24,98	28,55	1227,98	1231,55
4	4,50	51,75	62,2	62,8	62,9	62,6	1202	707,5	1214	506,5	2,373	2,539	6,53	33,09	23,16	26,47	1225,16	1228,47
5	4,50	51,75	62,0	62,5	62,0	62,2	1202	708	1213,8	505,8	2,376	2,539	6,40	32,39	22,67	25,91	1224,67	1227,91
6	4,50	51,75	62,8	63,0	62,5	62,8	1201,5	706,5	1213,5	507,0	2,370	2,539	6,66	33,78	23,65	27,03	1225,15	1228,53

Sıra No	Numune yüksekliği (h)	Numune çapı (d)	Pmaks.	Koşullu İÇM	Koşulsuz İÇM	İÇM oranı
	(cm)	(cm)	(kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	
1	6,15	10,16	690,00	7,03		85,90
2	6,22	10,16	683,00	6,88		
3	6,24	10,16	609,00	6,12		
4	6,26	10,16	751,00		7,51	
5	6,22	10,16	793,00		7,99	
6	6,28	10,16	780,00		7,79	
				6,7	7,8	

1,2,3 no'lu briketler koşullandırılmak üzere hazırlanmıştır

4,5,6 no'lu briketler koşullandırılmadan kırılmıştır.

Ek Tablo 13. %10 C<sub>A</sub> katkılı karışıma (K5) ait dolaylı çekme mukavemeti föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüze	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk (%)	Boşluk hacmi (cm <sup>3</sup> )	Boşluk hacmi (cm <sup>3</sup> )		Koşullandırılmış Havadaki ağırlık (gr)	
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg. Ağırlık	Teo. Özg. Ağırlık						
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	V*Vh/100	70%	80%	70%	80%
1	4,70	54,05	61,6	62,2	61,6	61,8	1203	709,2	1214,5	505,3	2,381	2,536	6,12	30,93	21,65	24,74	1224,65	1227,74
2	4,70	54,05	61,6	61,7	62,7	62,0	1204,5	708,5	1215,3	506,8	2,377	2,536	6,28	31,84	22,29	25,47	1226,79	1229,97
3	4,70	54,05	62,1	61,1	62,4	61,9	1201,5	708,1	1213,9	505,8	2,375	2,536	6,33	32,02	22,42	25,62	1223,92	1227,12
4	4,70	54,05	61,6	62,4	62,9	62,3	1205	705,3	1216,4	511,1	2,358	2,536	7,03	35,94	25,16	28,75	1230,16	1233,75
5	4,70	54,05	62,8	62,7	62,3	62,6	1205	704,9	1216,9	512,0	2,354	2,536	7,20	36,84	25,79	29,47	1230,79	1234,47
6	4,70	54,05	62,3	62,5	62,4	62,4	1204,5	706,1	1215,2	509,1	2,366	2,536	6,71	34,14	23,90	27,31	1228,40	1231,81

Sıra No	Numune yüksekliği (h)	Numune çapı (d)	Pmaks.	Koşullu İÇM	Koşulsuz İÇM	İÇM oranı
	(cm)	(cm)	(kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	
1	6,18	10,16	570,00	5,78		70,13
2	6,20	10,16	560,00	5,66		
3	6,19	10,16	480,00	4,86		
4	6,23	10,16	810,00		8,15	
5	6,26	10,16	740,00		7,41	
6	6,24	10,16	750,00		7,53	
				5,4	7,7	

1,2,3 no'lu briketler koşullandırılmak üzere hazırlanmıştır

4,5,6 no'lu briketler koşullandırılmadan kırılmıştır.

Ek Tablo 14. %15 C<sub>A</sub> katkılı karışıma (K6) ait dolaylı çekme mukavemeti föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüze	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk (%)	Boşluk hacmi (cm <sup>3</sup> )	Boşluk hacmi (cm <sup>3</sup> )		Koşullandırılmış Havadaki ağırlık (gr)	
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.						
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	V*Vh/100	70%	80%	70%	80%
1	4,80	55,2	62,9	62,34	62,6	62,6	1204,9	708,3	1215,9	507,6	2,374	2,536	6,40	32,48	22,74	25,99	1227,64	1230,89
2	4,80	55,2	62	62,5	62,2	62,2	1203,5	707,5	1214,6	507,1	2,373	2,536	6,42	32,53	22,77	26,03	1226,27	1229,53
3	4,80	55,2	62,3	63,0	62,2	62,5	1205,5	708,2	1215,8	507,6	2,375	2,536	6,35	32,25	22,57	25,80	1228,07	1231,30
4	4,80	55,2	62,2	62	62,9	62,4	1206	707,5	1216,6	509,1	2,369	2,536	6,59	33,55	23,48	26,84	1229,48	1232,84
5	4,80	55,2	62,3	62,3	61,8	62,1	1206	708,1	1217,2	509,1	2,369	2,536	6,59	33,55	23,48	26,84	1229,48	1232,84
6	4,80	55,2	62,5	62,5	62,6	62,5	1207	706,3	1217,9	511,6	2,359	2,536	6,97	35,65	24,96	28,52	1231,96	1235,52

Sıra No	Numune yüksekliği (h)	Numune çapı (d)	Pmaks.	Koşullu İÇM	Koşulsuz İÇM	İÇM oranı
	(cm)	(cm)	(kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	
1	6,26	10,16	520,00	5,20		71,60
2	6,22	10,16	550,00	5,54		
3	6,25	10,16	650,00	6,52		
4	6,24	10,16	795,00		7,99	
5	6,21	10,16	860,00		8,67	
6	6,25	10,16	765,00		7,67	
				5,8	8,1	

1,2,3 no'lu briketler koşullandırılmak üzere hazırlanmıştır

4,5,6 no'lu briketler koşullandırılmadan kırılmıştır.

Ek Tablo 15. %20 C<sub>A</sub> katkılı karışıma (K7) ait dolaylı çekme mukavemeti föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havd.	Sudaki	Doygun Yüze	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Hacim	Maks.	Boşluk (%)	Boşluk hacmi (cm <sup>3</sup> )	Boşluk hacmi (cm <sup>3</sup> )		Koşullandırılmış Havadaki ağırlık (gr)	
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		Özg. Ağırlık	Teo. Özg. Ağırlık						
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	V*Vh/100	70%	80%	70%	80%
1	4,90	56,35	62,9	62,1	62,9	62,6	1206	709,1	1217,1	508,0	2,374	2,534	6,31	32,07	22,45	25,66	1228,45	1231,66
2	4,90	56,35	62,2	62,5	61,6	62,1	1206	710,2	1217,5	507,3	2,377	2,534	6,18	31,37	21,96	25,10	1227,96	1231,10
3	4,90	56,35	62,5	61,7	62,4	62,2	1205	708,7	1215,6	506,9	2,377	2,534	6,19	31,37	21,96	25,09	1226,96	1230,09
4	4,90	56,35	61,7	62,3	62,5	62,2	1205	707,6	1216,9	509,3	2,366	2,534	6,63	33,77	23,64	27,01	1228,64	1232,01
5	4,90	56,35	62,1	62,4	62,4	62,3	1205,3	706,6	1215,3	508,7	2,369	2,534	6,50	33,05	23,13	26,44	1228,43	1231,74
6	4,90	56,35	62,3	62,2	61,9	62,1	1206,4	707,3	1217,2	509,9	2,366	2,534	6,63	33,81	23,67	27,05	1230,07	1233,45

Sıra No	Numune yüksekliği (h)	Numune çapı (d)	Pmaks.	Koşullu İÇM	Koşulsuz İÇM	İÇM oranı
	(cm)	(cm)	(kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	
1	6,26	10,16	680,00	6,80		74,70
2	6,21	10,16	610,00	6,15		
3	6,22	10,16	550,00	5,54		
4	6,22	10,16	835,00		8,42	
5	6,23	10,16	770,00		7,74	
6	6,21	10,16	860,00		8,67	
				6,2	8,3	

1,2,3 no'lu briketler koşullandırılmak üzere hazırlanmıştır

4,5,6 no'lu briketler koşullandırılmadan kırılmıştır.

## ÖZGEÇMİŞ

Murat BOSTANCIOĞLU 1981 yılında Kırıkkale’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Kırıkkale’de tamamladı. 1999 yılında kazanmış olduğu Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2003 yılında bitirerek İnşaat Mühendisi ünvanı aldı. 2004 yılında Araştırma Görevlisi olarak Cumhuriyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde çalışmaya başladı ve 2007 yılında aynı üniversitede yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başlayan BOSTANCIOĞLU 2012 yılında Doktor ünvanı almaya hak kazanmıştır. Evli ve bir çocuk babası olan BOSTANCIOĞLU iyi derecede İngilizce bilmekte ve halen Cumhuriyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki görevine devam etmektedir.