



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PİROLİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK SIVILAŞTIRILMIŞ ATIK LASTİKLE MODİFİYE EDİLEN BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Mehmet Ali LORASOKKAY

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2014
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

PİROLİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK SIVILAŞTIRILMIŞ ATIK LASTİKLE MODİFİYE EDİLEN BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Mehmet Ali LORASOKKAY

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

2014, 177 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Prof. Dr. Mehmet SALTAN
Prof. Dr. Özcan TAN
Doç. Dr. Mehmet KAMANLI
Doç. Dr. Murat ÖZTÜRK

Dünyada, atık lastiklerin geri kazanılması yöntemleri giderek yaygınlaşmaktadır. Katı atıklar çevresel sorunlara neden olmakta ve insan sağlığını da tehdit etmektedir. Bu çalışmada; piroliz yöntemiyle sıvılaştırılmış atık lastiklerin bir katkı maddesi olarak bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği, performans ve mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Atık lastiklerin sıvılaştırma işlemi piroliz yöntemi ile yapılmış, elde edilen atık sıvı lastik destilasyon deneyi ile ayrıştırılarak petrol ve türevi ürünler elde edilmiştir. Hafif, orta ve ağır ürünlerin kimyasal içeriklerini aydınlatmak için gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC/MS) ve elementel analizleri yapılmıştır. Modifiye bağlayıcı elde edebilmek amacıyla 50/70 penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcıya %2, %4 ve %6 atık sıvı lastik ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcıların özellikleri; dinamik kayma reometresi (DSR), kiriş eğme reometresi (BBR), dönel viskozimetre (RV), dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyleri ile incelenmiştir. Daha sonra bir dizayn agrega gradasyonu oluşturularak saf ve atık sıvı lastik modifiyeli bağlayıcılarla bitümlü sıcak karışımların dizaynı Marshall Stabilite ve Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı kullanılarak yapılmıştır. Atık sıvı lastik katkısının bitümlü sıcak karışımların performansı üzerindeki etkileri Hamburg Tekerlek izi ve nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall Stabilitesi deneyleri ile incelenmiştir. Çalışma sonucunda, atık sıvı lastik katkısının bağlayıcıların esnekliğini ve işlenebilirliğini artırdığı, düşük sıcaklık performans derecesinin bir sınıf yükselerek –28 °C olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan, atık sıvı lastik katkısının katkı maddelerinden hidrokarbon kategorisine uyum sağladığı görülmüştür. Ayrıca, bu katkının bitümün yumuşama ve gençleştirme özelliklerini geliştireceği ve nem hasarına karşı dayanımda daha etkili olacağı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çevre, Atık lastik, Piroliz, Modifiye bitüm, Bitümlü sıcak karışım

ABSTRACT

PH. D THESIS

ENGINEERING PROPERTIES OF BITUMINOUS MIXTURE MODIFIED BY LIQUIFIED WASTE TIRE USING PYROLYSIS METHOD

Mehmet Ali LORASOKKAY

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
DOCTOR OF PHILOSOPHY IN CIVIL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

2014 Year, 177 Pages

Jury
Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Prof. Dr. Mehmet SALTAN
Prof. Dr. Özcan TAN
Assoc. Dr. Mehmet KAMANLI
Assoc. Dr. Murat ÖZTÜRK

Around the world, waste tire recycling is becoming increasingly common. Solid wastes cause environmental problems and it poses a threat to human health. In this study, the usability of waste tires liquefied by pyrolysis method as an additive in bitumen and bituminous hot mixtures, performance and engineering properties were investigated. Pyrolysis method is used to liquefy the waste tires and the liquid obtained is separated by distillation test and petroleum and petroleum-derivative products were obtained. In order to determine the chemical contents of light, medium and heavy products gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS) and elemental analysis were used. In order to obtain modified binders 2%, 4% and 6% liquied waste tires was added into 50/70 penetration grade bituminous binder. Pure and modified binder properties were examined by dynamic shear rheometer (DSR), bending beam rheometer (BBR), rotational viscometer (RV), rolling thin film oven test (RTFOT) and pressure aging vessel (PAV) tests. Then, creating a design aggregate gradation, bituminous hot mixtures design was made by using Marshall Stability and Superpave gyratory compactor with binders prepared with pure and modified binders. The effects of liquid waste tyre additive in bituminous hot mixtures were investigated by using Hamburg rutting test and Marshall Stability test which indicate the resistant against moisture damage. Consequently, with this liquid waste tyre additive, it is found that the flexibility and workability of bituminous binder increased and the low temperature performance grade became -28^{o}C by rising one degree. On the other hand, it was seen that this liquid waste tyre additive adapted to the hydrocarbon group among additives. Also, it is thought that this additive will improve the softening and rejuvaneting properties of bitumen and will improve the permanent damage and the resistant against moisture damage.

Keywords: Environmental, Waste tire, Pyrolysis, Modified bitumen, Hot mix asphalt

ÖNSÖZ

Bu Doktora tez çalışması, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK danışmanlığında tamamlanarak, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Doktora tezi olarak sunulmuştur.

Tezimin her aşamasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ve önerileriyle yol gösteren danışmanım Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK' e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasını 11101026 numaralı proje ile destekleyen Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederim. Ayrıca, 112M116 nolu "Piroliz Yöntemi Kullanılarak Sıvılaştırılmış Atıklar İle Modifiye Edilen Bitümlü Karışımların Mühendislik Özellikleri" başlıklı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında alınan cihazlar için TÜBİTAK kurumuna teşekkür ederim.

Bu tezin oluşturulmasında ve yürütülmesinde gerekli bilgi ve desteğini benden esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Özcan TAN ve Prof. Dr. Mehmet SALTAN'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım için desteğini benden esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Doç. Dr. Mehmet KAMANLI, Yrd. Doç. Dr. Nejdet ŞEN, Öğr. Gör. Dr. M. Levent AĞIRDIR, Arş. Gör. Neslihan ATASAĞUN, Arş. Gör. M. Mevlüt AKMAZ ve Yüksek Kimyager Caner DEMİR'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım için bana vermiş olduğu destek için ve özellikle zor zamanlardaki manevi desteği için saygıdeğer arkadaşım Dr. Mesut ÖZARSLAN'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Benim bu günlere gelmemde çok emeği olan babam Hasan LORASOKKAY'a ve annem Yaşar LORASOKKAY'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım için ilgi ve desteğini gördüğüm, çalışmalarım süresince her zaman yanımda olan eşim Şükrüye LORASOKKAY'a, kızım Rumeysa LORASOKKAY'a ve oğlum Hasan LORASOKKAY'a teşekkür ederim.

Mehmet Ali LORASOKKAY
KONYA-2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Çalışmanın Amacı ve Yöntemi 1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **6**

3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR **19**

3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler 19
3.1.1. Stabilite 20
3.1.2. Durabilite 20
3.1.3. Geçirimsizlik 21
3.1.4. İşlenebilirlik 22
3.1.5. Esneklik 22
3.1.6. Yorulma mukavemeti 22
3.1.7. Kayma direnci 23
3.2. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler 24
3.2.1. Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi 25
3.2.2. Sünme deneyi 27
3.2.3. Dolaylı çekme esneklik modülü (ITSM) deneyi 29
3.2.4. Dinamik rijitlik ve yorulma deneyleri 31
3.2.5. Benzeşim deneyleri 35
3.2.5.1. Tekerlek izi deneyleri 35
3.3. Bitümlü Sıcak Karışım Tasarım Yöntemleri 37
3.3.1. Marshall yöntemi 37
3.3.2. Superpave karışım tasarımı 39
3.4. Bitümün Modifikasyonu 42
3.4.1. Bitümlü bağlayıcıların modifiye edilme nedenleri 42
3.4.2. Bitümün modifikasyon yöntemleri 43
3.4.3. Bitüm katkı maddelerinde aranan özellikler 44
3.4.4. Modifiye bitümlerde aranan özellikler 44
3.4.5. Bitümün modifikasyonu için kullanılan katkılar 45
3.4.6. Bitümün modifikasyon türleri 47
3.4.6.1. Kükürt ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu 47
3.4.6.2. Kauçuk ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu 48
3.4.6.3. Organo-mangan bileşiklerinin ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu 48
3.4.6.4. Termoplastik polimerlerin ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu 49
3.4.6.5. Termoplastik kauçukların ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu 49

3.4.6.6. Termoset ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu.....50
3.5. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi.....50
3.5.1. Dönel ince film etüvü (RTFOT) deneyi.....52
3.5.2. Basınç yaşlandırma kabı (PAV) deneyi.....53
3.5.3. Dinamik kayma (kesme) reometresi (DSR) deneyi.....54
3.5.4. Dönel viskozimetre (RV) deneyi.....59
3.5.5. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi.....61
3.5.6. Doğrudan çekme (DTT) deneyi.....64

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....68

4.1. Piroliz ve Destilasyon.....68
4.1.1. Gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC/MS) analizleri.....72
4.1.2. Elementel analizler.....74
4.2. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler.....75
4.2.1. Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deney sonuçları.....77
4.2.2. Dinamik kesme reometresi (DSR) deney sonuçları.....79
4.2.3. Kiriş eğilme reometresi (BBR) deney sonuçları.....87
4.2.4. Dönel viskozimetre (RV) deney sonuçları.....92
4.3. PG Sınıfının Belirlenmesi.....95
4.4. Agreganın Karakteristik Özelliklerinin Belirlenmesi.....96
4.5. Marshall Yöntemi İle Optimum Bağlayıcı Oranı Tespiti.....97
4.5.1. Marshall oranı (MQ) deney sonuçları.....111
4.6. Superpave Karışım Tasarımı.....112
4.6.1. Superpave dizayn agrega gradasyonu.....112
4.6.2. Superpave deney numunelerini hazırlama adımları.....116
4.6.3. Saf karışımın bitümlü bağlayıcı içeriğinin tespit edilmesi.....118
4.6.4. Modifiye edilen karışımın bitümlü bağlayıcı içeriğinin tespit edilmesi.....120
4.7. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Yaşlanmanın Etkisi.....122
4.7.1. Kalıcı Marshall Stabilitesi deneyi.....123
4.7.2. Kısa süreli yaşlandırılmış numunelerin Marshall deney sonuçları.....125
4.7.3. Uzun süreli yaşlandırılmış numunelerin Marshall deney sonuçları.....130
4.8. Hamburg Tekerlek İzi Deneyi.....136
4.8.1. Tekerlek izi deneyi ve tekerlek izi miktarlarının değerlendirilmesi.....137

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....149

KAYNAKLAR.....154

EKLER.....162

ÖZGEÇMİŞ.....176

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

τ	: Kayma mukavemeti
σ	: Normal gerilme
Rm	: Bitümlü sıcak karışımın rijitlik modülü
ε	: Eksenel şekil değiştirme (deformasyon)
Nf	: Yorulma çatlağı meydana gelmesi için tekrarlı yük uygulama sayısı
Em	: Bitümlü sıcak karışımın esneklik modülü
P	: Bitümlü sıcak karışıma uygulanan yük
Hy	: Bitümlü sıcak karışımın yatay deformasyonu
h	: Numunenin kalınlığı
ν	: Poisson oranı
Vd	: Bitümlü sıcak karışımın düşey deformasyonu
ITS	: Bitümlü sıcak karışımın dolaylı çekme mukavemeti
Pmaks	: Numuneye uygulanan maximum yük
d	: Numune çapı
ITSR	: Dolaylı çekme mukavemeti oranı
G*	: Bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü
δ	: Bitümlü bağlayıcının faz açısı
f	: Frekans (radyan)
ω	: Frekans (Hz)
τmaks	: Maksimum kayma gerilmesi
τmin	: Minimum kayma gerilmesi
γmaks	: Maksimum kayma deformasyonu
γmin	: Minimum kayma deformasyonu
γ	: Kayma deformasyonu
T	: Uygulanan tork
r	: Numune yarıçapı
θ	: Dönme açısı
G”	: Bitümlü bağlayıcının kayıp modülü
G’	: Bitümlü bağlayıcının depolama modülü
L	: Mesnetler arası açıklık
Es	: Elastisite modülü
I	: Asfalt kirişin kesit atalet momenti
PI	: Penetrasyon indisi
S(t)	: Bitümlü bağlayıcının t anındaki sünme sertliği
m	: Bitümlü bağlayıcının sünme oranı
b	: Asfalt kiriş uzunluğu
δ(t)	: Asfalt kirişte t anında oluşan defleksiyon
S	: Bitümlü bağlayıcının sünme sertliği
W	: Ağırlık
VMA	: Mineral agregadaki boşluk hacmi
Vfb	: Bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk hacmi
Va	: Hava boşluk hacmi
Vb	: Asfalt bağlayıcının hacmi
V	: Numune Hacmi
Dp	: Hacim özgül ağırlık
Dt	:Teorik özgül ağırlık

Nini	: Başlangıç yoğurma sayısı
Ndes	: Dizayn yoğurma sayısı
Nmaks	: Maksimum yoğurma sayısı
Pa.s	: Pascal-saniye
cP	: Santipois
RMS	: Kalıcı Marshall stabilitesi
MQ	: Marshall oranı
KN	: Kısa süre yaşlandırılmış, normal numune
KŞ	: Kısa süre yaşlandırılmış, koşullandırılmış numune
UN	: Uzun süre yaşlandırılmış, normal numune
UŞ	: Uzun süre yaşlandırılmış, koşullandırılmış numune

Kısaltmalar

KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavement (Üstün Performanslı Asfalt Kaplama)
SHRP	: Strategic Highway Research Program (Stratejik Karayolu Araştırma Programı)
RTFOT	: Rolling Thin Film Oven Test (Dönel İnce Film Fırını Testi)
PAV	: Pressure Aging Vessel (Basınçlı Yaşlandırma Kabı)
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kesme (kayma) Reometresi)
BBR	: Bending Beam Rheometer (Kiriş Eğme Reometresi)
DTT	: Direct Tensile Tester (Doğrudan Çekme Deneyi)
PG	: Performance Grade (Performans Sınıfı)
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Malzeme ve Test Birliği)
AC	: Asphaltic Cement (Asfalt Betonu)
ITSM	: Indirect Tensile Strength Modulus (Dolaylı Çekme Esneklik Modülü)
ITS	: Indirect Tensile Strength (Dolaylı Çekme Mukavemeti)
ITSR	: Indirect Tensile Strength Rate (Dolaylı çekme mukavemeti oranı)
FHWA	: Federal Highway Administration (Federal Karayolu İdaresi)
SMA	: Stone Mastic Asphalt (Taş mastik asfalt)
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
GC/MS	: Gaz Kromatografisi - Kütle Spektrometresi
UMATA	: Universal Material Testing Apparatus
SBS	: Stiren Bütadien Stiren
WMA	: Warm-mix asphalt (Ilık Asfalt)
GPC	: Jel geçirgenlik kromatografisi
BS	: British Standards
TRRL	: Transport and Rood Research Laboratory
SGC	: Superpave Gyratory Compactor (Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı)
SBR	: Stiren-bütadien
EVA	: Etil-vinil-asetat
APA	: Asphalt Pavement Analyzer
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussees
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
PID	: Proportional–Integral–Derivative
RAP	: Reclaimed Asphalt Pavement (Geri kazanılmış asfalt kaplama)
SCB	: Semi Circular Bending Test (Yarım daire eğilme deneyi)
APP	: Ataktik polipropilen

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı ve Yöntemi

Doğal kaynaklarımız, dünya nüfusunun ve tüketimin hızla artması sonucu her geçen gün azalmaktadır. Doğal kaynaklarımızın korunması ve verimli kullanılması için atıkların daha iyi değerlendirilmesi sürdürülebilir bir yaşam için geleceğe yapılan en önemli yatırımdır. Günümüzde biyokütle atık kontrolündeki en büyük problemlerden birisi de atıkların günden güne artması ve ciddi boyutlarda çevre sağlığını tehdit etmesidir. Birçok ülkenin karşı karşıya kaldığı bu sorun son yıllarda sayıları artan çevresel kuruluşları ve bilim adamlarını çözüm aramaya zorlamaktadır. Atık malzemelerin değerlendirilmesi en cazip uygulamalardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yol yapımı, atıkların değerlendirildiği alanların başında gelmektedir. Böylece, atıkların oluşturacağı çevre kirliliği önlenerek ülke ekonomisine de katkıda bulunulmaktadır.

Lastikler araç altından söküldükten sonra ya "kullanılmış lastik" ya da "ömrünü tamamlamış lastik" olurlar. Lastiklerin diş derinliği belirli bir milimetreye (binek araç lastikleri için 1,6 mm'dir.) düştüğü zaman araç altında kullanımı tehlike arz etmekte olup, yasalar bu tür lastiklerle trafiğe çıkılmasına izin vermemektedir (URL 1).

Dünyada yılda 1,4 milyar adet (yaklaşık 17 milyon ton) atık lastik ortaya çıkmakta ve bunların büyük çoğunluğu açık alanlara veya çöplüklere bırakılmaktadır (Sienkiewicz ve ark., 2012).

Her yıl Türkiye'de yaklaşık olarak 180.000–200.000 ton civarında atık lastik olup, bu lastiklerin geri kazanım/geri dönüşümünün sağlanması ekonomi ve çevre açısından çok önemlidir. Atık lastikler şiddetli yangınlara sebebiyet vermektedir. İçleri boşluklu olan bu lastiklerin yanması halinde söndürülmesi oldukça zor olmakla birlikte atmosfere yaydığı zararlı gazların da geleceğimize ciddi zararları vardır. Bir ton atık lastiğin yakılması 647 kilogram karbondioksit üretimine eşittir (URL 1).

Bir sıvılaştırma yöntemi olan, piroliz işleminin atık lastiklere hiçbir kimyasal katkı maddesi kullanılmadan uygulanabilir olması, prosesin kazançlı, güvenli ve çevre dostu bir dönüştürme yöntemi olmasını sağlamaktadır. Atık lastiklerin piroliz yöntemi ile geri dönüşümü alternatif bir enerji kaynağı oluşturmakta ve çevre kirliliği ile mücadelede sosyo-ekonomik kolaylıklar sağlamaktadır.

Yollar, diğer mühendislik yapılarının çoğu ile kıyaslanmayacak kadar ağır ve hareketli yük taşırlar. Karayolu taşımacılığının ulaştırma sektörü içindeki payı giderek artan bir eğilim göstermektedir. Ulaşım türleri arasındaki ilişki yurt içi şehirlerarası yolcu ve yük taşımalarının dağılımı incelendiğinde, yolcu taşımacılığında %91,8 yük taşımacılığında ise %88,8 olan karayolunun payı, karayolu ile taşımacılığın diğer ulaştırma türlerinden daha çok talebi karşıladığını göstermektedir (URL 2).

Türkiye İstatistik Kurumu'nun verilerine göre trafiğe kayıtlı araç sayısı 2014 Nisan ayı sonu itibarıyla 18.215.460'dır. Trafiğe kayıtlı toplam taşıt sayısı içerisinde en önemli yer tutan %52 değeri ile otomobildir (URL 3).

Ülkemizde %95'i asfaltla kaplı olan karayolu ağının %26'sı asfalt betonu olup geri kalan %69'lık kısmı hiçbir taşıma gücü olmayan sathi kaplama ile kaplıdır. Çizelge 1.1'de ülkemizde satıh cinsine göre yol ağı ve toplam karayolu uzunluğu verilmiştir (URL 4).

Çizelge 1.1. Satıh cinsine göre yol ağı

Satıh cinsine göre yol ağı (km)							
	Asfalt Betonu	Sathi Kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Geçit Vermez	Toplam
Otoyol	2127	--	--	--	--	--	2127
Devlet Yolları	12502	18364	71	92	29	283	31341
İl yolları	2368	26930	190	760	603	1304	32155
Toplam	16997	45294	261	852	632	1587	65623

01.01.2014 tarihi itibariyle

Karayolu üstyapıları, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin türlerine, özelliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit ve esnek olmak üzere iki şekilde inşa edilirler. Rijit üstyapının kaplama tabakası çimento betonundan oluşur. Bitümlü kaplama tabakalarıyla oluşturulan üstyapılar ise esnek üstyapılar olup kazanılan bilgi ve tecrübe nedeniyle ülkemizde tercih edilmektedir (Fındık ve Saltan, 2005).

Dünya çapında yıllık bitüm tüketimi 100 milyon tondur. Bunun % 80'i yolların yapım ve bakım uygulamalarında kullanılmaktadır (URL 5). Türkiye'nin bitüm talebi ise yılda yaklaşık 3 milyon tondur (URL 6). Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş. (TÜPRAŞ) 2013 yılında 2.924.000 ton bitüm üretimi yapmıştır (URL 7).

Son yıllarda ülkemizde ve dünyada artan trafik hacimlerini karşılamak ve kaplamaların hizmet ömrünü artırabilmek için daha kaliteli ve daha dayanıklı olan yol kaplamalarının yapımı artmaya başlamıştır. Dünyada olduğu gibi ülkemizde de

kaplamanın performansını artırmak yapım ve bakım masraflarını azaltmak amacıyla modifiye bitümler kullanılmaktadır. Bu çalışmada; bitümlü sıcak karışımlarda karşılaşılan kusurlara karşı çözümler getirmesi beklenen yeni bir yöntem ile bitümlü bağlayıcının ve karışımın modifikasyonunda, atık sıvı lastik katkısının karışımın özellikleri ve performansı üzerinde yaptığı etki incelenmiştir. Atık sıvı lastik katkısı ile bitümlü kaplamaların hizmet ömrünün artırılması, çevre sağlığına ve ülke ekonomisine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde; dünya genelinde atık lastik katkılı bitüm ve bitümlü karışımlar hakkında yapılan bilimsel çalışmalardan örnekler verilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde; bitümlü sıcak karışımlardan beklenen özellikler, uygulanan deneyler ve tasarım yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca, bitüm ve bitümlü karışımların özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan katkı maddeleri, Superpave bağlayıcı şartnamesi ve kullanılan deney yöntemleri hakkında gerekli bilgiler verilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde; aşağıda özetlenmiş deneysel çalışmalar verilmiştir:

- Piroliz yöntemi kullanılarak, atık lastikler için gerekli piroliz şartları sağlanarak sıvılaştırma işlemi yapılmıştır. Sıvılaştırılmış atık lastikler destilasyon deneyine tabi tutularak farklı sıcaklıklarda kaynayan maddelerin birbirlerinden ayrılması sağlanmıştır. Çıkan ürünlerin kimyasal içeriklerini aydınlatmak için Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi (GC/MS) ve elementel analizleri yapılmıştır.
- Piroliz yöntemiyle sıvılaştırılmış atık lastik farklı oranlarda ilave edilerek modifiye edilen bitümlerin geleneksel test yöntemleri (Yumuşama noktası, Penetrasyon ve Düktilite) ile fiziksel özellikleri ve bitümün fiziksel özelliklerinde meydana getirdiği değişiklikler belirlenmiştir.
- Sıvılaştırılmış atık lastik ile modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş saf bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristikleri dönel viskozite (RV) deneyi ile belirlenerek bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir.
- Dinamik kesme reometre (DSR) deneyi ile sıvılaştırılmış atık lastik ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının ve modifiye edilmemiş saf bitümlü bağlayıcının, yüksek servis sıcaklıklarındaki reolojik özellikleri olan kompleks kayma modülü

(G*) ve faz açısı (δ), bağlayıcıların "G*/sin(δ)" tekerlek izi oluşumuna karşı göstereceği dirençler, şartname kriterleri ile kıyaslanmış ve uygunluğu araştırılmıştır.

- Kiriş eğilme reometresi (BBR) deneyi sonucunda, sıvılaştırılmış atık lastik ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının ve modifiye edilmemiş saf bitümlü bağlayıcının düşük servis sıcaklıklarındaki performans seviyesi değerleri sünme sertliği (s) ve sünme oranı (m) değerleri belirlenmiştir.
- Sıvılaştırılmış atık lastik ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının ve modifiye edilmemiş saf bitümlü bağlayıcının, sıcak karışımın depolanma, taşınma, karıştırılma, serme ve sıkıştırma sırasında meydana gelen kısa dönem yaşlanmayı temsil eden dönel ince film fırını (RTFOT) deneyi ile bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlanma özellikleri belirlenmiştir.
- Sıvılaştırılmış atık lastik ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının ve modifiye edilmemiş saf bitümlü bağlayıcının, yolun servis ömrü boyunca oluşan uzun dönemli yaşlanmayı temsil eden basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi ile bitümlü bağlayıcıların uzun dönem yaşlanma özellikleri belirlenmiştir.
- Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri ve dizayn agrega gradasyonu belirlenmiştir. Saf bitüm ve sıvılaştırılmış atık lastikle modifiye edilmiş bitüm ile stabilite, akma ve optimum bitüm muhtevasının tayin edilebilmesi için Marshall deneyi yapılmıştır.
- Superpave karışım tasarımında, "Superpave Gratory Compactor" (SGC) denilen Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı ile saf bitüm ve sıvılaştırılmış atık lastikle modifiye edilmiş bitümün karışımın performans özellikleri üzerinde göstermiş olduğu iyileştirmenin görülebilmesi ve değerlendirilebilmesi amacıyla, Superpave dizayn yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca dizayn yöntemleri bakımından, bitümlü sıcak karışımlar incelenerek; Superpave yöntemi ile Marshall yönteminin bitümlü sıcak karışımların performansını nasıl etkilediği belirlenmiştir.
- Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen yaşlanma, bitümlü sıcak karışımların arazideki davranışını doğrudan etkilemektedir. Yaşlanma nedeniyle karışımların kırılganlığı ve çatlak ilerleyişine karşı dayanımları azalmaktadır. Saf ve atık sıvı lastik içeren bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi ile nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı

Marshall stabilitesi deneyi kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelere uygulanmıştır.

- Esnek üstyapılarda yol boyunca düşey kalıcı deformasyon olarak görülen, önemli bozulma türlerinden birisi olan tekerlek izi oluşumu katkılı ve katkısız tüm karışım numunelerine Hamburg tekerlek izi cihazında uygulanarak, numunelerin tekerlek izi performansları belirlenmiştir.

Son bölümde deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiş ve çeşitli önerilerde bulunularak atık sıvı lastik katkısının katkı maddesi olarak kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çelik, 2001'de yaptığı çalışmada, lastikle modifiye edilmiş bitümlü asfalt betonunun yorulma davranışının laboratuvar özelliklerini incelemiş ve parçalanmış otomobil lastiği ile modifiye edilmiş bağlayıcının asfalt betonunun yorulma davranışına etkisini değerlendirmiştir. Kiriş numunelerinin yorulma sürelerini belirlemek için sabit basınç deney yöntemi kullanılmıştır. Bu çerçevede, asfalt betonunun yorulma davranışına lastikle modifiye edilmiş bitümün ve farklı bağlayıcı oranlarının (optimum bağlayıcı oranının % 0,5 üstü ve % 0,5 altı) etkisi incelenmiştir. Bitümün otomobil lastiği ile modifikasyonu, asfalt betonunun yorulma süresini önemli ölçüde artırmıştır. % 5 oranında küçük bir katkı, 50 penetrasyon bitüm için yorulma süresini 2 kat artırırken 100 penetrasyon bitümle yapılan modifikasyon sonucu yorulma süresinin 23 kat artığı gözlenmiştir.

Amirkhanian, 2001'de, Güney Karolina Ulaştırma Departmanı tarafından yapmış olduğu araştırmalarında, atık lastikler hem bitümlü bağlayıcıya hem de karışımına katılarak kaplama performanslarını izlemiştir. Lastiğin doğrudan karışıma katıldığı bölgelerde katkılı karışım kontrol karışımına oranla daha iyi dayanım gösterse de kayma direnci daha düşük ölçülmüştür. Lastik modifiyeli bağlayıcıdan üretilen karışım ise kontrol numunesine oranla daha fazla kayma direnci ve dayanıma sahip olduğu görülmüştür.

Navarro ve ark., 2002'de yaptıkları çalışmada, lastikle modifiye edilen bitümlü bağlayıcının performansını, lineer viskoelastik özelliklerini ve lastik parçacık boyutunun bağlayıcının reolojik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, viskoelastik davranışı değiştirilmemiş ve polimer modifiye (SBS) bitümlü bağlayıcı ile karşılaştırılmıştır. Lastik ile modifiye edilen bağlayıcılar, değiştirilmemiş bağlayıcılara göre daha yüksek viskoziteli ve bağlayıcının viskoelastik özelliklerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Hunt, 2002'de yapmış olduğu çalışmada, Oregon kentinde lastik atık katkılı asfalt karışımları arazide test etmiştir. Atık lastik katkılı bitümden üretilen esnek kaplama bölgesi, kontrol bölgesine oranla daha iyi bir performans sergilemiştir. Atık lastik katkısının çatlak ve deformasyon oluşumunu azaltarak asfalt tabakasının ömrünü uzattığı ve bakım-onarım maliyetlerini azalttığını tespit etmiştir.

Engle ve ark., 2002'de yapmış oldukları çalışmalarında, Iowa ulaştırma departmanınca yapılan arazi testlerinde, atık lastik katkılı asfalt ile geleneksel asfalt karışımlarını performans yönünden karşılaştırmışlardır. İki karışım arasında belirgin bir performans farkı kaydedilmemesine rağmen, atık lastik katkılı karışımın kış aylarında yansıma çatlaklarına karşı daha dayanıklı olduğunu görmüşlerdir.

Huang ve ark., 2002'de, Lousiana'da ulaştırma departmanı tarafından yapmış oldukları çalışmada, atık lastik katkılı karışımın özelliklerini hem arazide hem de laboratuarda incelemişlerdir. Laboratuar deneylerinde atık lastik katkılı karışımın Marshall stabilitesi daha az, akma değeri ise daha yüksek bulunmuştur. Yol testlerinde ise katkılı kaplamalarda, genel olarak daha az tekerlek izi derinliği ve çatlak oluşumu gözlemlemişlerdir.

Dantas Neto ve ark., 2003'te yaptıkları çalışmada, lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Bitümlü bağlayıcıya katılan atık lastik, bağlayıcının viskozitesini ve yumuşama sıcaklığını artırdığını, lastik modifiyeli bağlayıcıdan üretilen karışımların, sertlik modüllerinin atık lastik oranı artıkça düştüğünü görmüşlerdir. Buna karşın daha fazla atık lastik içeren karışımların yorulma ömürlerinin uzadığını belirlemişlerdir.

Çelik, 2003'te yaptığı çalışmada, vulkanize otomobil lastik parçacıkları ile modifiye edilmiş bitümlerin Penetrasyon indisi (PI) incelemiştir. Dört farklı boyutta vulkanize otomobil lastik parçacıkları, 2, 5, 10 ve 20 oranlarında, 50 ve 100 penetrasyon dereceli iki farklı temel bitüm içerisine 160 °C de farklı karıştırma sürelerinde (1/2, 2, 4 ve 6 saat) karıştırılmıştır. Otomobil lastiği ile modifiye edilmiş bitümlerin yumuşama noktası ve penetrasyon değerlerine bağlı olarak belirlenen penetrasyon indisi değerleri verilmiş, penetrasyon ile viskozite değerleri arasındaki ilişki incelenmiş ve literatürle karşılaştırılmıştır. 50 penetrasyon dereceli bitüme belirli bir oranda (%5) lastik katkısı ile bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin artığı, bu miktarın üzerinde yapılan lastik katkısında ise sıcaklık hassasiyeti azaldığı gözlenmiştir. 100 penetrasyon dereceli bitüme yapılan lastik katkısının ise bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini düşürdüğü gözlenmiştir. Farklı lastik boyutları ilave edilerek elde edilen bağlayıcıların tümünde de lastik katkı oranı artırıldıkça sıcaklık hassasiyetinde dereceli bir azalma görülmüştür. Bu çalışmada, lastikle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılardaki penetrasyon ile viskozite arasında ilişkinin farkı ve derecesi de ortaya konmuştur.

Phetcharat ve Kongsuwan, 2003'te yaptıkları çalışmada, geri kazanılmış lastik atığın bir koruyucu soğuk asfalt uygulaması olan slurry seal kaplamaya olan etkisini araştırmışlardır. Slurry seal'de kullanılan CSS-1h (%60 bitümlü bağlayıcı, %40 su) tipi emülsiyonu lastik tozları ile modifiye etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar ışığında lastik atık katkısı slurry seal kaplamanın esnekliğini ve yük taşıma kapasitesini artırırken, kusma eğilimini ise azalttığını belirlemişlerdir.

Navarro ve ark., 2004'te yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %9 atık lastik kauçuğu ile modifiye edilmiş bitümün, kullanım ve işlenebilme sıcaklıklarındaki davranışını incelemişlerdir. Çalışmada, kauçuk parçacığı boyutunun bir fonksiyonu olarak, atık lastik kauçuğuyla modifiye edilmiş bitümlerin mekanik özellikleri ve depolama dayanıklılığı araştırılmış, öğütülmüş araç lastiği kauçuğunun bitüme eklenmesinin, yüksek servis sıcaklıklarında lineer viskoelastisiteyi ve viskoziteyi artırdığını, düşük sıcaklıklarda depolama stabilitesini azalttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, atık lastik kauçuğuyla modifiye edilmiş bitüm, hem tekerlek izlerine, hem de yorulma çatlaklarına karşı direncini artıran mekanik özellikler gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Tortum ve ark., 2005'te yaptıkları çalışmada, bitümlü bağlayıcıya katılacak otomobil lastiğinin optimum parametrelerini belirlemişlerdir. Marshall stabilitesi ve akma testlerinden elde edilen optimum lastik katkı oranları tespit edilmiş, atık lastik parçacıklarının asfalt karışımları için hem sıcak hem de soğuk iklimlerde iyi bir modifiye edici olabileceğini belirlemişlerdir.

Deniz ve ark., 2005'te yaptıkları çalışmada, kullanılmış otomobil lastiklerinin bitümlü sıcak karışımların performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Lastik parçalarını farklı oranlarda (% 1, % 2, % 5 ve % 7) bitümlü sıcak karışıma katarak, farklı sıcaklılarda dolaylı çekme, statik sünme, tekrarlı sünme ve Marshall stabilite deneylerine tabi tutmuşlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda otomobil lastiklerinin belirli oranlarda bitümlü karışımlara katılması halinde, soğuk iklimlerin hakim olduğu bölgelerde kalıcı deformasyonlara karşı olumlu etki yapacağını görmüşlerdir.

Dantas Neto ve ark., 2005'te yaptıkları çalışmada, atık lastik kauçuğunu kuru proses olarak yani mineral agrega olarak karışıma ilave ederek bu karışımların rijitlik ve yorulma ömürlerini incelemişlerdir. Kauçuk oranı %2-%3,6 aralığında seçilmiş, iyi bir karşılaştırma yapabilmek için kauçuk içermeyen saf karışım ve ıslak proses ile üretilmiş karışım numuneleri de hazırlanmıştır. Sonuçta kuru proses ile modifiye edilen karışımların saf karışımlara göre önemli ölçüde mekanik özelliklerinde bir artış sağladığını tespit etmişlerdir.

Putman ve ark., 2005'te yaptıkları çalışmada, A.B.D. Clemson Üniversitesi asfalt-lastik teknoloji servisinde atık lastik parçacıklarının bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Atık lastiğin, bağlayıcının viskozitesini ve bozulma sıcaklığını artırdığını tespit etmişlerdir.

Dantas Neto ve ark., 2006'da yaptıkları çalışmada, atık lastik kauçuğu gradasyonunun, asfalt özelliklerini etkileyen en önemli değişkenlerden biri olduğuna dikkat çekmiş ve yaptıkları çalışmada atık lastik kauçuğu gradasyonunun penetrasyon, Brookfield viskozimetresi kullanılarak, sertlik ve yumuşama noktası üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Test numuneleri, 50/70 penetrasyonlu saf bir asfaltla ve temelde eski lastikleri ortam sıcaklığında yırtma ve ezmeye dayanan öğütme süreciyle elde edilmiş parça kauçukla üretilmiştir. Karıştırma süresi 60 dakika ve karıştırma sıcaklığı 170 ºC olarak seçilmiştir. Sonuçlar döner vizkozite ve sertliğin, parça kauçuktan en çok etkilenen özellikler olduğunu göstermiştir. Ayrıca kauçuk parçacıklarının yüzey alanının artmasının yani küçük boyuttaki parçacıkların viskoziteyi artırdığı, iri parçacıkların ise daha çok sertliği etkilediği belirtilmiştir.

Hamzah ve ark., 2006'da yaptıkları çalışmada, 80/100 penetrasyonlu saf bitümün ve parçalanmış atık lastikle modifiye edilmiş bitümün reolojik özelliklerini, dinamik kesme reometresi (DSR) ile incelemiş ve ayrıca bu bağlayıcılar ile hazırlanmış bitümlü sıcak karışımların rijitlik modüllerini tespit etmişlerdir. Karışım numunelerini yoğurmalı sıkıştırıcı ile hazırlamışlar, bu yaklaşım ile bitümün kompleks modülü ve karışımın rijitliği arasındaki ilişkiyi belirlemeye çalışmışlardır. Sonuçta, öğütülmüş araç lastiği ilavesinin orijinal bitümün $G^*/\sin\delta$ değerini artırdığını ve dolayısıyla daha uzun bir yorulma ömrüne sahip olduğunu, yaşlanmadan daha az etkilendiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, karışım numunelerinde öğütülmüş araç lastiği modifiyeli karışımların %24 daha yüksek Marshall Stabilitesi, %56 daha yüksek sünme rijitliği değeri verdiğini ve daha düşük ısı hassasiyeti gösterdiğini belirlemişlerdir.

Wayne ve Magdy, 2006'da yaptıkları çalışmada, bitümün öğütülmüş araç lastiği kauçuğu ile modifikasyonunda sıcaklık, süre, karıştırma hızı ve katkı oranının etkilerini incelemişlerdir. Sonuçta, düşük sıcaklıklarda polimerizasyonun uzun sürdüğünü, yüksek sıcaklıklarda ise çok kısa sürdüğünü, karıştırma süresinde ise bir başlangıç periyodunun olduğunu bundan sonra ise stabil bir yapı oluştuğunu belirtmişlerdir. Bu başlangıç periyodunun ise kauçuğun kökeni ve boyutuyla ilgili olduğunu, büyük dane boyutlu kauçuklarda yüksek karıştırma hızının bu parçacıkların boyutunu küçülttüğünü ve böylece modifikasyon sürecini stabilize etmeye yardımcı olduğunu ve yüksek kauçuk

oranının etkileşim şartlarını istenilen kompleks modülü ve faz açısı bakımından düşük kauçuk oranına göre daha fazla iyileştirmediğini belirlemişlerdir.

Pereira ve ark., 2006'da yaptıkları çalışmada, biri laboratuvarda diğeri plentte olmak üzere iki farklı şekilde üretilmiş asfalt kauçuk bağlayıcı maddesiyle üretilmiş bitümlü sıcak karışımları incelemişlerdir. Yoğun ve açık gradasyonlu karışımların yorulma ve kalıcı deformasyon davranışlarını tespit ederek, plentte hazırlanmış bağlayıcı ile üretilen karışımların tekerlek izi dirençlerinin, laboratuvarda hazırlanmış bağlayıcı ile üretilen karışımların ise yorulma ömürlerinin yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Yıldırım, 2007'de yaptığı çalışmada, çeşitli polimer yapılı malzemelerin bitümlü bağlayıcı özelliklerine etkisini araştırmıştır. Doğal kauçuk üzerine yaptığı testlerde, kauçuğun bağlayıcının tekerlek izi dayanımını ve esnekliğini artırdığını ancak kauçuğun bitümlü bağlayıcıdan ayrışmaya müsait olduğunu görmüştür. Atık otomobil lastiklerinin ise bağlayıcının tekerlek izine ve yansıma çatlaklarına karşı direncini yükselttiğini tespit etmiştir.

MacLeod ve ark., 2007'de yaptıkları çalışmada, atık lastik katkısının bitümlü bağlayıcının özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Atık lastik katkısının bitümlü bağlayıcı kıvamını artırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca modifiye edilen bitümlü bağlayıcının daha düşük sıcaklıklarda depolanma stabilitesinin artığını, bitümlü bağlayıcıdaki ayrışmaların azaldığını, uygulanan sünme testinde ise atık lastik modifiyeli olan numunelerin daha iyi performans gösterdiğini bulmuşlardır.

Chiu ve Lu, 2007'de yaptıkları çalışmada, öğütülmüş lastik atıklarının taş mastik asfaltın (SMA) performansına etkisini araştırmışlardır. ASTM D6114 nolu standart değerlerine uygun olacak şekilde modifiye edilen bitümlü bağlayıcı ile fiber kullanmadan SMA üretmişlerdir. Atık lastik katkılı SMA karışımlarının, geleneksel taş mastik asfalttan daha iyi bir performans sergilediğini tespit etmişlerdir.

Xiao ve ark., 2007'de yaptıkları çalışmada, atık lastiklerin tekerlek izi oluşumu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Atık lastik katkılı bağlayıcılar, karışımın deformasyona ve tekerlek izi oluşumuna karşı direncini artırmış, tekerlek izi testinde daha az tekerlek izi derinliği meydana geldiğini görmüşlerdir.

Cao, 2007'de yaptığı çalışmada, atık lastik kirliliğini en aza indirmek ve asfalt karışımlarını özelliklerini iyileştirmek için laboratuarda, kuru proses ile geri dönüştürülmüş lastik kauçuğuyla modifiye edilmiş asfalt karışımlarını özelliklerini araştırmıştır. Farklı kauçuk miktarlarına sahip, toplam karışım ağırlığının %1, %2 ve

%3 olmak üzere, üç tip asfalt karışımını ve kauçuksuz bir kontrol karışımının testlerini gerçekleştirmiştir. 60 ^{o}C'de tekerlek izi ve, 10 ^{o}C'de dolaylı çekme deney sonuçlarına göre kuru proses ile lastik kauçuğu ilavesinin, asfalt karışımların mühendislik özelliklerini iyileştirdiğini ve yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyona karşı direnci, düşük sıcaklıkta ise çatlak oluşumuna karşı dayanımlarını belirgin şekilde geliştirdiğini saptamıştır.

Wong ve Wong, 2007'de yaptıkları çalışmada, atık lastikler ile modifiye edilen bitümlü karışımların yüksek sıcaklıklara karşı sıcaklık hassasiyetinin belirlenmesi için atık lastiklerin farklı boyutlardaki etkilerini incelemişlerdir. Hazırlanan karışımlarda atık lastik oranı toplam bağlayıcı ağırlığının % 10'u olarak belirlenmiştir. Boyutları 0,15 mm, 0,30 mm ve 0,60 mm olarak belirlenen atık lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı özellikleri, modifiye edilmemiş bağlayıcı özellikleri ile geniş bir sıcaklık aralığında ve yaşlandırma şartlarında karşılaştırılmıştır. Atık lastikler ile hazırlanan hem bağlayıcı hem de karışımların yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine karşı dayanım performanslarının daha iyi olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, bu üç atık lastik boyutlarından 0,15 mm boyutundaki atık lastikle modifiye edilen karışımlar AC-10 ve AC-20 için en iyi sonucu verirken, 0,60 mm boyutundaki lastikle modifiye edilen karışımlar ise poroz asfalt karışımlarda en iyi sonucu verdiği görülmüştür.

Lee ve ark., 2008'de yaptıkları çalışmada, iki farklı atık lastik türü ile bitümlü bağlayıcıyı modifiye ederek reolojik özelliklerini incelemişler, her iki lastik türünün de bitümlü bağlayıcının viskozitesini artırarak, asfalt karışımının tekerlek izi oluşumu ve yorulma çatlaklarına karşı direncini artırdığını, bitümlü bağlayıcıdaki atık lastik oranı artıkça yorulma çatlaklarına karşı olan dayanımın da artığını görmüşlerdir.

Cooper, 2008'de yaptığı çalışmada, geleneksel bitümlü sıcak karışım, geri kazanılmış asfalt kaplamalar ve öğütülmüş kauçuk içeren karışımların laboratuvar performansını araştırmıştır. Bu çalışmaya, Louisiana'da yaygın olarak kullanılan kalın taneli doğal kum ve silisli kalker agregalar dahil ederek, toplam altı karışımın kıyaslı laboratuvar değerlendirmelerini incelemiştir. Öğütülmüş kauçuk, hem yaş proses olarak bitüm modifikasyonunda hem de kuru proses olarak direk karışıma ilave etmiştir. Kauçuk oranını bağlayıcı ağırlığının %10'u olarak kullanmıştır. Bağlayıcılar üzerinde fiziksel ve reolojik testler uygulamıştır. Bitümlü karışımların kalıcı deformasyon ve yorulma davranışlarının belirlenmesi için yarım dairesel eğilme, dinamik modül, dinamik sünme ve modifiye edilmiş Lottman testleri uygulamıştır. Sonuçta, %40 oranında PG 64-22 seviyesinde geri dönüştürülmüş asfalt çimentosu ve %10 öğütülmüş

kauçuk karışımının PG 70-28 gibi davrandığını görmüştür. Öğütülmüş kauçuk ilavesinin karışımların nem hassasiyetini azalttığını, bu karışımların iyi bir kırılma direnci sergilediğini, 54 ^{o}C'ye kadar lineer-viskoelastik bölgede kalabildiğini ve tekerlek izine karşı çok yüksek bir direnç gösterdiği belirlemiştir.

Chiu, 2008'de yaptığı çalışmada, Tayvan'da yürütülen arazi testlerinde lastik atıkların asfalt karışımın performansına etkilerini incelemiştir. Atık lastikle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı ile üretilen karışımın kusma eğiliminde, kontrol numunesine oranla iyileşme gözlemlenmiştir. Atık lastik katkısının asfalt karışımın saha performansını da artırdığını tespit etmiştir.

Chiu ve ark., 2008'de yaptıkları çalışmada, çeşitli asfalt karışımları, kaplamaların bakım ve onarımı sırasındaki malzeme ve enerji verimliliği bakımından karşılaştırmışlardır. 40 yıllık bir süreçte atık lastik katkılı asfalt karışımın, geleneksel asfalt karışım ve cam atık katkılı asfalt karışıma oranla malzeme ve enerji bakımından daha verimli olduğunu saptamışlardır.

Çelik ve Atiş, 2008'de yaptıkları çalışmalarında, atık lastik modifiyeli bitümlü bağlayıcı ile üretilen asfalt karışımının sıkışabilirliği üzerine çalışmışlardır. Bitümlü bağlayıcı içerisindeki atık lastik oranı artıkça, karışımın işlenebilirliği azalmaktadır. Atık lastik dane boyutu büyüdükçe işlenebilirliğin daha da düştüğünü görmüşlerdir. Atık lastik modifiyeli karışımın sıkışabilme katsayısı kontrol karışımından daha yüksek çıkmıştır ve modifiyeli karışımın sıkışabilmesi için daha çok enerjiye ihtiyaç olduğunu saptamışlardır.

Shen ve ark., 2009'de yaptıkları çalışmada, öğütülmüş lastiğin dane boyutunun yüksek sıcaklık koşullarında bitümlü bağlayıcı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Atık lastik dane çapı büyüdükçe bitümlü bağlayıcının elastik özelliği ve tekerlek izine karşı direncinin artığını saptamışlardır.

Aflaki ve Tabatabaee, 2009'da yaptıkları çalışmada, çeşitli bitüm modifiye edicileri kullanarak bağlayıcının reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Atık lastikle üretilen modifiye bitümlü bağlayıcıların hem yüksek hem de düşük sıcaklıklardaki performansında iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir.

Xiao ve ark., 2009-a'da yaptıkları çalışmada, atık lastik katkısının, bitümlü bağlayıcının yaşlanmasına etkisi araştırmışlardır. Çalışmada saf, atık lastik katkılı ve SBS katkılı bağlayıcıların yaşlanma değerleri karşılaştırılmıştır. 20 ve 40 saatlik yapılan yaşlanma testlerinde atık lastik katkısının, saf bağlayıcının yaşlanma direncini belirgin

şekilde geliştirdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, SBS katkılı bağlayıcı ile benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

Xiao ve ark., 2009-b'de yaptıkları çalışmada, atık lastik bağlayıcısının ılık asfalt karışımının (WMA) yorulma direnci üzerine çalışmışlardır. Kiriş testi sonuçlarına göre, hem atık lastik hem de WMA modifiye edicileri benzer davranışlar sergileyerek geleneksel bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerini geliştirmiştir.

Maharaj ve ark., 2009'da yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş araç lastiklerinin, Trinidad doğal göl asfaltı ve Trinidad petrol asfaltı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Atık lastik katkısı her iki asfalt türünün de esnekliğini artırarak kırılma ve kalıcı deformasyon direncini kayda değer şekilde geliştirdiğini görmüşlerdir.

Karacasu ve Bilgiç, 2009'da yaptıkları çalışmada, değişik şekil ve boyuttaki atık lastiklerin asfalt betonu içerisindeki etkisini araştırmışlardır. Numuneler üzerinde Marshall ve sünme deneyleri yapılmıştır. Marshall dayanım değerleri şartname sınırları içerisinde kalmasına rağmen, atık lastik ilavesi ile boşluk oranı ve akma değerlerinin artığı görülmüştür. Tekrarlı yükler altında meydana gelen deformasyon sonuçları incelendiğinde % 2 oranında lastik tozu ilave edilerek üretilen asfalt betonlarında deformasyonların azaldığı tespit edilmiştir.

Arabani ve ark., 2010'da yaptıkları çalışmada, lastik lifi örgüsünün, asfalt kaplamasını takviye etmedeki kullanımını gözlemlemişlerdir. Lastik lifi örgüsüyle takviye edilmiş asfalt kaplamanın çatlama potansiyelini değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, lastik lifi örgüsü takviyesinin bakım ve rehabilitasyon maliyetlerini düşürürken, asfalt kaplamanın çatlamaya karşı direncini önemli ölçüde artırdığını ve hizmet ömrünü yükselttiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, atık lastiklerin asfalt karışıma etkisini incelemişlerdir. Üzerinde çalışılan lastik atığın, asfalt karışımının sünme testi değerlerine göre tekerlek izi derinliğini azalttığı ve dinamik etkiler altında çatlak ve kalıcı deformasyonlara karşı direncini artırdığını görmüşlerdir.

Xiao ve Amirkhanian, 2010'da yaptıkları çalışmada, agrega ağırlığının % 30'u kadar geri kazanılmış asfalt agregası ile dört farklı (% 0, 5, 10, 15) oranda lastik atık katkılı modifiyeli bağlayıcı kullanmışlardır. Lastik atık ilavesinin, bitümlü bağlayıcının viskozitesini artırarak, sünme ve yaşlanmaya karşı direncini yükselttiğini, karışımdaki lastik oranı artıkça, karışımın elastik modülünü artırdığını ve yorulma ömrünün uzadığını görmüşlerdir.

Kim ve ark., 2010'da yaptıkları çalışmada, atık lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Atık lastik katkısının, bağlayıcının viskozitesini, esnekliğini ve penetrasyon direncini yükselttiğini, bununla birlikte bağlayıcının kalıcı deformasyonlara ve sünme eğilimine karşı direncinin geliştiğini saptamışlardır.

Mortazavi ve ark., 2010'da yaptıkları çalışmada, doğal bitüm, geri dönüştürülmüş atık polietilen, geri dönüştürülmüş atık lateks ve atık lastik kullanmışlardır. Karışımların tasarımını yazılım programı kullanarak deney tasarımı metodu ile tespit etmişlerdir. Tüm karışımlar için süneklikte bir takım azalmalar görülse de bu malzemeler kullanılarak çeşitli penetrasyon sınıflarında üretim yapılabileceğini tespit etmişlerdir. Tüm karışımlar içinde en iyi sonucu % 10 doğal bitüm ve % 5 oranında geri dönüştürülmüş atık lateks kombinasyonunun verdiğini, 60/70 penetrasyon dereceli bitümden elde edilen modifiye bitüm, saf bitüm ile karşılaştırıldığında kalıcı deformasyonlara ve tekerlek izine karşı direncin artığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, atık lastik parçacıklarının karışımın Frass kırılma noktasını (-21 °C) geliştirdiğini, karışımın sünekliğinde beklenmedik bir azalma olduğunu belirlemişlerdir.

Abojaradeh ve ark., 2010'da yaptıkları çalışmada, atık lastik katkılı bağlayıcı ile üretilen sıcak asfalt karışımlarının kırılma karakteristikleri üzerine çalışmışlardır. Lastik katkılı asfalt karışımların düşük sıcaklıklarda termal çatlaklara karşı direncinin artığını ve yorulma ömürlerinin uzadığını görmüşlerdir.

Paje ve ark., 2010'da yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş atık lastik kırıntısı ile üretilmiş bitümlü karışımları, içinde lastik olmayan bir referans bitümlü karışımın kaplama yüzeyinde akustik yönden davranışını karakterize etmişlerdir. Ses ve gürültü ölçümlerini bir test pistinde çeşitli deneysel kısımlarda gerçekleştirmişlerdir. Atık lastik ilavesi ile üretilmiş bitümlü karışımlardan yapılmış kaplamaların, referans bitümlü karışımdan yapılmış kaplamaya göre 2 dB kadar daha az ses ve gürültü düzeyi oluşturduğunu belirlemişlerdir.

Çolak, 2010'da yaptığı çalışmada, öğütme yöntemi ile atık araç lastiklerinden geri dönüştürülmüş kauçuk (CR), bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda olmak üzere iki şekilde değerlendirmiştir. İlk olarak öğütülmüş kauçukla modifiye edilen bitüm, dinamik kesme reometresi, dönel viskozimetre ve geleneksel bağlayıcı deneyleri ile incelemiştir. Daha sonra öğütülmüş kauçuk modifiyeli bitüm içeren sıcak karışımlar, kalıcı deformasyon, yorulma karakteristikleri ve rijitlik modülleri bakımından irdelenmiştir. Öğütülmüş kauçuk modifiyeli bitüm ve sıcak karışımların özellikleri,

değişik oranlarda SBS ile modifiye edilmiş bitüm ve sıcak karışımların özellikleri ile karşılaştırmıştır. Geleneksel bağlayıcı deneylerinde katkı oranının artması ile CR ve SBS modifiyeli bağlayıcıların daha düşük sıcaklık hassasiyeti sergilediğini ve bu davranışın SBS modifiyeli bağlayıcılarda daha belirgin olduğunu görmüştür. Dinamik sünme testi sonunda, SBS oranından iki kat fazla CR oranının aynı performansı yakaladığını, yorulma deneyinde ise %8 CR modifikasyonun %2,%3,%4 SBS modifikasyonundan daha iyi sonuçlar verdiğini, %8 CR modifiyeli karışımların kontrol karışımlarından %50 daha yüksek rijitlik modülü değerine sahip olduğunu belirlemiştir.

Çelik ve ark., 2011'de yaptıkları çalışmada, piroliz edilmiş atık araç lastiklerinden elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ile bitümün modifiye edilmesi ve bu katkı maddelerinin bitümün reolojik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Reolojik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesinde penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kesme reometresi (DSR), dönel ince film ısıtma deneyi (RTFOT), kiriş eğilme reometresi (BBR) deneylerini kullanmışlardır. Sıcak karışımın dayanımına olan etkisini Marshall deneyi ile belirlemişlerdir. Bağlayıcıya uygulanan deneyler sonunda, katkı maddelerinin bitümlü bağlayıcının özelliklerini değiştirdiğini, atık lastik yağının bitümün yaşlanma etkilerini azalttığını gözlemlemişlerdir. Bitümün PG sınıfı ise PG 64-22'den PG 58-28'e değiştiğini, kullanılan katkı ile Marshall stabilitesinin azaldığını belirlemişlerdir.

Kök ve ark., 2011'de yaptıkları çalışmada, atık lastik kauçuğunun bitüm modifikasyonunda kullanımını incelemiş, ayrıca SBS ile karşılaştırmışlardır. Geleneksel deneyler, dönel viskozimetre ve dinamik kayma reometresi deneyleri ile değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlardan, hem SBS hem de atık lastik kauçuğunun bitümün viskozitesini artırdığını, atık lastik kauçuğunun işlenebilirliği önemli ölçüde azalttığını belirlemişlerdir.

Gündüz, 2011'de yaptığı çalışmada, sert plastik, çubuk lastik, daneli lastik ve lastik tozu olmak üzere dört farklı lastik atık cinsi kullanarak, sıcak asfalt karışımlarına ‰ 2, 4, 6, 8 ve 10 oranlarında katarak, Marshall stabilite ve akma değerleri bulmuştur. Ayrıca, sünme deneyleri için en uygun atık oranlarını belirlemiştir. Sünme ve Marshall deney sonuçlarına göre sert plastik atık (‰ 4) ve lastik tozu (‰ 8) katkısının sıcak asfalt karışımın yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyon direncini artırdığını tespit etmiştir.

Er, 2011'de yapmış olduğu çalışmada, atık otomobil lastiğini farklı bir yöntemle, özel olarak yüksek basınç ve sürtünme etkisiyle öğütmüş, bu sayede yüzey

alanı artırılmış ve CMR-300 adı verilen bu toz lastik ıslak karışıma ilave ederek performansını izlemiştir. Deneyler normal asfalt betonu, %10 ve % 15 CMR-300 içeren bitümlü bağlayıcı ile üretilmiş asfalt betonu için gerçekleştirilmiştir. Genel olarak, CRM-300 katkı malzemesi gerek asfalt gerekse karışım içerisinde homojen bir dağılım sağlamış ve asfalt betonunun performans özelliklerinde iyileşmeler görülmüştür. Ancak en önemli özelliği bünyesinde biriktirdiği ısı enerjisi olmuştur. Bu özelliği ile asfaltın özellikle soğuk iklimli bölgelerde yol üzerindeki don etkilerini azaltacağı düşük sıcaklıklarda asfalt betonunun dökümünü sağlayabileceğini tespit etmiştir.

Mashaan ve ark., 2012'de yaptıkları çalışmada, bitümlü bağlayıcının performans özelliklerini geliştirmek, asfaltın tekerlek izi direncini artırmak ve kalıcı deformasyonu en aza indirmek için asfalt modifikasyonunda atık lastikleri kullanmışlardır. Geleneksel bağlayıcılara göre atık lastik ilavesinin kısmen de olsa orta sıcaklıklarda meydana gelen yorulma çatlaklarına karşı direnç gösterdiğini belirlemişlerdir.

Almeida Júnior ve ark., 2012'de yaptıkları çalışmada, atık lastikler ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıları, modifiye etmede en yaygın olarak kullanılan stiren bütadien stiren (SBS) ile karşılaştırmışlar ve atık lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcının SBS yerine kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Atık lastikle modifiye edilen bitümlü bağlayıcının, SBS standart özelliklerinin, sadece % 5'ini karşıladığını fakat AC 50/70 saf bitüme göre % 67 daha fazla süneklik gösterdiğini bulmuşlardır. Ekonomik olarak, SBS ile birlikte kullanılması halinde % 10 tasarruf yapılabileceğini belirlemişlerdir.

Wang ve ark., 2012'de yaptıkları çalışmada, PG 64-22 performans derecesine sahip saf bitümün ağırlığının % 10, % 15, % 20 ve % 25 oranlarında 0,425 mm çapındaki lastik ile modifiye etmişlerdir. Modifiye edilen bağlayıcılara % 2 Sasobit, % 4 RH ve % 5 Advera oranlarında katkı maddesi ilave edilerek bu numunelere RTFOT ve DSR deneyleri uygulanmıştır. Numunelerden ılık karışım asfalt (WMA) üretilmiş ve kontrol numuneleri karşılaştırılarak katkı maddelerinin etkisi araştırılmıştır.

Shatanawi ve ark., 2012'de yaptıkları çalışmada, atık lastik ile modifiye edilen bağlayıcıların orta sıcaklıktaki reolojik özelliklerini iyileştirmek için furfural ($C_5H_4O_2$) kullanmışlar, sonuçları dinamik kesme reometresi (DSR) ve jel geçirgenlik kromatografisi (GPC) deneyleri ile değerlendirmişlerdir. Furfural ($C_5H_4O_2$) ile aktive edilen lastik yüzeyi beş değişik bağlayıcı kullanılarak incelenmiştir. Sonuçta furfural ($C_5H_4O_2$) kullanımının atık lastik ile modifiye edilen bağlayıcıların özellikleri üzerinde

değişken etkilere sahip olduğu, en belirgin etkisinin ise atık lastik ile modifiye edilen bağlayıcıların depolama stabilitesi üzerindeki etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca, depolama stabilitesinde iyileştirme gösterdiğini, fakat furfuralın ($C_5H_4O_2$) yeni bağlar oluşturarak moleküler boyut dağılımında azalmaya neden olduğunu belirlemişlerdir. Atık lastik ile modifiye edilen bağlayıcıların özelliklerini iyileştirmek için daha uyumlu parametreler ve katkı maddeleri bulunmasını önermişlerdir.

Xiao ve ark., 2012'de yaptıkları çalışmada, PG 64-22 ve PG 52-28 performans dereceli saf bitümü ağırlığının % 0, % 5, % 10 ve % 15 oranlarında, 0,425 mm çapındaki atık lastik ile modifiye etmişler ve % 0, % 15, % 25 ve % 30 geri kazanılmış asfalt kaplama içeriklerindeki karışımlarla birlikte 34 adet Superpave karışımı hazırlamışlardır. Superpave karışım tasarımının geri kazanılmış asfalt kaplamalarda uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda, atık lastikler asfalt karışımın özelliklerini iyileştirmede başarılı olmuştur. Geri kazanılmış asfalt karışımlarda, atık lastik oranı artıkça optimum bağlayıcı içeriğinin ve agregalar arası boşluğun (VMA) azaldığını tespit etmişlerdir. Atık lastiklerin, geri kazanılmış asfalt karışımların işlenebilirliğini artırdığını ve Superpave karışım tasarımının geri kazanılmış asfalt karışımlarda kullanılmasının uygun olduğunu belirlemişlerdir.

İmamoğlu, 2012'de yaptığı çalışmada, Empedans tüpü ASTM E1050 ile gerçekleştirilen laboratuvar deneyi ile atık lastik katkılı asfaltın birleşenlerindeki değişimin ses sönümlemesindeki etkilerini incelemiştir. Atık lastik katkılı asfaltın ses sönümlemedeki davranışı ve bu davranışı etkileyen faktörler analiz ederek, atık lastik katkılı asfalt kaplamanın diğer bir trafik gürültüsü önlemi olan ses perdeleriyle birlikte kullanılmaları durumunda ses perdeleri inşa maliyetlerinde azalmaya ve efektif ses sönümlemesi sağlamasına yardımcı olacağı sonucuna varmıştır.

Mashaan ve Karim, 2013'te yaptıkları çalışmada, farklı karıştırma süresi ve karıştırma sıcaklığı ile değişik atık lastik oranlarının bitümlü bağlayıcı özellikleri üzerine etkisini birlikte incelemişlerdir. Sonuçlar, dinamik kesme reometresi (DSR) ve yumuşama noktası deneyleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, farklı atık lastik içeriği ve karıştırma sıcaklığının modifiye edilen bağlayıcı özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğu görülürken, karıştırma süresinin ise atık lastik ile modifiye edilen asfaltın performans özelliklerinin belirlenmesinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Atık lastik ilavesinin bitümlü bağlayıcıda kullanılabileceğini, G*, elastik modül ve yumuşama noktası değerlerini artırdığını tesbit etmişlerdir.

Wang ve ark., 2013'te yaptıkları çalışmada, lastik kırıntıları kullanılarak asfalt karışımları modifiye etmenin çevre dostu bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Granüler lastik içeriğini ağırlıkça karışımın %15, %18, %20, %22 ve %25 oranlarında kullanarak asfaltı modifiye etmişlerdir. Hazırlanan karışımların yorulma özelliklerini yarım daire eğilme deneyi (SCB) ile incelemişlerdir. Daha sonra çatlak ilerleme uzunluklarını görüntü işleme teknolojisi ile tespit etmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, lastik kırıntıları kullanılarak modifiye edilen karışımların yarım daire eğilme deneyinde saf bitümlü karışımlara göre yorulma ömürlerinin daha uzun olduğunu ve daha düşük bir çatlak büyüme oranına sahip olduklarını belirlemişlerdir.

3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Ülkemizde bitümlü sıcak karışımlar yaygın olarak kullanılmakta olup her geçen gün artmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar hem bitümlü bağlayıcının hem de agreganın uygun ısıya kadar ısıtılıp uygun oranlarda plentte karışımı ile elde edilmekte ve yüksek standartlı esnek kaplamaların üst tabakalarında kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar; aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarında kullanılır. Trafik yüklerinin yarattığı gerilmelere ve çevresel etkilere doğrudan maruz olduklarından dolayı temel ve alttemel tabakalarına nazaran daha stabil ve durabil olmalıdırlar. Ayrıca aşağıdaki işlevleri de sağlamak zorundadırlar; (Tunç, 2001).

- Taşıtlar için düzgün ve pürüzsüz yüzeyleri ile sürüş konforunu ve sürtünme dirençleri ile sürüş emniyetini sağlamalıdır.
- Trafiğin ve çevrenin aşındırma etkilerine dirençli olmalıdır.
- Deformasyonlara karşı dirençli olmalıdır.
- Esneklikleri ile geçici deformasyonlar yapabilmelidir.
- Kalıcı deformasyon yapmadan alt tabakalara ve zemine yükleri emniyetle intikal ettirmelidir.
- Kurblarda ve dik eğimlerde kayma dirençleri yüksek olmalıdır.
- Yüzeysel suların temele ve zemine sızmasını önlemelidir.
- Tekerrür eden ağır trafik yüklerine karşı yeterli yorulma mukavemetine sahip olmalıdır.

3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler

Hazırlanan ve yol üzerine serilen bitümlü karışımın bazı özellikleri sağlaması istenmektedir. Bunlar; (Önal ve Kahramangil, 2012).

- Stabilite
- Durabilite (Dayanıklılık)
- Geçirimsizlik
- İşlenebilirlik
- Esneklik
- Yorulma mukavemeti
- Kayma direnci olarak belirtilebilir.

3.1.1. Stabilite

Bitümlü sıcak karışımın stabilitesi, kaplamanın trafik yükleri altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak adlandırılır. Yani karışımın stabilitesi trafik yüklerini karşılayabilecek kadar yüksek olmalıdır. Stabilite ne kadar düşük olur ise trafik altında oluşabilecek deformasyonlar da o kadar fazla olacaktır. Stabil bir kaplama, tekrarlı trafik yükleri altında orjinal şeklini ve düzgünlüğünü sürdürebilmektedir. Stabil olmayan bir kaplamada ise tekerlek izleri ve sökülmeler oluşmaktadır (Tunç, 2004).

Ancak, çok düşük stabilite ne kadar istenmez ise çok yüksek stabilite de istenilmemektedir. Çünkü çok yüksek stabilitede esneklik kaybolacağından gerilmeler sonucu çatlaklar oluşmaktadır. Stabilite hem içsel sürtünmeye hem de kohezyona bağlıdır. İçsel sürtünme yüzey dokusuna, agrega gradasyonuna, dane şekline, karışım yoğunluğuna bitüm miktarı ile tipine bağlıdır. Stabilite karışımdaki agreganın içsel sürtünme ve içsel kenetlenme direncinin bir fonksiyonudur. Kohezyon, asfalt kaplama karışımının doğasında var olan içsel bağlayıcı kuvvettir. Bitüm, agrega daneleri arasında gelişen temas noktalarının sürdürülmesi görevini üstlenmektedir. Kohezyon, yükleme hızı, yüklenen alan ve sıcaklıkla ters orantılı olan bitüm viskozitesinin etkisi ile doğrudan değişiklik göstermekte olup, bitüm içeriğinin optimum seviyeye kadar yükselmesiyle yükselmekte, bu seviyeden sonra ise azalmaktadır (İsfalt, 2002).

3.1.2. Durabilite

Bir bitümlü kaplamanın durabilitesi trafik, su, hava ve sıcaklık değişikliklerinin etkilerine karşı göstermiş olduğu dirençtir. Diğer bir ifadeyle, karışımdaki bağlayıcı özelliklerinin değişmesine (oksidasyon vb.), agreganın kırılmasına ve bağlayıcının agrega yüzeyinden soyulmasına karşı göstermiş olduğu dirençtir. Yüksek durabilitenin elde edilmesi, yoğun granülometrili ve soyulma direnci yüksek agrega ile yüksek bitüm yüzdesi kullanılarak karışımın yüksek geçirimsizlik verecek şekilde dizayn edilip sıkıştırılması ile yapılabilir. Aşınma tabakasında daha sert bir agrega kullanılarak daha yüksek bir dayanıklılık elde edilebilir. Düşük durabilitenin sebep ve etkileri aşağıda sıralanmıştır; (Ağar ve Umar, 1991).

- Bağlayıcı yüzdesinin düşük olması, kuru bir görünüş ve agreganın sökülmesine,

- Soyulmaya karşı hassas agrega kullanılması, bağlayıcının agregadan soyulmasına ve sökülmesine,
- Yetersiz sıkışma ve boşluk yüzdesinin yüksek olması asfaltın erken kırılması ve ayrışmasına neden olmaktadır.

Asfalt, sert ve kırılgan hale geldiği zaman üzerine gelen gerilmelere çatlamadan karşı koyamadığında ve agrega yüzeyinden bitümün ayrılması sonucunda karışımın dayanımının düşmesiyle yük taşıma özellikleri azalmaktadır (Skok ve ark., 2000).

Durabilite genel olarak 3 yöntemle sağlanabilir. Bunlar; karışımda sağlam agrega kullanmak, maksimum bağlayıcı miktarı ve karışımı maksimum geçirimsizlik sağlayacak şekilde sıkıştırılmasıdır (Önal ve Kahramangil, 2012).

Karışımdaki bağlayıcı miktarı artıkça durabilite artmaktadır. Çünkü agregaları saran bitüm film kalınlığı ne kadar kalın olursa, geçirimsizlik o kadar artacaktır ve dolayısıyla yaşlanma direnci artacaktır. Ancak, yapılan bir çalışmada, bitüm film kalınlığının belli bir değerin altında yaşlanmanın etkisinin artığı, bu değerin üzerindeki değerlerde ise yaşlanmanın etkisinin değişmediği belirtilmiştir (Şengöz ve Ağar, 2005).

Karışımın yüzeyde tekerlerin sıkıştırdığı suyun etkisinde oluşan aşınma ise, karışımdaki boşluklar su ve hava girişine izin verecek kadar büyükse ve giren havadan dolayı karışım sertleşiyorsa, karışımda kullanılan bitüm ve agrega kimyasal olarak uyumlu değil ise ve bitüm film kalınlığı, karışımı tekerleklerin ve suyun aşındırıcı etkisinden koruyacak miktarda değil ise yüzeydeki aşınma olayı artmaktadır (Skok ve ark., 2000).

Karışımda ince agrega miktarı fazla olduğunda bitüm, bu ince agregaları emmektedir. Kaba agregalar ise yeterince bitüm ile sarılamamaktadır ve böylece durabilite sorunu oluşmaktadır. Bitüm film kalınlığı artıkça durabilite artmaktadır. Ancak, bitümlü karışımda tekerlek izi oluşumuna neden olmadan, yeterli bir bitüm film kalınlığına ulaşmak için uygun seviyede mineral agregalar arasında boşluk değeri (VMA) temin edilmesi gerekmektedir (Çubuk, 2007).

3.1.3. Geçirimsizlik

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

ulaşmadıkları su ve hava girişini etkiler. Geçirimsizlik artıkça hava ve suyun etkisi ile bitümün yaşlanması hızlanır ve soyulma mukavemeti azalır (Tunç, 2004).

3.1.4. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın karıştırılması ve sıkıştırılması sırasında karşılaşılan kolaylığın ölçüsü olarak ifade edilebilir ve karışımda kullanılan agrega granülometresi, agrega cinsi, bağlayıcı oranı, bağlayıcı sertliği, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı, karıştırma ve sıkıştırma sırasındaki bağlayıcı viskozitesi gibi birçok etkene bağlıdır. İşlenebilirlik, karışım tasarım parametrelerinde, agregaların özellikleri ve bitümün viskozitesinde yapılacak değişikliklerle yükseltilebilir. Genelde her bitümlü sıcak karışımda, bitüm oranı artıkça karışımın işlenebilirlik özelliğinin de artığı ve bitüm viskozitesinin karışımın işlenebilirliğinde oldukça etkili olduğu bilinmektedir (Çelik, 2004).

Yapılan bazı araştırmalarda, bitümlü karışımlar ne kadar çok işlenebilir ise o kadar kolay sıkıştırılabilmekte, kolay sıkışan karışımların da trafik altında o kadar çabuk oluklanma olduğu tespit edilmiştir (Uluçaylı, 1998).

3.1.5. Esneklik

Esneklik, karışımın çatlamadan, eğilebilme ve temel ile alttemel tabakalarının uzun dönemli oturmalarına uyum sağlayabilme yeteneğini ifade etmektedir. Farklı oturmalar veya aşırı oturmalar kaplamaya yansıyacağından çatlamalar meydana gelecektir. Genel olarak, bir kaplama karışımının esnekliği, yüksek bitüm içeriği ve nispeten açık boşluklu (gradasyonlu) agregalar ile geliştirilebilmektedir. Ancak, kaplamanın esnekliği artarsa stabilitesinin azalacağı, düşük esnekliğin de aşırı çatlamalar ile parçalanmalara neden olacağı göz önünde bulundurulmalıdır (Tunç, 2004).

3.1.6. Yorulma mukavemeti

Bir karışımın yorulma mukavemeti, trafik yüklerinden kaynaklanan tekrarlı eğilmelere çatlamadan karşı koyabilme direnci olarak ifade edilebilir. Farklı yüklerden dolayı oluşacak farklı gerilmelerin yaratacağı farklı deformasyonlar karşısındaki

yorulmanın tespiti stabil gerilme veya sabit deformasyon altında yapılmalıdır. Kaplamanın yeterli sıkışması yorulma mukavemetini artıran önemli bir unsurdur. Çünkü bitümlü kaplamanın rijitliği artıkça yorulma mukavemeti de artmaktadır. Yetersiz sıkıştırma veya tasarım hatalarından dolayı yüksek hava boşluğuna sahip kaplamaların yorulma ömürleri düşüktür. Kaplamanın yaşlanması sonucu sertleşmesi de, yorulma mukavemetini azaltmaktadır (Harold ve ark., 1995).

Kaplamada meydana gelen yorulma çatlağı yavaş yavaş ve çok sayıda tekerrür eden trafik yükleri altında oluşmaktadır. Kaplama kalınlığının yetersiz olması ve zayıf alt tabakalar olması halinde, ağır yük altında aşırı deformasyon, kaplama altındaki yanal çekme gerilmelerine neden olacağından yorulma çatlakları oluşacaktır. Bu nedenle, kalın ve iyi destek alan kaplamalar ve çekme mukavemeti yüksek malzeme kullanmak yorulma çatlaklarını önleyecektir. Dolayısıyla yumuşak bitüm sert bitüme nazaran daha iyi yorulma özelliğine sahiptir. Karışımın rijitliği, yoğunluğu, kohezyonu, filler ve bitüm miktarı artıkça yorulma mukavemeti önemli ölçüde artmakta ve yorulma çatlakları azalmaktadır (Tunç, 2004).

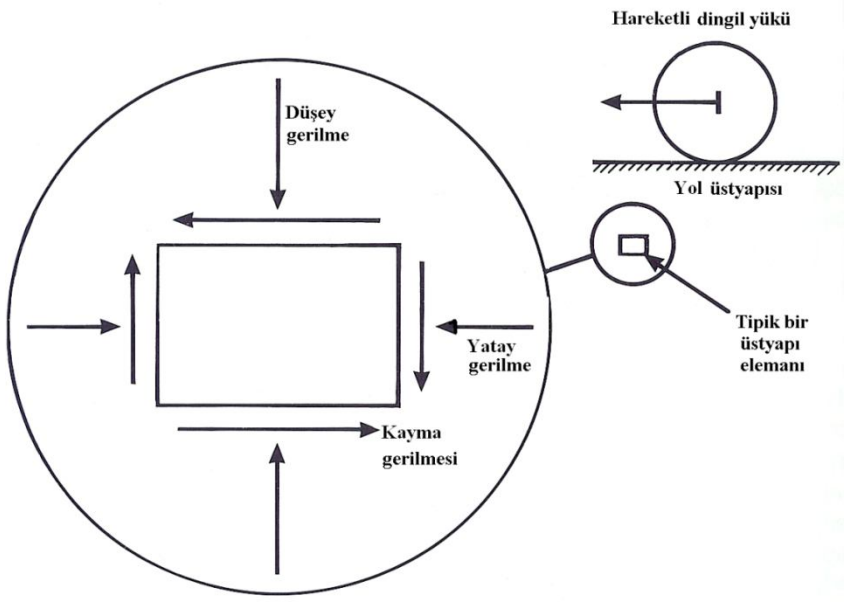
3.1.7. Kayma direnci

Kayma direnci, kaplama ile teker arasında gerekli sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. Agregalar arası içsel sürtünme, bitümün kohezyonu ve kıvamı kayma mukavemetini belirler. Uygun bitüm içerikleri ve pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar, yüksek kayma direncine katkıda bulunan 3.1faktörlerdir. Sıkıştırılmış kaplama içindeki boşlukları dolduracak derecede bitümce zengin olan karışımlar, kusmaya yatkındırlar. Kusma olayı ise bitümlü malzemenin trafik etkisi, iklim şartları ve uygulama hatalarından dolayı kaplamanın yüzeyine çıkması ve burada tamamen bitümden oluşan bir film tabakasının oluşmasıdır (Kuloğlu ve ark., 2004).

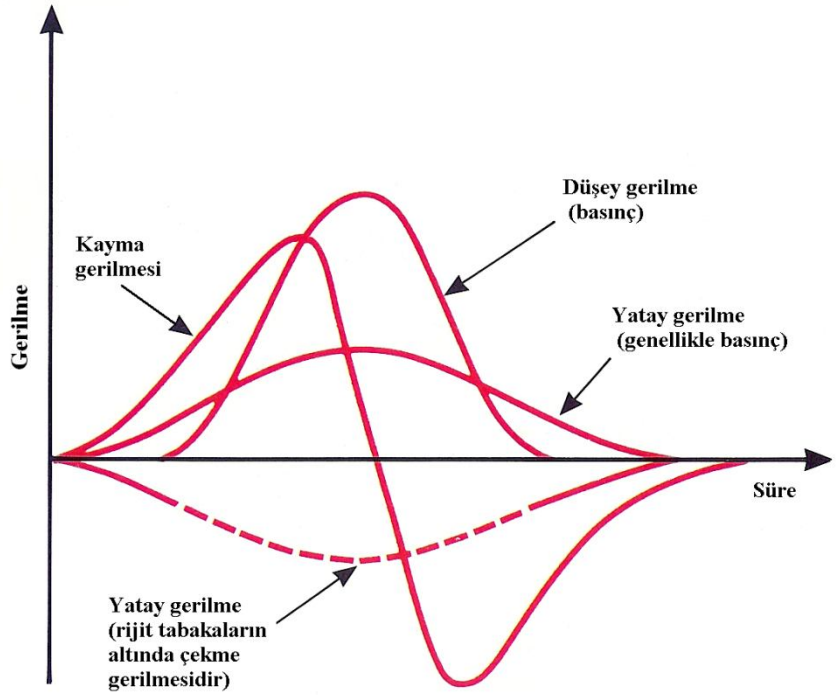
3.2. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler

Yol üstyapısının analitik olarak tasarlanabilmesi, üstyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin ve karışımların özelliklerinin tam olarak belirlenerek bilinmesine bağlıdır. Bu konuda yapılan araştırmalarda laboratuvar deneyleri yaygın olarak kullanılmış olup elde edilen sonuçlar bitümlü karışımların mekanik davranışları hakkındaki temel bilgilerin edinilmesini sağlamıştır.

Arazideki gerilme şekilleri laboratuvarda güçlükle sağlanabilmektedir. Şekil 3.1'de dingil yükünden dolayı bir üst yapı elemanı üzerindeki gerilmeleri görülmektedir. Bu şekil, gerçek gerilme durumunun oldukça basitleştirilmiş bir halidir. Gerçek gerilme şekli üç boyutludur ve zemin elemanının Şekil 3.2'de gösterilen düzlemlerine dik düzlemlerde de normal ve kayma gerilmeleri mevcuttur. Tekerlek bu zemin elemanı üzerinden geçtikçe gerilmeler zamana bağlı olarak Şekil 3.1'de gösterildiği gibi değişmektedir. Bu karmaşık gerilme hali laboratuvar ortamında doğru bir şekilde henüz benzeştirilmemekle birlikte dinamik üç eksenli deney sistemi, kayma gerilmelerinin yön değiştirmesi hariç diğer gerilme durumlarını sağlayabilmektedir. Sonuç olarak, arazideki davranışın belirli bazı yönlerinin laboratuvar ortamında tekrarlanmasını sağlayabilecek basitleştirilmiş deneyler yapılmaktadır (İsfalt, 2004).



Şekil 3.1. Yol üst yapısındaki bir eleman üzerindeki gerilmeler (İsfalt, 2004)

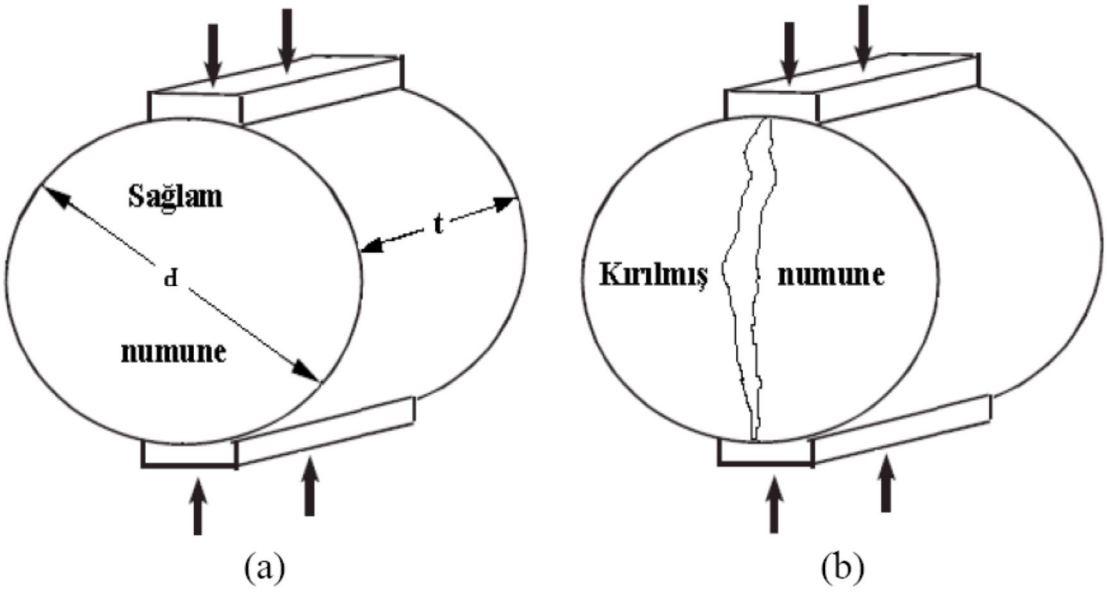


Şekil 3. 2. Hareketli bir dingil yükü tarafından oluşturulan gerilmeler (İsfalt, 2004)

3.2.1. Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi, Marshall stabilitesi deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney ekipmanları kullanılarak, silindirik asfalt numunesinin çap düzlemi doğrultusuna paralel olarak 50 mm/dakika hızda sabit bir basınç yükü uygulanarak AASHTO T245 veya ASTM D 4123'e göre yapılır ve numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilerek numunenin aldığı en büyük yük değeri kaydedilir (İsfalt, 2001).

Şekil 3.3'de numunenin deney başlangıcındaki ve sonrasındaki durumu görülmektedir.



Şekil 3.3. ITS Deneyi (a) yükleme durumu ve (b) kırılma düzlemi (Zaniewski ve Srinivasan 2004)

Dolaylı çekme mukavemeti aşağıdaki (3.1) bağıntısı ile hesaplanmaktadır (Zaniewski ve Srinivasan 2004).

$$ITS = \frac{2P_{maks}}{\pi.t.d} \tag{3.1}$$

ITS : Dolaylı çekme mukavemeti (kPa),

P_{maks} : Maximum yük (kN),

t : Numune yüksekliği (mm),

d : Numune çapı (mm)

ITS deneyi, genel olarak bitümlü karışımların çekme mukavemeti özelliklerinin saptanmasını içerir ve dolaylı çekme mukavemeti bitümlü karışımların sıcaklık ve yorulma nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder. Ayrıca, dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, bitümlü karışımların yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde de kullanılabilir. Bununla birlikte, bu değerler karışımın sıcaklık, nem ve farklı dingil yükleri karşısında göstermiş olduğu davranış hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılabilir (İsfalt 2001).

ITS deneyi, yaygın olarak asfalt karışımların kohezyon kuvvetini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, karışımın orta sıcaklıklardaki tekerlek izi direncinin önemli bileşenleri olan sertlik ve durabilitesini değerlendirmek için de kullanılabilir. Deney, karmaşık test ekipmanlarını gerekli kılmaz ve laboratuvarda

Marshall veya yoğurmalı pres cihazlarıyla üretilmiş briketlere uygulanabilmektedir. Asfalt karışımın ITS değeri, asfalt karışımın kohezyon kuvvetine bağlı olarak artar ve bu yüzden bağlayıcının özelliklerinden güçlü bir şekilde etkilenir. Karışım kohezyonunun bir göstergesi olan ITS değeri, karışımın orta sıcaklıklardaki stabilitesini sağlar ve durabilite ve soyulma potansiyelinde olduğu kadar tekerlek izi direnciyle ilişkili olabilir (Alshamsi, 2006).

3.2.2. Sünme deneyi

Avrupa'da, bitümlü malzemelerin kalıcı deformasyona karşı dirençlerinin belirlenmesinde sünme deneyi kullanılmaktadır. Bu deneyde, 40°C sıcaklık altında 1 saatlik bir süre boyunca numuneye $1x10^5$ Pa değerinde statik eksenel gerilme (σ) uygulanmaktadır. Deney koşulları, 1977 yılında Zürih'te gerçekleştirilen bir toplantının ardından standart hale getirilmiştir. Deney esnasında, zamanın bir fonksiyonu olarak eksenel deformasyonlar ölçülmektedir. Bitümlü sıcak karışımların statik yükler altındaki dayanımlarını tespit etmek amacıyla, numune üzerine bir yük uygulayıp yük kaldırıldıktan sonra oluşan kalıcı deformasyonun ölçülmesi esasına dayanmaktadır (İsfalt, 2004).

Sünme modülü deneyi, yoğun gradasyonlu sıcak karışımların dairesel ve tek eksenli basınç yüklemesi altında sünme modülü değerinin belirlenmesini içermekte ve karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu deneyden elde edilen sünme modülü değeri, ısı ve dingil yükleriyle karşılaşan sıcak karışımların düşük sıcaklıktaki çatlama potansiyeli ya da tekerlek izinin hesaplanması ve sertliğinin tahmininde kullanılmaktadır. Bu değer ayrıca numunelerin değerlendirilmesi yanında üstyapı tasarımında ve değerlendirme modellerinde kullanılabilir. Deney, sıcaklık etkisinin, yük büyüklüğünün, bağlayıcı içeriğinin ve sünme yükleme zamanının etkisinin değerlendirilmesinde de kullanılabilmektedir. Sünme modülü, karışımın fiziksel özellikleriyle birlikte değerlendirilirse karışımın karakterize edilmesine de yardımcı olabilir ve ayrıca verilen bir trafik ve çevre koşulları altında karışımın bir karayolu malzemesi olarak uygunluğu hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılabilir (İsfalt, 2001).

Standart deney sıcaklığı 40 ^oC olmasına karşın aşırı sıcak bölgeler göz önünde bulundurularak daha yüksek sıcaklıklarda da deney yapılabilmektedir. Deney esnasında 1 saatlik bir süre boyunca numuneye belirli bir statik eksenel gerilme (σ) uygulanarak,

deney esnasında zamanın bir fonksiyonu olarak eksenel deformasyonlar ölçülmektedir. Böylece numunenin ilk yüksekliği belli olduğuna göre eksenel şekil değiştirme, ε ve uygulanan gerilmenin bilinmesi dolayısıyla, sıcaklık ve yükleme zamanına bağlı olarak sertlik modülü (Rm), aşağıdaki (3.2) bağıntısı ile saptanır (Ahmedzade ve Geçkil, 2007).

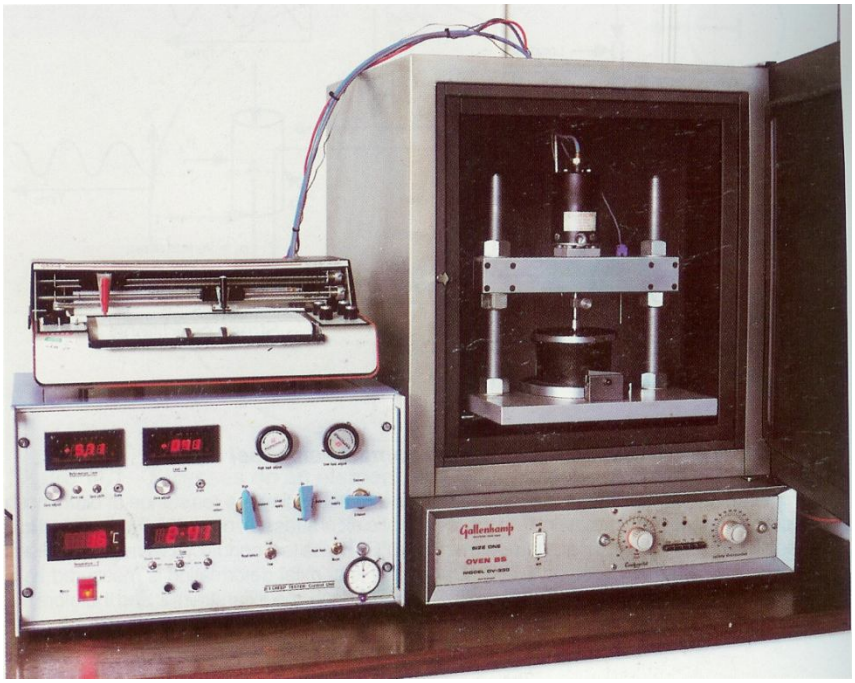
$$Rm = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{3.2}$$

Rm : Sünme sertliği modülü (MPa)

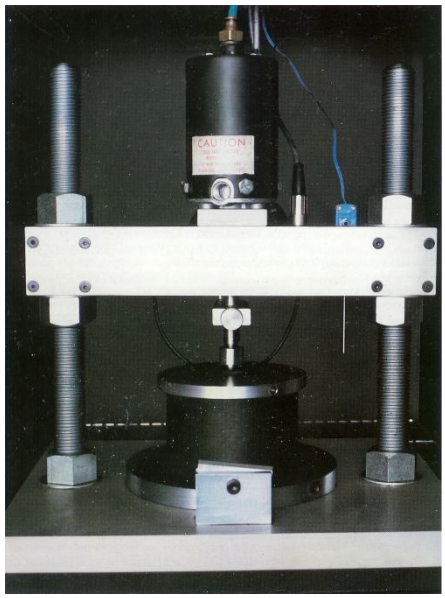
σ : Uygulanan gerilme (MPa)

ε : Toplam kalıcı eksenel deformasyon

Şekil 3.4. ile Şekil 3.5. eksenel yükün basınçlı hava ile hareket ettirilen bir çubuk tarafından uygulandığı bir akma deneyi sistemini göstermektedir. Oluşan eksenel şekil değiştirme kayıt cihazına bağlı bir ölçüm aleti (displacement transducer) tarafından sürekli olarak ölçülür (İsfalt, 2004).



Şekil 3.4. Sünme testi deney aleti (İsfalt, 2004)



Şekil 3.5. Sünme testi deney aleti (İsfalt, 2004)

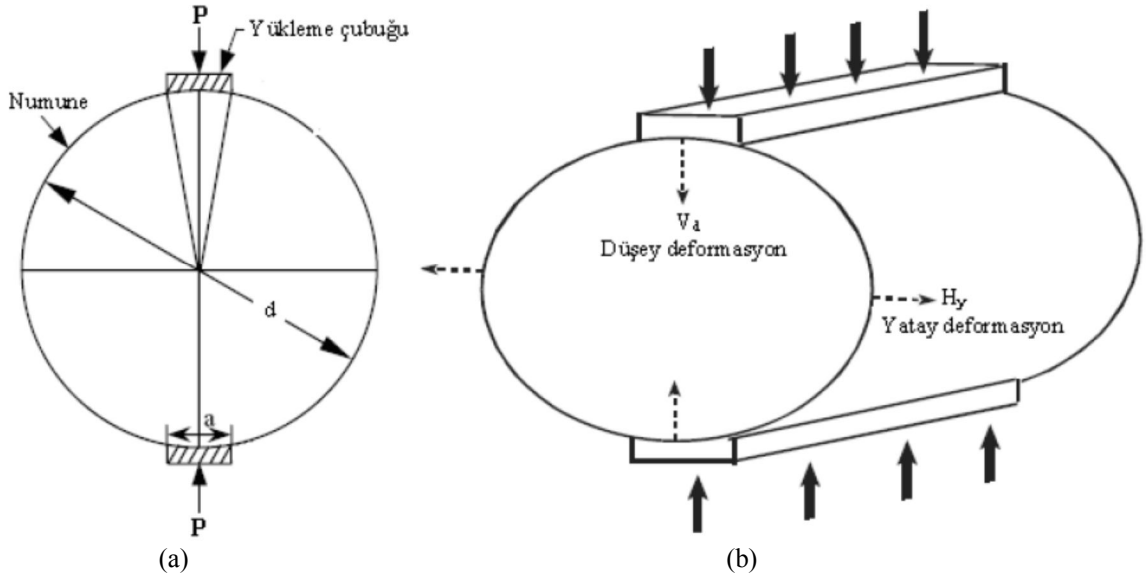
3.2.3. Dolaylı çekme esneklik modülü (ITSM) deneyi

Dolaylı çekme esneklik modülü (ITSM) deneyi, dinamik yükler altındaki bitümlü karışımların esnekliğini tespit etmek amacıyla kullanılan bir deneydir. 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 kontrol eder (Clyne ve ark., 2001).

Tek eksenli yükleme altında elde edilen esneklik modülü, genel olarak maksimum gerilmenin, maksimum birim şekil değiştirmeye oranı olarak alınır (İsfalt, 2001).

Bu yöntemin amacı, tekrarlı yüklemeli dolaylı çekme deneyi yardımıyla laboratuvarda hazırlanmış ya da araziden alınan karot numunelerinin esneklik modülü değerini saptamaktır. Deney farklı sıcaklıklarda ve yükleme süreleri altında yapılmakta ve her bir sıcaklık ve yükleme süresi için numunelere ait esneklik modülü değerleri belirlenmektedir (İsfalt, 2001; Clyne ve ark., 2001; Ping ve Xiao 2007).

ITSM deneyi ile esneklik modülü değerinin belirlenmesinde, numunelere yarı sinüzoidal bir formda, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi düşey yönde basınç yükü, tekrarlı darbeler şeklinde uygulanmaktadır (İsfalt 2001).



Şekil 3.6. Dolaylı çekme deneyi ve şematik görünüşü (Brown ve ark., 2001; Taute ve ark., 2001)

Deney sonucunda, numuneye uygulanan dinamik yük ve bu yükün neden olduğu toplam yatay deformasyonu ölçülür ve karışım için bir poisson oranı alınarak numunenin esneklik modülü (Em) aşağıdaki (3.3) bağıntısı ile hesaplanır (İsfalt 2001; Brown ve ark., 2001).

$$Em = \frac{P \times (v + 0{,}2734)}{H_y \times h} \tag{3.3}$$

Em : Esneklik modülü (Mpa),

P : Maksimum yük (N),

H_y : Toplam yatay deformasyon (mm),

h : Numune kalınlığı (mm),

v : 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 bitümlü bağlayıcı kullanımı karışımın esneklik modülünü artırmaktadır (Ghile 2006).

Esneklik modülü, ayrıca deneyde kullanılan numunenin büyüklüğüne ve Poisson oranına göre farklılık gösterdiğinden 100 mm ve 150 mm'lik numunelerin Poisson oranları aşağıdaki (3.4) ve (3.5) bağıntıları ile bulunabilir (Clyne ve ark., 2001; Roque ve ark., 2002).

$$v = 3{,}59 \times \frac{H_y}{V_d} - 0{,}27 \qquad (100\,\text{mm'lik numuneleriçin}) \qquad (3.4)$$

$$v = 4{,}09 \times \frac{H_y}{V_d} - 0{,}27 \qquad (150\,\text{mm'lik numuneleriçin}) \qquad (3.5)$$

H_y = Yatay deformasyon (mm)

V_d = Düşey deformasyon (mm)

Yapılan çalışmalarda, Poisson oranının bitümlü karışımlar için sıcaklığa bağlı olarak; 5 ^oC için 0,25; 25 ^oC için 0,35; 40 ^oC için 0,40 değiştiği görülmüştür (Clyne ve ark., 2001; Taute ve ark., 2001).

Ancak, çalışmalarda bitümlü karışımın esneklik modülünün tayininde 0,35 oranının alınması tavsiye edilmektedir (Ghile 2006).

BS DD 213 ve ASTM D 4123 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 (İsfalt, 2001).

3.2.4. Dinamik rijitlik ve yorulma deneyleri

Bitümlü karışımların dinamik rijitliği ve yorulma özelliklerinin ölçülmesi amacıyla, araştırmacılar Şekil 3.7'de diyagramları verilen bazı deneyler geliştirmiştir. Dinamik (tekrarlı) yük uygulamaları içeren, kiriş ya da konsol kullanılarak gerçekleştirilen eğilme deneyleri hem dinamik rijitliğin hem de yorulma direncinin saptanması amacıyla kullanılmıştır. Eğilme deneylerinde, numunenin yüzeyindeki bir noktada maksimum gerilme oluşmakta ve standart kiriş eğilme formülü kullanılarak bunun hesaplaması lineer elastisite varsayımına dayanmaktadır. Amerika Birleşik Devletlerinde, bitümlü malzemelerin dinamik rijitliğinin ya da elastisite modülünün (resilient modulus) belirlenmesi amacıyla sadece basınç gerilmelerini kapsayan, dinamik tek eksenli bir deney yöntemi ASTM tarafından standart yöntem olarak benimsenmiştir.

Şekil 3.8'de 200 mm uzunluğunda, 40 mm genişliğinde ve 30 mm derinliğinde, bitümlü bir karışımdan yapılmış kirişin uçlarından tutularak orta noktasının nispeten düşük birim şekil değiştirme veya sehimlerle titreşime maruz bırakıldığı bir üç noktalı vibrasyon deneyini göstermektedir. Birim şekil değiştirme seviyesine ulaşmak için gereken kuvvetin ölçülmesi suretiyle, aşağıdaki (3.6) ve (3.7) standart eğilme bağıntıları kullanılarak malzemenin dinamik rijitliği hesaplanabilmektedir (İsfalt, 2004).

$$\delta = \frac{WL^3}{48EI} \tag{3.6}$$

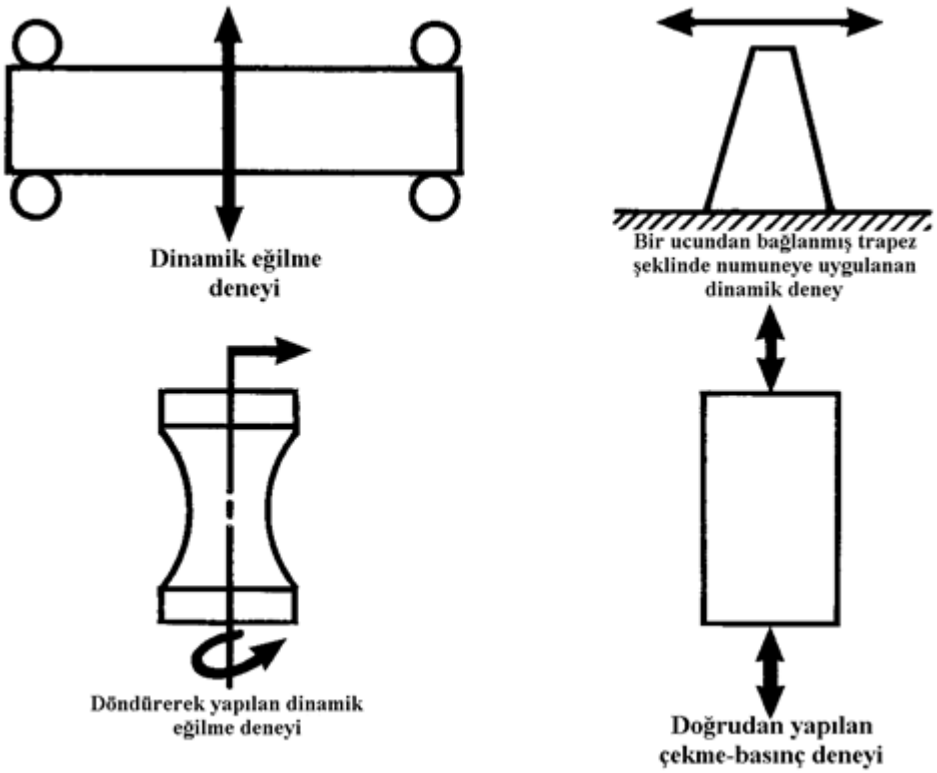
$$E = \frac{WL^3}{48\delta I} \tag{3.7}$$

Burada:

E = Dinamik rijitlik L= Kiriş uzunluğu

d = Sehim W = Uygulanan yük

I = Alanın ikinci momenti $= \frac{bd^3}{12}$ (b = genişlik, d = derinlik)

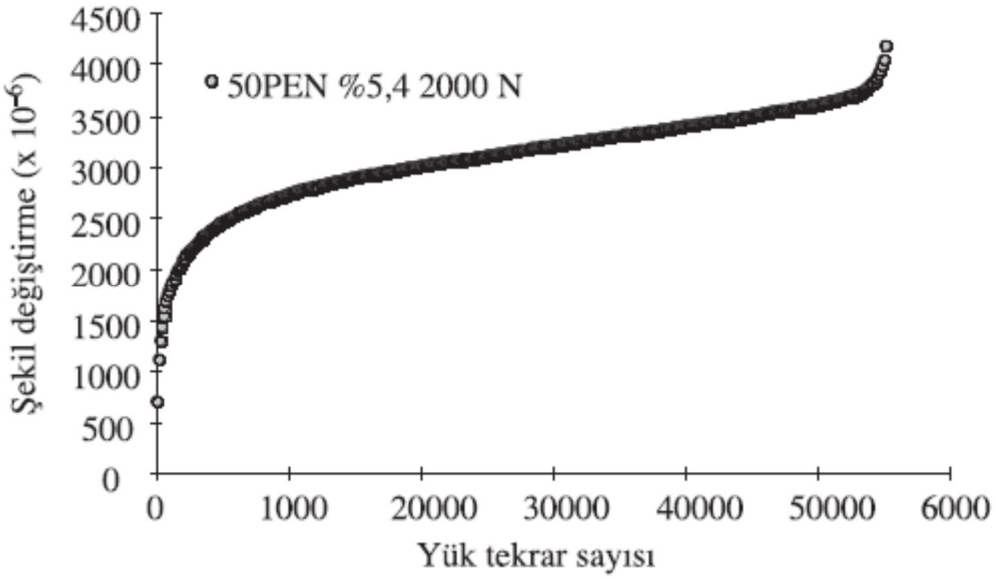


Şekil 3.7. Dinamik rijitlik ve yorulmanın ölçülmesi deneyleri (İsfalt, 2004)



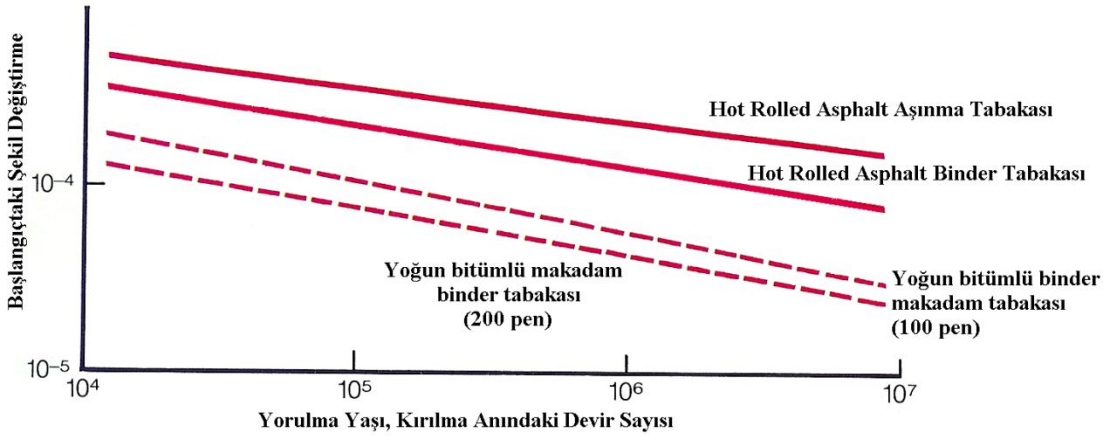
Şekil 3.8. Üç noktalı vibrasyon deneyi (İsfalt, 2004)

Bitümlü karışımların yorulma direnci, tekrarlanan yükler altında karışımın kırılmadan dayanabilmesi olarak açıklanmıştır. Yorulma bozulması kavramı, kaplamanın istenilen düzeyde daha fazla hizmet edemez denileceği an belirsiz olduğundan tartışmalıdır. Bu yüzden laboratuvar şartlarındaki deney yöntemi ve bozulma durumunun belirtilmesi gereklidir. Örneğin, yorulma bozulması sağlamlık modülü gibi numunenin belirli bir özelliğindeki değişimle veya kırılmanın oluştuğu süre ile veya gerilmedeki ani artışın başlangıç zamanı ile ifade edilebilir. Diğer taraftan yorulma bozulmasının uygulamada göstergesi kırılma ile olmaktadır. Yorulma süresinin tayininde mikro kırılmanın oluşum süresi göz önünde bulundurulmuştur. Eğilme şekil değiştirmesi ve yükleme sayısı göz önünde bulundurularak çizilen bir grafikte (Şekil 3.9.) başlangıçtaki büyük lineer şekil değiştirmeden sonraki sabite yakın uzun süreli şekil değiştirme bölümü mikro kırılmanın oluştuğu yükleme sayısına kadar devam etmektedir. Bu değer, şekil değiştirmenin dikkate değer bir şekilde artığı noktadır. Yorulma bozulması için tekrar sayısı, bu iki şekil değiştirme değerinin kesiştiği nokta olarak belirlenmiştir (Çelik, 2001).



Şekil 3. 9. 2000 Newton'luk tekrarlanan yük altında % 5,4 oranında 50 penetrasyon bitümle yapılan kirişte yük tekrar sayısı ile şekil değiştirme arasındaki ilişki (Çelik, 2001)

Laboratuvarda, eğilme ya da doğrudan yükleme şeklindeki yorulma deneylerinin çoğunluğu tek eksenli koşullar altında yapılmaktadır. Yorulma deneyleri, bir numuneye değişken gerilme ya da deformasyon şeklinde yük uygulanması suretiyle gerçekleştirilmekte ve numunenin "göçmesi" için gereken tekrarlı yük sayısı saptanmaktadır. "Göçme" numunenin her zaman gerçekten kırılması, parçalanması değil belirlenen bir son noktaya ulaşmasıdır. Örneğin, sabit deformasyonlu bir deneyde, deformasyon seviyesini muhafaza etmek için gereken yük, başlangıçtaki yük değerinin yarısına düştüğünde numunenin göçtüğü kabul edilir. Yorulma deneylerinin sonuçlarının dağınık olması nedeniyle, her bir gerilme ya da deformasyon seviyesinde birden fazla numune üzerinde deney yapmak normal olup, sonuçlar Şekil 3.10'daki grafikte gösterildiği gibi, gerilme ya da birim şekil değiştirmeye karşı gelen göçmeye yol açan çevrim sayısı logaritmik ölçekte çizilir. İnce kaplamalar için deformasyon kontrollü, kalın tabakalar için ise gerilme kontrollü yorulma deneyleri yapılır. Şekil 3.8'de gösterilen deney aleti kullanılarak dinamik rijitlik belirlendikten hemen sonra sadece uygulanan şekil değiştirme seviyesini artırarak sabit deformasyonlu yorulma deneyi gerçekleştirilebilmektedir. Göçmeye yol açan çevrim sayısı, deney sona erdiğinde otomatik olarak kaydedilmektedir (İsfalt, 2004).



Şekil 3.10. Çeşitli karışımların gerilme kontrollü yorulma özellikleri (İsfalt, 2004)

Dolaylı çekme yorulma deneyi, araştırmacıların çoğu tarafından asfalt karışımların değerlendirilmesinde ve üstyapı analizinde kullanılmıştır. Deney oldukça basit olup malzeme karakteristiklerinin temel özellikler cinsinden belirlenmesinde oldukça etkilidir. Numunede gerilme durumunun oldukça kompleks olmasına rağmen, kritik gerilme ve şekil değiştirmeler lineer elastik kabulü yapılırsa kolayca hesaplanabilir. Dolaylı çekme yorulma deneyinde, düşey aks boyunca iki eksenli gerilme durumu mevcuttur. Bu aks boyunca yatay çekme gerilmeleri oldukça sabit kalırken düşey basınç gerilmeleri önemli ölçüde değişmektedir (Tığdemir, 1999).

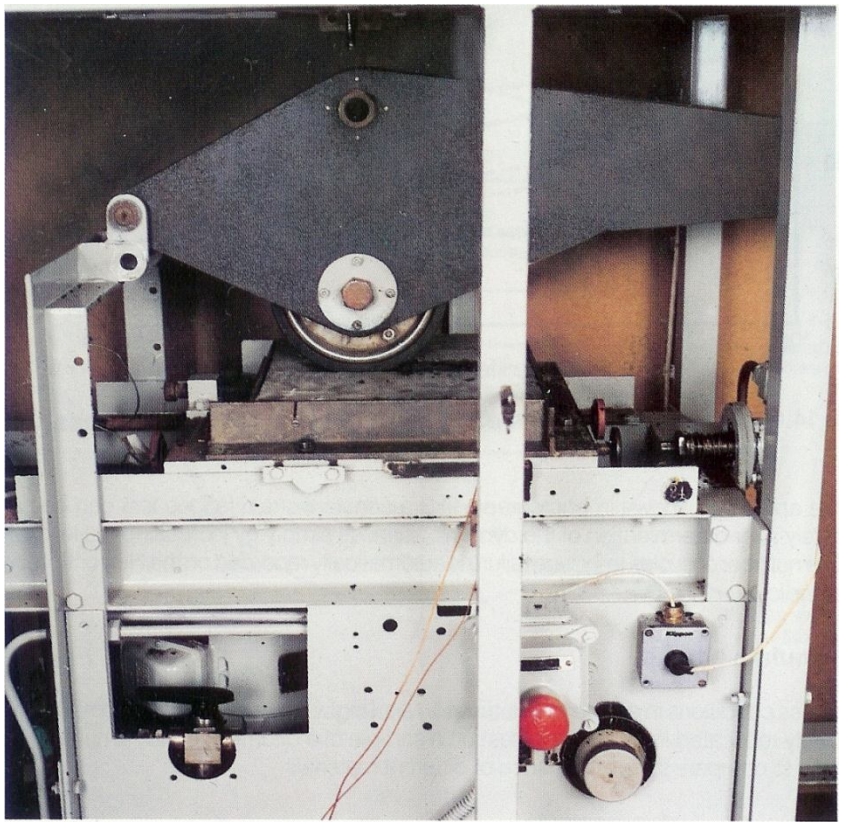
3.2.5. Benzeşim deneyleri

Dönen bir tekerlek tarafından yük uygulanan bir yol üstyapısındaki gerilme koşullarının çok karmaşık olmasından ve laboratuvarda üretilen bitümlü karışım numunesi üzerinde bu gerilme koşullarının doğru bir şekilde ve bire bir uygulanamamasından ötürü çeşitli malzemelerin performanslarının karşılaştırılması için benzeşim deneyleri yapılmaktadır (İsfalt, 2004).

3.2.5.1. Tekerlek izi deneyleri

Bu deney cihazları TRRL'de olduğu gibi büyük ve tam ölçekli ekipmanlardan, Nottingham Üniversitesinde bulunan daha küçük boyutlu olanlarına kadar geniş bir yelpaze içinde bulunur. Bu cihazlar tüm tabakalara sahip deney yollarının (tam ölçekli arazi deneyleri) test edilmesinden, Şekil 3.11'de görüldüğü gibi sadece bitümlü bir tabakanın kalıcı deformasyonlara karşı performansının laboratuvarda

değerlendirilmesine kadar farklı ortamlarda kullanılır. Laboratuvar deneyleri genellikle 45°C'de ve numuneye 525 N tekerlek yükü uygulanarak yapılır. Malzemenin performansı belirli bir sayıdaki tekerlek yükünün uygulanmasından sonra oluşan oluklanma (tekerlek izi) ölçülerek belirlenir. TRRL'de yapılan çalışmalar sayesinde arazi deney sonuçları ile laboratuvarda yapılan tekerlek izi deneyleri sonuçları arasında iyi bir korelasyon olduğu görülmüştür (İsfalt, 2004).



Şekil 3.11. Tekerlek izi deneyi (İsfalt, 2004)

3.3. Bitümlü Sıcak Karışım Tasarım Yöntemleri

Bitümlü karışım tasarımının amacı, maksimum kaplama performansının en ekonomik şekilde sağlanmasıdır. Bitümlü karışım tasarım süreci, agrega türü ve tane dağılımı, bağlayıcı türü ve miktarı, katkı malzemesinin türü ve miktarının saptanmasını ve şartname özelliklerini sağlayan bitüm-agrega karışımının üretimini içermektedir (İsfalt, 2002).

Asfalt kaplama karışım tasarımının amaçları; (Önal ve Kahramangil, 2012).

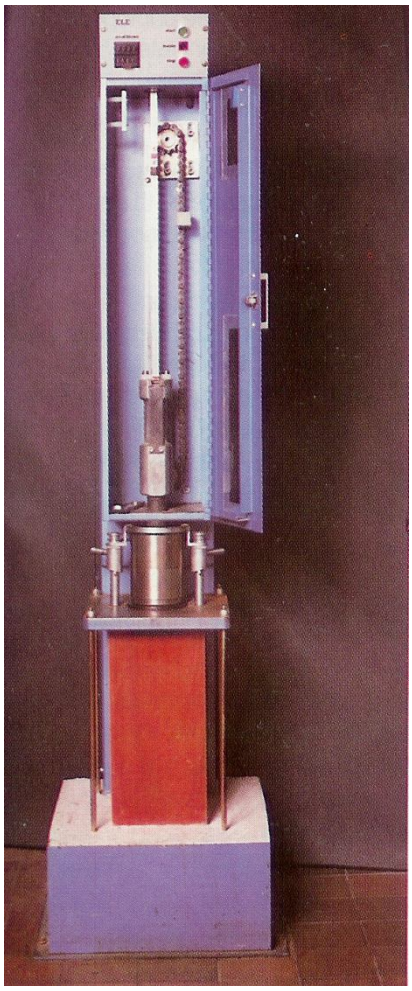
- Sağlam (durabil) bir üstyapı elde etmek için gerekli bitüm miktarını bulabilmek,
- Trafik yükleri altında deformasyon göstermeyecek yeterlilikte karışım stabilitesini oluşturabilmek,
- Sıkıştırılmış karışımda kusma, akma ve stabilite düşüklüğü olmaksızın trafik tarafından oluşturulacak çok az miktardaki sıkışmaya imkân verecek, ancak karışım içinde rutubet ve fazla hava barındırmayacak ölçüdeki boşluğu sağlamak,
- Segregasyona uğramaksızın uygun serimi sağlayacak bir işlenebilirliği verecek, ekonomik bir karışım ve agrega granülometrisini belirlemek; olarak özetlenebilir.

3.3.1. Marshall yöntemi

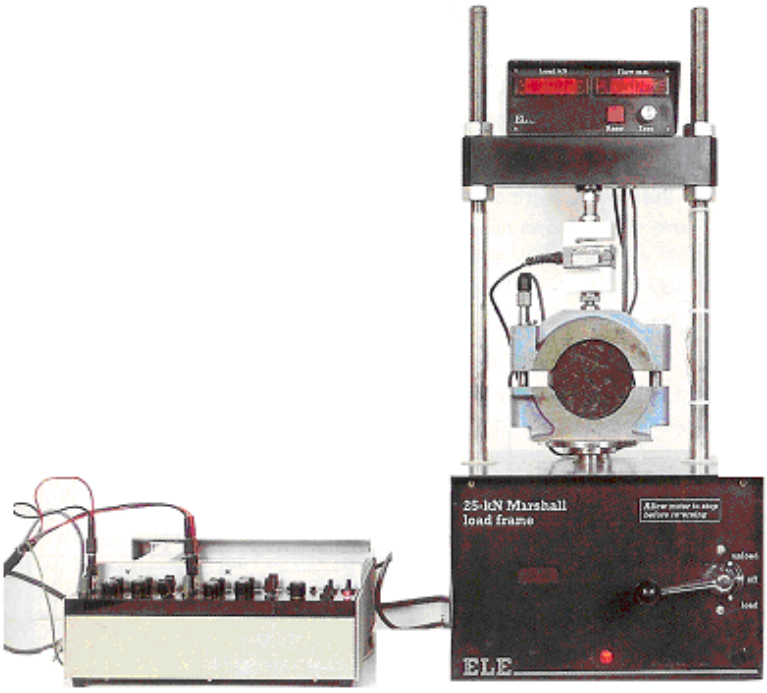
Marshall deneyinin esası, eskiden Mississippi eyaleti karayolları idaresi (Misisippi State Highway Department) bitümlü malzemeler mühendisi olan Bruce Marshall tarafından ortaya konulmuştur. 1948 yılında, Amerika Birleşik Devletleri askeri mühendislik birimi (U.S. Corps of Engineers) tarafından Marshall'ın deney yöntemine belirli özellikler eklenmiş ve sonuçta karışım tasarımı için bazı kriterler geliştirilmiştir. 1948 yılından bu yana, deneyin bazen yönteminde bazen de sonuçlarının yorumlanmasında değişiklikler yapılarak, birçok ülkede ilgili kuruluşlar ve idari birimler tarafından benimsenerek uygulanmıştır. Havaalanı kalkış pistleri ve taksi yollarında asfalt betonu karışımları son 20 yıldır Marshall deneyi kullanılarak tasarlanmıştır.

Marshall deneyinde önce standart bir kompaktör yardımıyla ve çelik bir kalıp içerisinde 102 mm çapında, 64 mm yüksekliğinde silindirik numuneler imal edilir (Şekil 3.12.). Numuneler, 60 °C sıcaklık altında, 50 mm/dk'lık sabit bir hızda yüklenerek,

Şekil 3.13'de gösterilen deney aletinde deformasyona karşı dirençleri ölçülür. Deney aletinin çene kısımları numune çevresini sarmakta fakat tamamen kapatmamaktadır. Silindirin iki yanı serbesttir. Dolayısıyla, deney sırasında numune içerisindeki gerilme dağılımı aşırı karmaşık olmaktadır. Marshall deneyinde numunenin göçmeden taşıyabileceği maksimum yük Marshall stabilitesi ve göçme anına kadar oluşan deformasyon miktarı ise Marshall akması olarak adlandırılır. Stabilitenin akmaya oranı Marshall oranı (Marshall quotient) olarak bilinmekte olup bu faktör karışımın kalıcı deformasyona karşı direncinin bir ölçüsü olan bir tür "ampirik" rijitlik değeridir (İsfalt, 2004).



Şekil 3. 12. Marshall sıkıştırma cihazı (İsfalt, 2004)



Şekil 3.13. Marshall deney cihazı (İsfalt, 2004)

Ülkemizde ve diğer birçok ülkede bitümlü karışım tasarımı olarak, en yaygın olarak Marshall metodu kullanılmaktadır. Metot, sıcak karışımların laboratuvar tasarımı ve sıcak karışım asfalt kaplamalarının uygulamadaki kontrolleri için kullanılır (Önal ve Karaca, 1990).

Marshall metodu ile hazırlanan sıcak karışım tasarımı aşağıdaki işlem sırasına göre yapılmaktadır; (İsfalt, 2002).

- Agrega granülometrisinin belirlenmesi,
- Agregaların ve bitümün özgül ağırlıklarının belirlenmesi,
- Agrega ve bitüm miktarının hesabı,
- Briketlerin hazırlanması, ilgili hesaplamalar ve boşluk analizleri,
- Stabilite ve akma değerlerinin bulunması,
- Optimum bitüm miktarının belirlenmesi.

3.3.2. Superpave karışım tasarımı

Superpave karışım tasarım yöntemi, trafik yükü ve iklim koşulları altında meydana gelen kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlaklarını kontrol ederek, tasarım çevre koşullarında kaplama performansını artırmak için

performans esaslı bağlayıcı malzemelerinin geliştirilmesini içermektedir. Superpave yöntemi; ham, geri dönüşümlü, yoğun gradasyonlu, katkılı veya katkısız sıcak karışım asfaltlar ile mevcut tabakaların üzerine inşa edilen taş mastik asfalt (SMA) gibi çeşitli özel kaplama karışımlarına da uygulanabilir. Sistem, malzeme seçimi ve karışım tasarımı yoluyla kalıcı deformasyon, yorulma ve düşük sıcaklık çatlağı gibi bozulmaları doğrudan kontrol eder ve bağlayıcının uzun ve kısa dönem yaşlanması ile karışımın nem hassasiyetini açık bir şekilde dikkate almaktadır. Superpave karışım tasarım yönteminin amacı, servis ömrü boyunca tatmin edici performans özellikleri gösteren bir kaplama tabakasını oluşturan ekonomik bağlayıcı ve agrega karışımlarını elde etmektir (Kennedy ve ark., 1994).

Superpave yönteminin en önemli özelliği, deneylerin standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki sıcaklıklarda yapılarak asfaltın saha performansıyla doğrudan ilgili fiziksel ve reolojik özelliklerinin analitik deneylerle tespit edilmesi ve genel olarak saha performansının daha iyi ve gerçekçi olarak yansıtılmasıdır (Zaniewski ve Padula, 2003).

Superpave karışım tasarım yöntemi düzey 1, 2 ve 3 olmak üzere üç farklı tasarım seviyesi içermektedir. Bu tasarım seviyeleri, kaplamanın hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı 80 kN'luk eşdeğer tek dingil yüklerinin toplamı esas alınarak belirlenmektedir. Bunun için önerilen trafik hacim değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Karışım tasarım seviyeleri için önerilen trafik tasarım değerleri (Cominsky ve ark., 1994)

Tasarım Seviyesi	**Tasarım Trafiği (80 kN)**
1 (düşük)	$\leq 10^6$
2 (orta)	$\leq 10^7$
3 (yüksek)	$> 10^7$

Superpave karışım tasarımında kullanılan en önemli araç "Superpave Gyratory Compactor" denilen Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı (SGC)'dir. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı, hacimsel analizler için karışım numuneleri üretmek ve ayrıca numune üretilirken sıkıştırma işlemi süresince veriler kaydederek numunenin yoğunluğunu ölçmek için kullanılmaktadır (The Asphalt Institute, 2007).

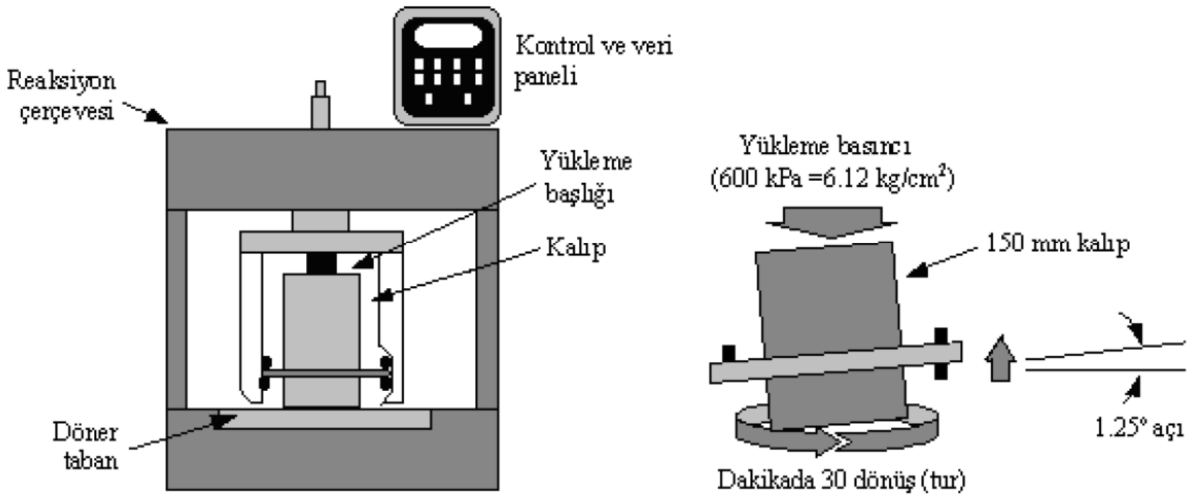
Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı, SHRP araştırmacıları tarafından sıcak karışımların arazideki sıkışmasını en iyi temsil edecek bir laboratuvar sıkıştırma metodu olarak geliştirilmiştir. SGC temelde Texas yoğurmalı sıkıştırıcısının, bir Fransız yoğurmalı sıkıştırıcısının sıkışma prensipleri ile çalışacak şekilde modifiye edilmesi ile

oluşturulmuştur. Oluşturulan bu cihaz ile, arazi şartlarına en uygun sıkıştırma elde edilmesi, iri daneli agregaların karışımda kullanılabilmesi, sıkışabilirliğin ölçülmesi ve tesislerde kalite kontrol işlemlerinde kullanılabilecek kadar kolay taşınması gibi hedefler gerçekleştirilmiştir. Cihaz ayrıca, 150 mm (6 inç) iç çapa sahip kalıbı ile maksimum tane boyutu 50 mm (nominal maksimum 37,5mm) olan agrega içeren karışım numunelerinin hazırlanmasına imkan vermektedir (The Asphalt Institute 2007; McGennis ve ark., 1995; Alshamsi, 2006).

Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı şu bölümlerden oluşmaktadır;

- Reaksiyon çerçevesi, dönen taban ve motor,
- Yükleme sistemi, yükleme kolu ve basınçölçer,
- Yükseklik ölçme ve kaydetme sistemi,
- Kalıp ve taban plakası

SHRP tarafından geliştirilen Superpave yoğurmalı sıkıştırıcının şematik görünüşü ve kalıp konfigürasyonu Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

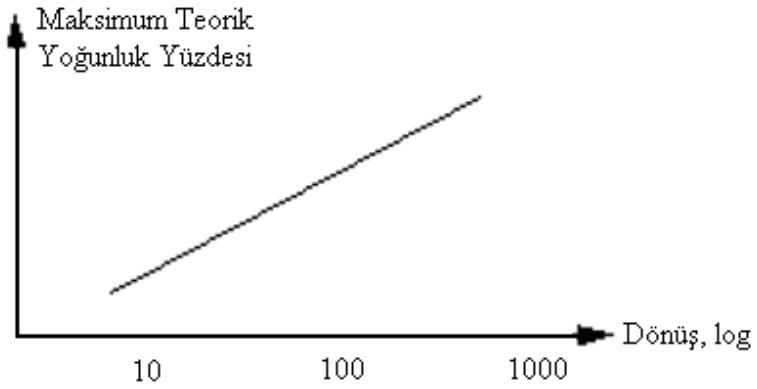


Şekil 3.14. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı (a) ve kalıp konfigürasyonu (b) (Tunç, 2001; The Asphalt Institute 2007; McGennis ve ark., 1995; Kennedy ve ark.,1994; Druta 2006)

Yükleme başlığı vasıtasıyla 600±18 kPa (6,12 kg/cm^2)'lik sabit bir basınç numune üzerine tatbik edilirken numune kalıbı altındaki döner taban 1,25±0,02^o'lik açı ile dakikada 30±0,5 dönüş yapmakta ve kontrol cihazı uygulanan yükü sabit tutarak numunenin yüksekliğini deney boyunca kaydetmektedir. Numune yüksekliğinin ölçümü SGC'nin önemli bir fonksiyonudur. Numunenin sıkıştırma sırasındaki yoğunluğunu, numune ağırlığı, kalıbın iç çapı ve numune yüksekliği bilindiğinden hesaplamak

mümkündür (Tunç, 2001; The Asphalt Institute, 2007; McGennis ve ark., 1995; Alshamsi 2006; Kennedy ve ark., 1994).

Dönüş (tur) sayısı artıkça asfalt karışımın yoğunluk değişimi Şekil 3.15'de görüldüğü gibi olmaktadır.



Şekil 3.15. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı karışım sıkıştırma karakteristikleri (Tunç, 2001; The Asphalt Institute 2007; McGennis ve ark., 1995; Alshamsi 2006; Kennedy ve ark.,1994)

3.4. Bitümün Modifikasyonu

Bitümlü malzemeler reolojik özellikleri ve termal dirençleri ile geniş uygulama alanı bulmaktadırlar. Bitümlü kaplamaların gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli olması arzulanmaktadır. Ancak, bitümlü bağlayıcıların yol kaplamalarında bağlayıcı olarak tek başlarına kullanılması beraberinde çeşitli sorunlar getirmektedir. Ham petrol fiyatlarındaki artışlar, yüksek maliyetlerin daha ince kaplamaların tercih edilmesini doğurması, dolayısıyla kaplamaların hizmet ömürlerinin düşmesi, trafik yüklerinde meydana gelen önemli artışlar, deformasyonların oluşması ve bakım onarım maliyetlerinin yüksek oluşu gibi problemlere karşı dayanımların artırılmasının gerekliliği bu sorunlardan dolayı bitümlü bağlayıcıların performanslarının iyileştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır (Çubuk, 2007).

3.4.1. Bitümlü bağlayıcıların modifiye edilme nedenleri

Yol üst yapılarının yüksek sıcaklıklarda yeterli rijitlige sahip olması tekerlek izi gibi deformasyonlara karşı direncin artmasını, düşük sıcaklıklarda ise yeterli esnekliğe sahip olması çatlamalara ve kırılmalara karşı direncin artmasını sağlayacaktır.

Kaplamanın trafik yükleri altında yorulma nedeniyle meydana gelen çatlamalar ile su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenilen seviyede kayma direncinin elde edilerek sürüş emniyetinin sağlanması da yine bitümün modifiye edilmesinde amaçlanan hedefler arasındadır (Çubuk, 2007).

Genel olarak bitümün modifiye edilme sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir: (Ertekin, 2003).

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

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

3.4.2. Bitümün modifikasyon yöntemleri

Modifikasyon işlemi genel olarak katkı maddesi önceden bitüme katılması ile modifiye bitüm elde edilmesi veya katkı maddesinin asfalt plentinde doğrudan doğruya

karışıma katılması ile modifiye karışım elde edilmesi şeklinde yapılabilmektedir. Bitümlü bağlayıcıların özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan test yöntemleri, daha kısa sürelerde yapılabilmektedir. Karışıma yönelik testler ise bitümlü bağlayıcılara uygulanan test yöntemlerine göre daha uzun süre, daha fazla işlem ve daha kapsamlı test ekipmanlarını gerektirmektedir. Ayrıca, hizmet aşamasının performansını belirlemede daha temsili olmaktadır. Modifiye edilmiş bitüme, çeşitli standart test yöntemleri uygulanmak suretiyle, katkılı bitümün katkısız bitüme göre özelliklerindeki değişimlerin tespit edilebilmesi mümkün olabilmektedir. Böylece modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesine ve değerlendirilmesine imkan sağlanabilmektedir (Çubuk, 2007).

3.4.3. Bitüm katkı maddelerinde aranan özellikler

Bitümlü bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılacak olan katkı maddelerinin uygulamada etkili, pratik ve ekonomik olması bakımından bazı koşulların sağlanması istenilmektedir;

1. Kolay elde edilebilmelidir,
2. Bitümle uyumsaldır,
3. Bitüm karışım sıcaklığında özelliğini kaybetmemelidir,
4. Bitüm ile homojen olarak karışabilmelidir,
5. Bitümün yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale gelmeden akışkanlığa karşı direncinin artmasını sağlamalıdır,
6. Düşük sıcaklıklarda ise kaplamanın çok kırılgan veya sert olmasını önlemelidir,
7. Uygun maliyette olmalıdır (İsfalt, 2001).

3.4.4. Modifiye bitümlerde aranan özellikler

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

1. Depolama, uygulama ve hizmet sırasında sahip olduğu özelliklerini kaybetmemelidir,
2. İşlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdır,

3. Depolama, uygulama ve hizmet sırasında fiziksel ve kimyasal olarak stabil olmalıdır,
4. Uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilmelidir (İsfalt, 2001).

3.4.5. Bitümün modifikasyonu için kullanılan katkılar

Bitümlü bağlayıcıların modifikasyonunda pek çok katkı kullanılabilmektedir. Bitüm katkısı olarak kullanılabilen bu katkıların genel sınıflandırması Çizelge 3.2'de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırması (İsfalt, 2001)

Tip		Özellikler	Modifiyerlerin Bitümlü Bağlayıcının Kıvamına Etkisi
1. Filler		*Mineral Filler: Taş tozu Kireç Portlant çimentosu Uçucu kül *Karbon siyahı *Sülfür	Sertleştirme
2. Extender		*Sülfür *Ligrin (Odun özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal lateks (Kauçuk ağacı özsuyu) b. Yapay lateks c. Blok copolymer d. İşlenmiş kauçuk	**POLİMERLER**	* Doğal kauçuk * Strene butodien veya SBR *Strene-butodien-Strene veya SBS *Dönüştürülmüş kauçuk	Adezyon
4. Plastik		*Polietilen * Polipropilen * Etivinil asetat, EVA * Polivinil clorür, PVC	Sertleştirme
5. Bileşim		* 3 ve 4'deki polimerlerin karışımı	Adezyon
6. Fiber		* Doğal: Asbest Taşyünü * Yapay: Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleştirme
7. Oksidan		* Manganez tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan		* Kurşun karışımları * Karbon * Kalsiyum tuzu	Yumuşatma
9. Hidrokarbon		* Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları * Sertleştirme ve doğal asfaltlar	Yumuşatma veya Sertleştirme
10. Soyulma önleyici		* Aminler * Kireç	Yumuşatma

Modifiye bitüm eldesinde kullanılan katkı malzemeleri günümüzde çeşitlilik arz etmekte olup, gelecekte daha da artacağı beklenmektedir. Kullanımı oldukça artan modifiye bitümler konusundaki çalışmalarda katkı maddesi olarak polimerlere ve kimyasal reaksiyon modifikasyonlarına ilginin artığı görülmektedir. Polimer modifikasyonlarında plastiklerin, elastomerlerin, işlenmiş kauçukların ve fiberlerin ana modifikasyon başlıklarını oluşturduğu görülmektedir. Kimyasal reaksiyonlu modifikasyonlarda ise katkı reaksiyonları, vulkanizasyon ve nitrasyon reaksiyonları dikkat çekmektedir. Çizelge 3.3'de bazı yaygın kullanılan modifiyerler ve değişiklik sağladığı özellikler verilmektedir.

Çizelge 3.3. Modifiyerler ve değişiklik sağladığı özellikler (İsfalt, 2001)

Bazı Yaygın Kullanılan Modifiyerlerin Rolü	
	Kimyasal Katkıların Rolü
Yağ	Bitümün yapısı Bağlayıcılık Viskozite Penetrasyon değeri Yumuşama noktası
Filler tozu	Yumuşama noktası Viskozite Sertlik Yoğunluk Maliyet Mekanik sağlamlık
Fiberler	Tiksotropik Çatlak Direnci Viskozite
Balmumu	Viskozite (sıcak) Sertlik (soğuk) Bağlayıcılık Adezyon
APP (Ataktik polipropilen) **EVA (Etilen vinil asetat)**	Sertlik Penetrasyon değeri Frass kırılma noktası Yumuşama noktası
SBS (stren-butadien-stren)	Penetrasyon değeri Yumuşama noktası Elastik geri dönüş Düşük sıcaklık kırılganlığı
Solvent	Viskozite
Emülsifikasyon	Viskozite Islatma kabiliyeti Uygulama sıcaklığı
Islatma ajanları	Islatma kabiliyeti Adezyon

Kimyasal katkı maddelerinin bitüme ilavesi ile bitümün viskozite, sertlik, yumuşama, adezyon, yaşlanma, soyulma ve işlenebilirlik gibi özelliklerinde

iyileştirmeye gidilebilmektedir. Yorulma direncini artırmak için stiren-bütadien (SBR), etil-vinil-asetat (EVA), oksidan vb., kalıcı deformasyon direncini artırmak için stiren-bütadien-stiren (SBS), mineral filler, vb., düşük ısı çatlağı direnci için SBS, genleştirici katkılar, vb., sertleşme direnci için SBR, oksidan, antioksidan, mineral elyaflar, vb., soyulmaya karşı organik esaslı metal katkı maddeleri kullanılabilmektedir (Tunç, 2004).

EVA (etilen vinil asetat), SBS (polistiren ve polibütadien esaslı polimerler), termoset veya termoplastik polimerler, doğal ve yapay kauçuk, vb. modifiyerler bitüme katıldığında elde edilen özellikler farklı olduğundan dolayı bitümle uyumu için gerek cins gerekse miktar doğru saptanmalıdır. Bunun için modifiye bitüm üzerinde yapılacak bir takım deneyler (viskozite, yumuşama noktası, soyulma, kırılganlık, vb.) yapılarak sonuçlar modifiye edilmemiş bitümle karşılaştırılmalıdır (Çubuk, 2007).

3.4.6. Bitümün modifikasyon türleri

Kullanılan katkılar yani modifiyerler gerek cins gerekse miktar olarak farklı bitümlerde farklı sonuçlar yaratmaktadır. Bunun nedeni asfalten ve malten olarak belirttiğimiz iki ana grubun her bitümde farklı oranlarda olmasıdır. Aynı şekilde katkı cinsinin ve miktarının belirlenmesi de önemli bir husustur (Çubuk, 2007).

3.4.6.1. Kükürt ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu

Kükürt kullanım miktarına göre, kükürtlü asfalt denilen ve kükürdün az miktarda kullanıldığı uygulamalar ve fazla miktarda kükürt kullanılan uygulamalar olmak üzere iki şekilde modifiyer olarak kullanılmaktadır. Az miktardaki uygulamalarda kükürt bitümün seyreltilmesi işlevini görür. Fazla miktarda uygulamalarında ise kükürdün işlenebilirliği artırdığı, silindir kullanmadan yani sıkıştırma gerekmeden, sadece finişer ile serilebilecek derecede çalışılabilir ve hizmet süresince deformasyona karşı yüksek dirençli bir karışım elde edilmektedir. Bitüm ile reaksiyona girecek kükürt miktarı sıcaklığa ve bitüm kompozisyonuna göre değişmektedir (İsfalt, 2004).

Kükürt moleküle ilave olarak veya hidrojen sülfat olarak hidrojen çıkartılması yoluyla oksitlendirilerek, en yoğun şekilde bitümün naften-aromatik kısmı ile reaksiyona girdiği gösterilmiştir (Gonzales ve ark., 2004; Jin ve ark., 2002).

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

kullanımı gerekmektedir. Bitüm yaklaşık 160 °C sıcaklıklarda düşük viskoziteli bir madde olmasından ötürü karışımı kolayca işlenebilir hale getirmektedir. Karışım soğuduğunda fazla kükürt malzeme içerisindeki boşluklara kısmen dolar ve agregaların birbirleriyle sürtünmesini artırarak karışıma yüksek mukavemet kazandırır. Kükürt ile modifiye edilmiş karışım özellikleri ve davranışlarındaki değişikler zamana bağlıdır. İlk etapta, kükürt ile modifiye edilmiş bitümlü karışımların Marshall stabilitesi sadece bitüm kullanılarak hazırlanan karışımların değerinden az miktarda düşük olmakla birlikte, 7 ile 21 gün sonrasında, Marshall stabilitesi, modifiye edilmemiş malzemenin stabilite değerinin yaklaşık iki katına yükselmektedir. Bu durumun en geçerli açıklamasının ise bitümle etkileşime girmesi sonucunda kükürt kristalizasyonunun yavaşlaması olduğu belirtilmektedir (İsfalt, 2004).

3.4.6.2. Kauçuk ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu

Polibütadien, poliizopren, doğal kauçuk, bütil kauçuk, klorofin, düzensiz stirenbutadien- kauçuk, vb. gibi bileşenlerin çoğu bitüm ile birlikte kullanılmakta olup, başlıca etkileri viskoziteyi artırmaktır. Bazı durumlarda, kauçuklar vulkanize halde (çapraz-bağlı) kullanılır. Genellikle kullanılmış taşıt lastiklerinden elde edilen bu malzeme bitümlü karışımlara yüksek sıcaklıklarda karıştırılarak kullanılır. Yol yapımı için kullanılan karışımlar haricinde kauçuğun bitüm ve agregaya karıştırılarak futbol ve çocuk oyun sahasında kullanılabilecek elastik yüzeye sahip malzeme yapımında da kullanılabileceği görülmektedir (Çubuk, 2007).

3.4.6.3. Organo-mangan bileşiklerinin ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu

Bitümde organo-mangan bileşiklerinin kullanımı, ya tek başına veya organo-kobalt veya organo-bakır bileşikleri ile kombinasyon halinde yapılmaktadır (İsfalt, 2004).

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

bazalt agregalarının soyulmaya karşı mukavemet değerinde genel olarak % 90 oranında artış olduğu tespit edilmiştir (Çubuk, 2007).

3.4.6.4. Termoplastik polimerlerin ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu

Fiziksel olarak düz ve dallanmış zincir yapısına sahip olan bu polimerler, ısıtıldıklarında önce yumuşarlar sonra kıvamlı akışkan haline gelirler (Çubuk, 2007).

Polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistiren ve etil vinil asetat (EVA) modifiye karışımlarda denenmiş olan başlıca polimerleri oluşturmaktadır. Termoplastik polimerler bitüm ile karıştırıldıklarında ortam sıcaklığında birleşerek bitümün viskozitesini artırırlar (Gonzales ve ark., 2004).

Ancak, termoplastikler bitümün elastisitesini belirgin şekilde artıramadığı, ısıtıldıklarında ayrıştığı ve soğuma ile kaba bir dağılıma sebep oldukları belirtilmektedir. Bununla birlikte bu kısıtlamalar kabul edilerek 70 pen bitüm içerisinde % 5 EVA kullanımı oldukça yaygındır (İsfalt, 2004).

Bitümlü karışımlara EVA ilavesi sadece performansın iyileştirilmesi için kullanılmamakta, ayrıca soğuk havada yapılan uygulamalarda da önemli miktarlarda EVA kullanılmaktadır. EVA, kesme kuvvetine hassaslığından ve daha yumuşak bitümle kullanıldığından ötürü karışımın işlenebilirliğini artırmaktadır (Gonzales ve ark., 2004).

3.4.6.5. Termoplastik kauçukların ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu

Stirenik blok kopolimerler, dört ana termoplastik elastomer gurubu (poliüretan, polieter-poliester kopolimerler, olefinik kopolimerler ve stirenik kopolimerler) arasında bitüm ile karıştırılmak için en büyük potansiyeli taşıdığı kanıtlanmış olup, bu polimerlerle birçok çalışma yapılmıştır (Stastna ve ark., 2003, Nadkarni ve ark., 1985).

Termoplastik kauçuklar mukavemet ve elastikliğini moleküllerin üç boyutlu bir ağa fiziksel olarak çapraz şekilde bağlanmalarından elde etmektedir. Polistirenin camlaşma noktasının üzerindeki sıcaklıklarda (100 °C üzeri) ortamın zayıflamasından ötürü polistiren yumuşamakta ve gerilme altında ayrışmakta dolayısıyla da kolayca işlenmeye olanak sağlamaktadır. Soğutma ile ortamlar tekrar birleşmekte, mukavemet ve elastisite geri kazanılmaktadır (İsfalt, 2004).

3.4.6.6. Termoset ilavesi yoluyla bitümün modifikasyonu

Yüksek oranda çapraz bağ içeren polimerler ısıtıldıkları zaman termoplastikler gibi yumuşamazlar ve erimezler, hatta aksine sertleşirler. Sıcaklık daha da artırılırsa doğrudan ısısal bozunmaya uğrarlar yani kimyasal olarak parçalanırlar. Bu nedenle ısıtılınca sertleşen polimerlere ısı ile sertleşen anlamına gelen termoset polimerler denir (Çubuk, 2007).

Biri sertleştirici diğeri bir reçineden oluşan iki sıvı bileşenin kimyasal reaksiyona girmesinden termoset polimerler elde edilmektedir. Bitüm ile karıştırılan iki bileşenli epoksi reçinesi karışımları bitümden daha çok termoset reçinelerin özelliklerini yansıtmaktadır (İsfalt, 2004).

Termoset polimerler ile modifiye edilen bitümler ısıya daha az duyarlı, daha elastik ve aşınma direnci daha yüksektir. Dolayısıyla deformasyona karşı daha dirençlidirler. Ayrıca, bitüm-agrega adezyonu daha fazladır (Tunç, 2004).

3.5. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi

Asfalt bağlayıcıları kıvamlılıkları yerine performans esasına dayalı olarak sınıflandırılmak amacıyla son yıllarda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla Amerika'da Asfalt Enstitüsü tarafından SHRP (The Strategic Highway Research Program) için Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) adı altında bir sistem geliştirilmeye çalışılmaktadır. Asfalt bağlayıcıların fiziksel özelliklerini belirleyebilecek bir asfalt bağlayıcı sınıflandırılması yapılmaya çalışılmaktadır (Tunç, 2004).

Superpave yöntemi; ham, geri dönüşümlü, yoğun gradasyonlu, katkılı veya katkısız sıcak karışım asfaltlar ile mevcut tabakaların üzerine inşa edilen taş mastik asfalt (SMA) gibi çeşitli özel kaplama karışımlarına da uygulanabilir. Sistem, malzeme seçimi ve karışım dizaynı yoluyla kalıcı deformasyon, yorulma ve düşük sıcaklık çatlağı gibi bozulmaları doğrudan kontrol eder ve bağlayıcının uzun ve kısa dönem yaşlanması ile karışımın nem hassasiyetini açık bir şekilde dikkate almaktadır. Superpave karışım dizayn yönteminin amacı, servis ömrü boyunca tatmin edici performans özellikleri gösteren bir kaplama tabakasını oluşturan ekonomik bağlayıcı ve agrega karışımlarını elde etmektir (Kennedy ve ark., 1994).

Superpave yönteminin en önemli özelliği, deneylerin, standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki sıcaklıklarda yapılarak asfaltın saha performansıyla doğrudan ilgili fiziksel ve reolojik özelliklerinin analitik deneylerle tespit edilmesi ve genel olarak saha performansının daha iyi ve gerçekçi olarak yansıtılmasıdır (Zaniewski ve Padula, 2003).

Superpave sistemindeki performans esaslı bağlayıcı şartnamesi, kaplamada meydana gelen kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlaklarını azaltarak bağlayıcının performansını en üst düzeye çıkarmak ve ölçmek için tasarlanmıştır (Cominsky ve ark., 1994).

Aşağıda Çizelge 3.4'de Superpave yönteminde kullanılan testler ve kullanım amaçları görülmektedir.

Çizelge 3.4. Superpave asfalt bağlayıcı testleri ve kullanım amaçları (Tunç, 2004)

Testler	**Amaç**
Dönel İnce Film Fırını (RTFOT)	Bağlayıcının sertleşme (yaşlanma) karakteristiklerini belirlemek
Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)	
Dinamik Kayma (Kesme)Reometresi (DSR)	Yüksek ve orta ısılarda bağlayıcının teker izi ve yorulma çatlağı direncini belirlemek
Dönel Viskozimetre (RV)	Yüksek ısılarda bağlayıcının özelliklerini ölçmek
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Düşük ısılarda bağlayıcının düşük ısı çatlağı direncini belirlemek
Doğrudan Çekme (DTT)	

Superpave yönteminde bağlayıcılar, farklı sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılır ve bu tür bağlayıcılara "Performance Grade" Performans Sınıfı veya Performans Dereceli asfalt adı verilir ve PG simgesi ile tanımlanmaktadır. Performans dereceli (PG) bağlayıcılar, PG 64–22 gibi bir terminoloji kullanılarak ifade edilirler. Burada ilk sayı olan 64, "yüksek sıcaklık derecesi" olarak isimlendirilir ve bu bağlayıcının gerekli fiziksel özelliklerini hizmet etmesi beklenen iklim koşullarındaki en yüksek kaplama sıcaklığı olan 64 ^{o}C'lik yüksek sıcaklığa kadar taşıdığı anlamına gelir. Benzer şekilde ikinci sayı (-22), "düşük sıcaklık derecesi" olarak isimlendirilir ve bağlayıcının gerekli fiziksel özellikleri -22 ^{o}C'lik düşük sıcaklığa kadar koruduğu anlamına gelir (McGennis ve ark., 1995).

Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (SUPERPAVE) bağlayıcı şartnamesinin en önemli özelliği, asfaltın ömrü boyunca karşı karşıya kalacağı üç kritik durumun deneylerle simüle edilmiş olmasıdır. Orijinal asfalt numunesi üzerinde uygulanan deneyler taşıma, depolama ve işlemeyi kapsayan ilk aşamayı temsil eder. İkinci aşama, karışım hazırlama ve serme sırasındaki asfaltı temsil eder. Döner ince film etüvünde

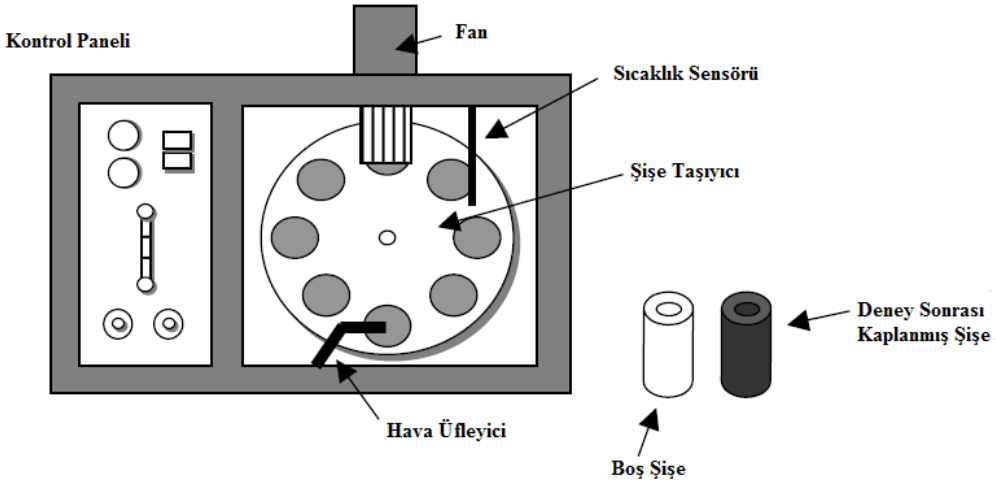
asfalt, sıcaklık ve havaya maruz bırakılarak oksidasyonu sağlanır ve serme sırasındaki sertleşme tahmin edilir. Üçüncü aşama ise, bağlayıcının uzun süre sonundaki yaşlanmasıdır. Bu durum da, basınçlı oksidasyon deneyi ile simüle edilmektedir (Öztürk ve Çubuk, 2004).

3.5.1. Dönel ince film etüvü (RTFOT) deneyi

Bu deney, ısıtma ile uçucu kaybının tespit edilmesi ve ısıtmadan sonra elde edilen sertleşmiş bitümlü bağlayıcının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılır. Yüksek performanslı asfalt kaplama şartnamesi, bu olayı temsil eden dönmeli ince film halinde ısıtma deneyini gerekli görür. Deneyin amacı, oksidasyon sonrasında buharlaşan kütle kaybını belirlemek ve daha sonra yapılacak diğer performans deneyleri için yaşlanmış numune elde etmektir. Bunun için, Şekil 3.16'da görülen 163°C'lik ısıya sahip bir etüvün dönen tablası üzerine 8 adet silindir içine 0,0001 gram hassasiyetle tartılmış 35 gram bitümlü bağlayıcı numunesi yerleştirilir. Numune silindirlerinin konulduğu tabla dakikada 15 devir yapacak şekilde döndürülür. Bu ısıda 85 dakika süreyle bekletilen numuneler üzerine 400 ml/dk olacak şekilde hava püskürtülür. Deney sonunda iki tanesi alınır ve hassas terazide tartıldıktan sonra kütle kaybı aşağıdaki (3.8) bağıntısı ile hesaplanır.

Kütle Kaybı, % = [(İlk Kütle–Son Kütle)/ İlk Kütle]×100 (3.8)

Geriye kalan 6 numunenin bakiyesi bir kaba boşaltılır ve homojenliği sağlamak üzere karıştırılır. Bu bakiye numune daha sonra basınçlı yaşlandırma kabı deneyi ve dinamik kayma reometresi deneyinde kullanılmak üzere saklanır (Tunç, 2004).

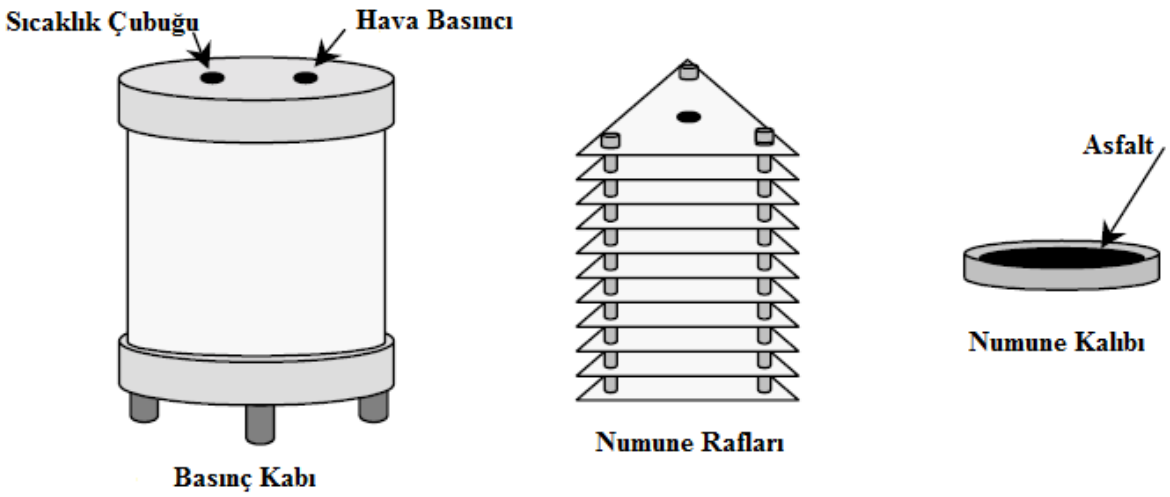


Şekil 3.16. Dönel ince film etüvü (RTFOT) deney düzeneği görünüşü (Reubush, 1999)

Kütle kaybı; asfalt bağlayıcı içerisindeki uçucu maddelerin kaybından ibaret olup asfaltın taşıma, depolama, ısıtılma, kaplamanın inşası ve kullanımı esnasında sertleşmesinin yani yaşlanma ile fiziksel özelliklerinin değişmesi veya durabilitesinin bir göstergesidir (Tunç, 2004).

3.5.2. Basınç yaşlandırma kabı (PAV) deneyi

Silindir ince film fırın testi sıcak asfalt karışımların hazırlanması ve inşası sırasında karışım ısısı nedeniyle oluşan sertleşme (yaşlanma) performansını belirlemek için yapılırken, basınç yaşlandırma kabı (PAV) testi ise asfalt bağlayıcının kaplama ömrü boyunca maruz kalacağı uzun dönemli sertleşme etkilerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır (Tunç, 2004). Deney aleti ve parçaları Şekil 3.17'de görülmektedir



Şekil 3.17. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ve parçaları (Reubush, 1999)

Bu deneyde, asfalt bağlayıcı numunesi 20 saat süreyle yüksek basınç ve ısı etkisine tabii tutularak uzun dönemde maruz kalacağı sertleşme etkisi yaratılır. Böylece uzun yıllarda oluşacak yaşlanma 20 saate indirgenmiş olur. Bu deney için içinde rafları olan ve istenilen ısıyı sağlayabilen bir fırın kabı gereklidir. Dışarıdan kabın içine 2070 kPa basınç uygulanabilmeli ve ısısı 90°C, 100°C veya 110°C'ye ayarlanabilmelidir. Silindir ince film fırın testine tabii tutulup elde edilen numunelerden 50 gramlık bir kısmı tavaya alınır ve kabın rafına yerleştirilir. Numune 20 saat süreyle yüksek basınç ve ısı etkisine tabii tutulur. Bu deneyin sonunda elde edilen numune dinamik kesme, eğilme kirişi ve direkt çekme testlerinde kullanılmak üzere saklanır (Tunç, 2004).

3.5.3. Dinamik kayma (kesme) reometresi (DSR) deneyi

Superpave bağlayıcı deneyleri, asfaltın performansını orijinal durum, karıştırma ve yapım aşaması ile servis ömrü aşaması olmak üzere üç etapta ele almaktadır. Asfalt bağlayıcının kullanım ömrü boyunca karşılaşacağı yaşlanma ile ilgili şartlar RTFOT ve PAV deneyleri uygulanarak sağlanmaktadır. Bu şekilde elde edilen asfalt numunelere aşağıda Çizelge 3.5'te belirtilen testler uygulanarak fiziksel özellikleri saptanmakta ve böylece gerçek şartlara benzeşim sağlanarak bağlayıcının performansı gerçekçi yaklaşımlarla saptanmaya çalışılmaktadır (Tunç, 2004).

Çizelge 3.5. Superpave asfalt bağlayıcı testlerinde yaşlanma şartları (Tunç, 2004)

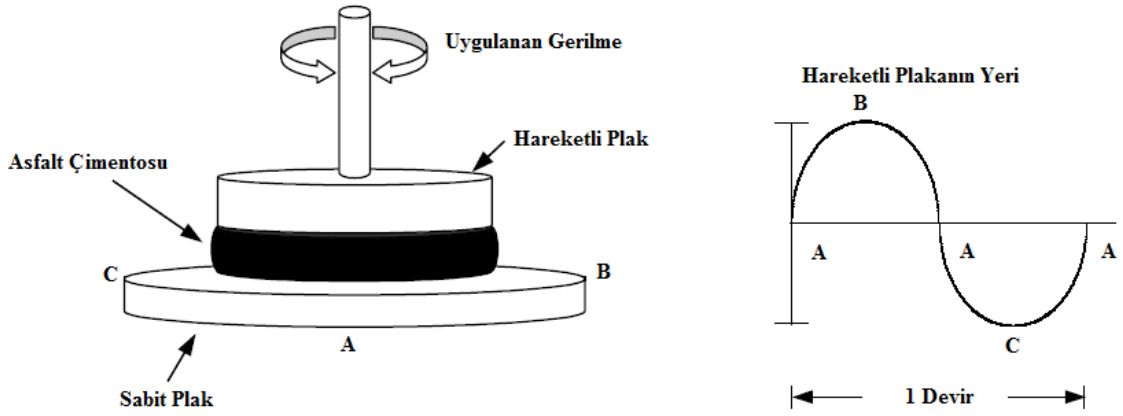
Deney Adı	**Bağlayıcı Şartı**
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Orijinal Asfalt RTFOT Uygulanmış Asfalt PAV Uygulanmış Asfalt
Dönel Viskozimetre (RV)	Orijinal Asfalt
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	PAV Uygulanmış Asfalt
Doğrudan Çekme (DTT)	PAV Uygulanmış Asfalt

Bitüm hem viskoelastik hem de termoplastik bir malzeme olduğundan dolayı karakteristiklerinin belirlenmesinde her iki özelliği de birlikte göz önüne alınmalıdır. Bu test ile yükleme süresi ve ısının asfalt bağlayıcı üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir (Tunç, 2004).

DSR deneyi, bitümlü bağlayıcının yapımdan hemen sonra tekerlek izine karşı dayanımının belirlenmesini sağlamakta ve ömrünün ilk dönemleri için yüksek servis sıcaklıklarında kaplamanın tekerlek izi oluşumuna karşı direnci değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, servis ömrünün ilerleyen dönemlerinde orta servis sıcaklıklarında kaplamanın yorulma çatlağı oluşumuna karşı dayanımının belirlenmesini de sağlamaktadır. DSR deneyinde, asfalt numunenin sinüzoidal gerilmelere veya deformasyonlara karşı davranışı belirlenerek bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (kayma sertliği) (G*) ve faz açısı (δ) hesaplanmaktadır.

Viskoelastik bölgede bitümlü bağlayıcıların kayma deformasyonuna karşı dayanımının göstergeleri olan kompleks kayma modülü ve faz açıları, bitümlü sıcak kaplamaların tekerlek izi oluşumu ve yorulma ömrü potansiyelini belirlemeye yardımcı olmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

Şekil 3.18'de görüldüğü gibi sabit bir plaka ile dönebilen bir plaka arasına konan sabit kalınlıktaki asfalt numunesi belirli bir ısı altında ve belirli bir hızda döndürülmeye çalışılır. Döner tablaya tatbik edilen gerilme ile tablanın merkezinden yani A noktasından B noktasına kadar hareket ettirilir. Daha sonra döner tabla B noktasından A noktasına ve C noktasına kadar döndürülür. Daha sonra C noktasından tekrar A noktasına kadar döndürülür. Buna 1 devir denilir ve test süresince tekrar edilir. Bu devrin dönme hızına frekans denilir. Bu test 10 radyan/saniye frekans yani yaklaşık 1.59 Hz (devir/saniye) ile yapılmaktadır (Tunç, 2004).



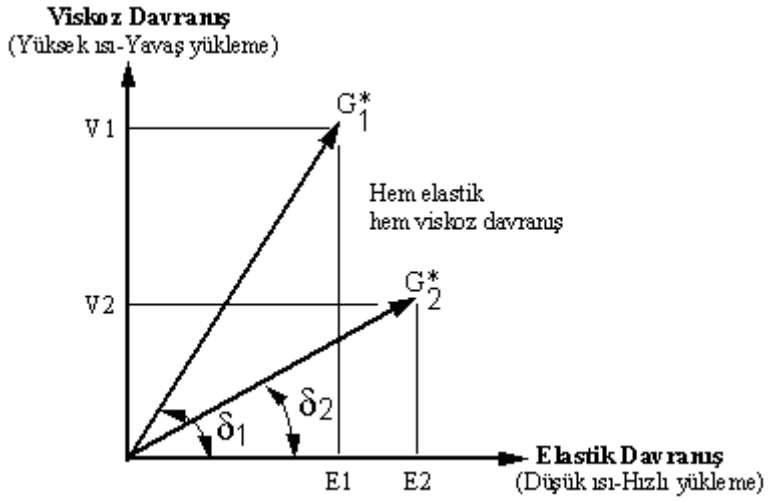
Şekil 3.18. Dinamik kayma test düzeneği ve hareket tarzı (Reubush, 1999)

Bu deney, saniyede 10 radyanlık sabit bir frekansta (ω) birbirini takip eden 10 devir yapılarak gerçekleştirilmektedir. Burada, 10 rad/sn frekans değeri 100 km/saat trafik hızına eşdeğer olarak kabul edilmektedir. Şehir içi yollarda 50 km/saat trafik hızı için frekans 5 rad/sn, duran trafik için 1 rad/sn olarak alınmaktadır (Kennedy ve ark., 1994).

Kayma gerilmesi $\tau = G.\ \delta$ ile ifade edilmektedir. Burada G, kayma modülü iken δ, kayma deformasyonunu ifade etmektedir. Dinamik kayma testi, asfalt bağlayıcının kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) ölçerek viskoz ve elastik davranışlarını karakterize etmek için yapılır. G^*, tekerrür eden kayma gerilmelerinin yarattığı deformasyonlara karşı asfalt bağlayıcının gösterdiği toplam direncin ölçüsüdür. Buradaki deformasyon elastik (geçici) ve viskoz (kalıcı) olarak iki türlüdür. Gerek G^* gerekse δ değerleri asfaltın sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişir.

Şekil 3.19'da görüldüğü gibi $\delta = 90^o$ iken çok yüksek ısılarda asfalt sadece düşey aksta viskoz davranışı temsil ederken G^*, yatay aksı elastik davranışı olmayacaktır. Çok düşük ısılarda ise tamamen elastik (geçici) deformasyon gösteren asfaltın sadece yatay

bileşkesi olacaktır. Bu durumda G^*, düşey bileşkesi viskoz davranışı olmayacağından $\delta = 0^o$ olacaktır (Tunç, 2004).



Şekil 3.19. Viskoelastik Davranış (Tunç, 2004)

Normal kaplama ısısı ve trafik yüklemesi altında asfalt bağlayıcılar hem viskoz hem de elastik davranış sergileyecektir. Asfaltın viskoelastik malzeme oluşu ve her bir asfaltın viskoelastik özelliklerinin de birbirinden farklı olması nedeniyle 1 ve 2 nolu asfaltlar yük altındaki viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklı olacaktır. Şekil 3.19'da G_1^* ve G_2^* kompleks kayma modüllerinin vektörlerini temsil etmektedir. Burada 2 nolu asfaltın δ açısı daha düşük olduğundan dolayı elastik bileşeni daha büyük olacak yani yük kalktığında daha çok deformasyon geri kalkacaktır. Aynı şekilde 1 nolu asfalt daha az elastik olup daha fazla kalıcı deformasyon yapacaktır. Şekil 3.19'daki iki asfaltın G^* değeri aynı ise farklı δ değerlerinden ötürü farklı viskoelastik davranış gösterecekleri açıktır. Yani G^* tek başına asfaltın davranışını izah edememektedir. Dolayısıyla asfaltın viskoelastik özellikleri G^* ve δ değerleri ile birlikte göz önüne alınmalıdır. Kompleks kayma modülü (G^*) aşağıdaki (3.9) bağıntısından hesaplanmaktadır.

$$G^* = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \qquad (3.9)$$

Faz açısı (δ); uygulanan gerilme ile elde edilen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olacaktır (Tunç, 2004).

DSR yazılımı tarafından kayma gerilmesi (τ) ve kayma deformasyonu (γ) değerlerinin hesaplanması, asfalt numunesinin DSR aletinde yerleşimini temsil eden

Şekil 3.20'de belirtilen parametreler kullanılarak (3.10) ve (3.11) bağıntıları ile yapılmaktadır (Kennedy ve ark., 1994).

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} \tag{3.10}$$

$$\gamma = \frac{\theta r}{h} \tag{3.11}$$

Burada;

τ: Kayma gerilmesi (Pa),

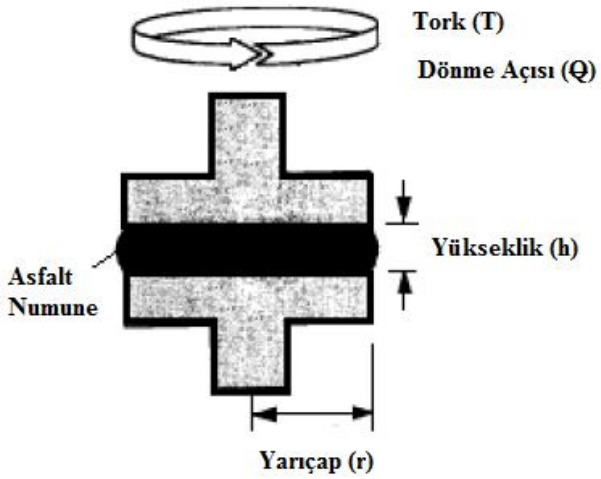
γ: Kayma deformasyonu (%),

T: Uygulanan tork (N.m),

r: Numunenin yarıçapı (12,5 mm veya 4 mm),

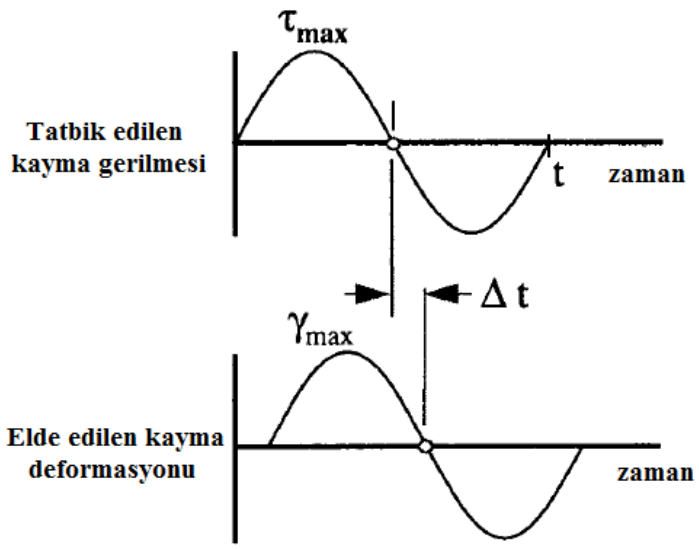
θ: Dönme açısı (rad),

h: Numunenin yüksekliği (1mm veya 2 mm)'dir.



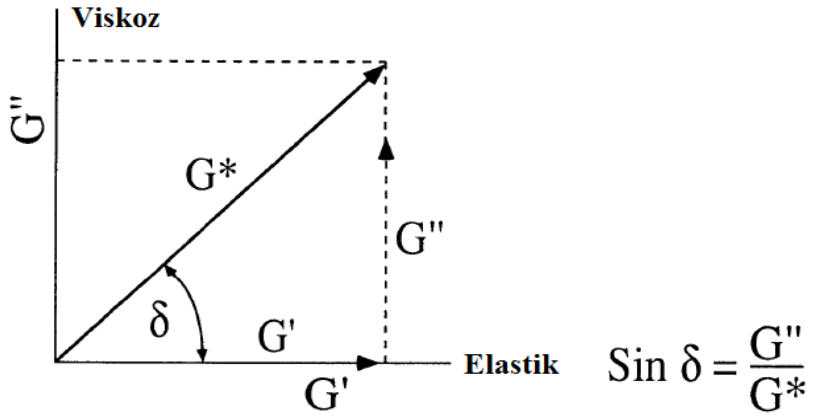
Şekil 3.20. DSR Asfalt numunesi (Kennedy ve ark., 1994)

Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özellik göstermesi sebebiyle, normal sıcaklıklarda faz açısı 0° ile 90° arasında değişecektir (Şekil 3.21.). Faz açısının düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir (Kennedy ve ark., 1994).



Şekil 3.21. Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi (Kennedy ve ark., 1994)

Kayma modülüne bağlı olarak faz açısının değişimi Şekil 3.22'de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Kayma modülünün bileşenleri (Kennedy ve ark., 1994)

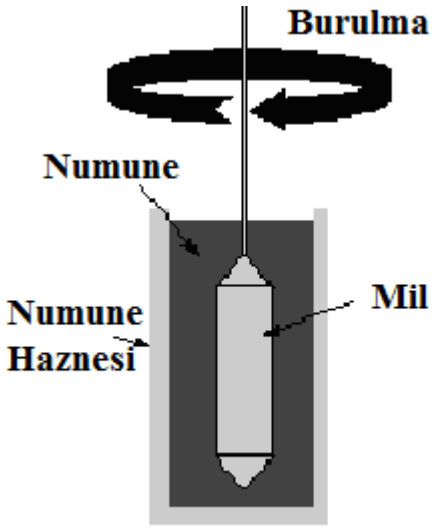
Kompleks kayma modülü; kayıp modül (G″) ve depolama modülü (G′) bileşenlerinden oluşmaktadır. Elastik bileşeni ifade eden depolama modülü her bir yükleme devri boyunca numunede saklanan enerji miktarını göstermektedir. Viskoz bileşeni ifade eden kayıp modül ise her bir yükleme devri boyunca numunedeki kayıp enerji miktarını göstermektedir. Faz açısı δ =0° olduğunda numune tamamen elastik davranış göstereceğinden kompleks kayma modülü depolanan modüle, faz açısı 90° olduğunda ise viskoz davranıştan dolayı kompleks kayma modülü kayıp modüle eşit olacaktır. Bu sebeple, şekilde görüldüğü gibi viskoelastik özellik G* ve δ bağlı olduğundan, bitümün viskoelastik özelliği, G* ve δ birlikte göz önüne alınarak belirlenmelidir (Kennedy ve ark., 1994).

G* ve δ sonuçları ile performans esaslı asfalt bağlayıcıların özellikleri belirlenebilir. Örneğin;

- G*/Sinδ değeri orijinal bağlayıcı için minimum 1,00 kPa ve silindir ince film fırın testinden sonra elde edilen bağlayıcı için minimum 2,20 kPa olma şartı deformasyonlar için limit değerlerdir.
- G*.Sinδ değeri basınç sertleşme kabı testinden sonra elde edilen bağlayıcı için maksimum 5000 kPa olması şartı yorulma çatlakları için limit değerdir (Tunç, 2004).

3.5.4. Dönel viskozimetre (RV) deneyi

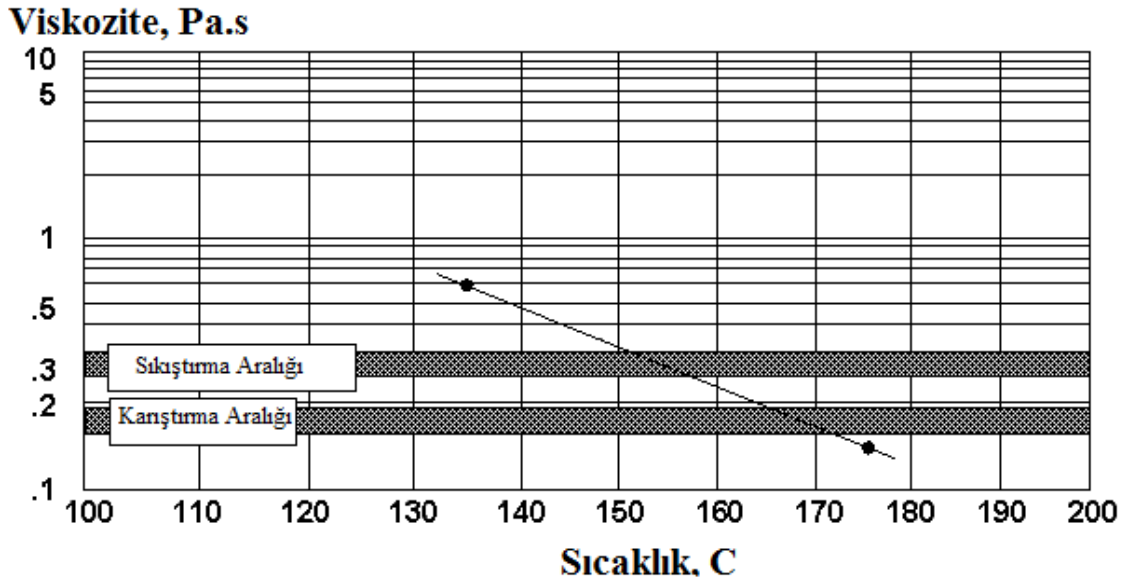
Rotasyonal viskozluk testi asfalt bağlayıcının yüksek ısıdaki (135 °C) akışkanlık karakteristiğinin belirlenmesi için yapılır. Şekil 3.23'de görülen cihaz ile asfalt bağlayıcının viskozluğu cP cinsinden ölçülür. Bu test için özel olarak geliştirilmiş cihazın kaşığı 20 dev/dak hızla döndürülerek viskozluk değeri otomatik olarak saptanabilmektedir. Performans esaslı asfalt bağlayıcı sınıflamasında Pascal-saniye birimi kullanılır. Dönüştürme için 1000 cP = 1 Pa.s eşitliği kullanılır. Asfalt 135 °C'de maksimum 3 Pa.s viskozluğa sahip olmalıdır (Tunç, 2004).



Şekil 3.23. Dönel viskozimetre (RV) cihazı (Loh ve Olek, 1999)

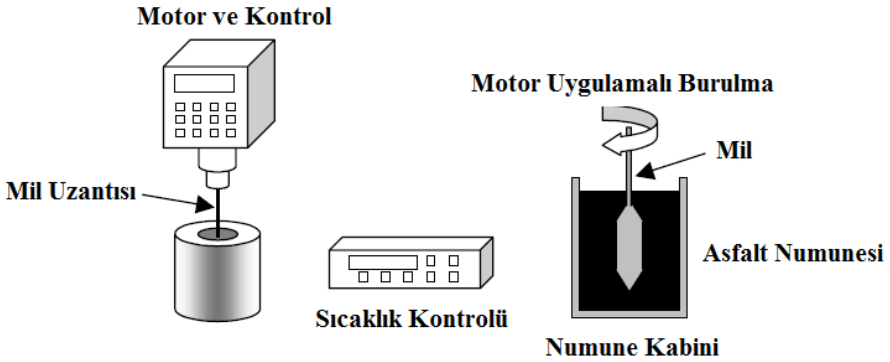
Viskozimetre ayrıca, karışım tasarımında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılan sıcaklık-viskozite grafiğinin hazırlanmasında yardımcı olmaktadır. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları, Şekil

3.24'de bir örneği verilen bu grafikler yardımıyla tespit edilmektedir. Dönel viskozimetre deneyi ile asfalt bağlayıcıların viskozitesi 0,01 Pa.s ile 200 Pa.s arasında ölçülebilmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).



Şekil 3.24. Asfalt bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi (Zaniewski ve Pumphrey, 2004)

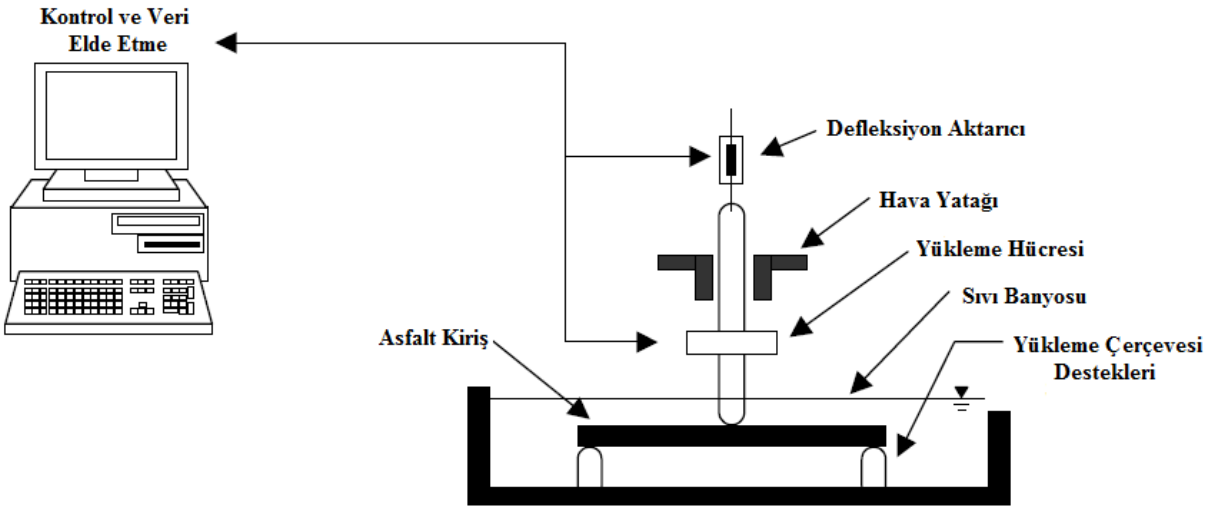
Dönel viskozite testi bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki işlenebilirliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Viskozimetre, pompalama ve karıştırma esnasında asfalt akışkanlığını değerlendirmek için yüksek sıcaklıklarda bağlayıcının viskozitesini ölçer. Asfalt numunesi özel bir silindirik numune kabini içine dökülür. Dönen bir mile uygulanan torku ölçülmüş ve bağlayıcı viskozitesini üreterek bağlayıcının dönme direncinin değerlendirilmesi için kullanılır. Dönel viskozimetre şematik olarak Şekil 3.25'de gösterilmiştir (Reubush, 1999).



Şekil 3.25. Dönel viskozimetre (RV) (Reubush, 1999)

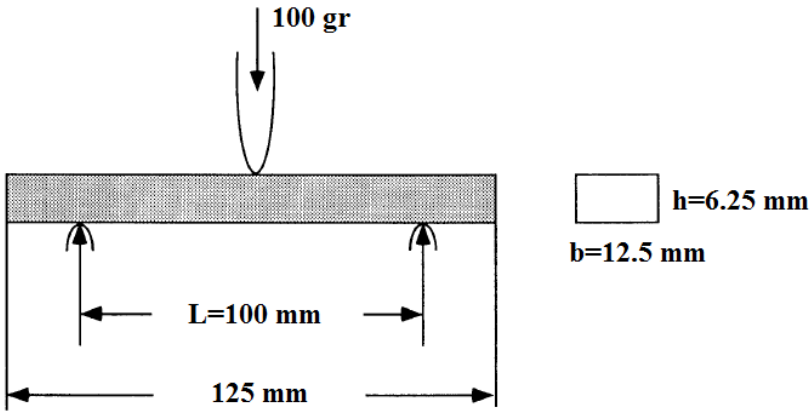
3.5.5. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi

Asfalt bağlayıcılar düşük ısılarda son derece rijit (katı) bir davranış gösterirler. Bu testin amacı, düşük ısılarda asfalt bağlayıcıların rijitlik ve mukavemet özellikleri arasındaki ilişkinin tam olarak saptanamadığından dolayı dinamik kayma testi ile eğilme kirişi testi birlikte ele alınarak asfalt bağlayıcıların oldukça geniş bir ısı aralığındaki rijitlik davranışını saptamaktır. Yani belirli bir ısıda ve sabit bir yük altında bağlayıcının ne kadar sünme veya defleksiyon yapacağını ölçmekten ibarettir. Bu nedenle bu test asfalt kaplamanın sahip olabileceği düşük ısılardaki elastik davranışını belirlemeye çalışmaktadır. Ayrıca silindir ince film fırın ve basınç sertleşme kabı testleri ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde de test yapılabildiğinden ötürü asfalt bağlayıcının zaman içindeki değişimini de saptayabilmektir (Tunç, 2004). BBR deney aletinin şematik görünüşü Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26. Kiriş eğme reometresinin (BBR) şematik görünüşü (Reubush, 1999)

Asfalt bağlayıcının sünme sertliğinin belirlenmesi amacıyla, Şekil 3.27'de görüldüğü gibi standart ölçüleri 12,5x125x6,25 mm (0,50x5x0,25 inç) olan asfalt kiriş esas alınarak, klasik kiriş analiz teorisi kullanılmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).



Şekil 3.27. Kiriş eğme reometresi (BBR) numunesinin görünüşü (Zaniewski ve Pumphrey, 2004)

Bu deney için 6.25 mm yükseklik, 12.5 mm genişlik ve 125 mm uzunlukta hazırlanan asfalt bağlayıcı numunesi eksi derecelerde donmayan bir sıvı banyosu içinde 980 mN ve 240 saniye süreyle tek nokta yüklemesine maruz bırakılır. Şekil 3.28'de görülen, test süresince defleksiyon ölçülür ve sağlamlık modülü aşağıdaki (3.12) bağıntısı ile tayin edilir.

$$S_{(t)} = \frac{PL^3}{4bh^3\delta_{(t)}} \tag{3.12}$$

$S_{(t)}$ = t anında sünme sağlamlık modülü (MPa),

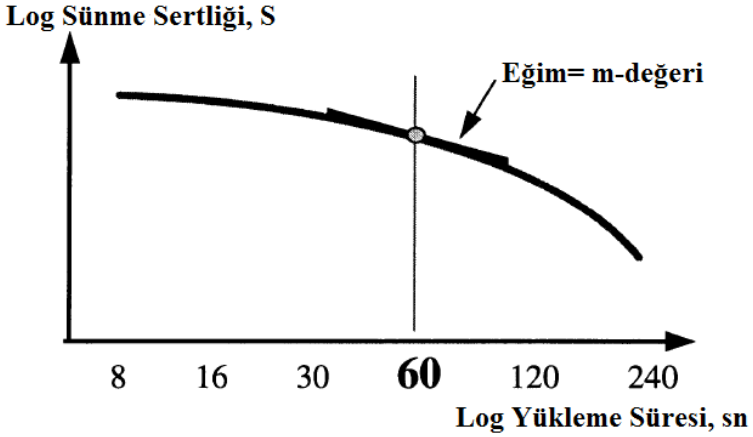
P = Uygulanan sabit yük (N),

L = Kirişin yük tatbik aralığı (102 mm),

b = Kiriş genişliği (12.5 mm),

h = Kiriş yüksekliği (6.25 mm),

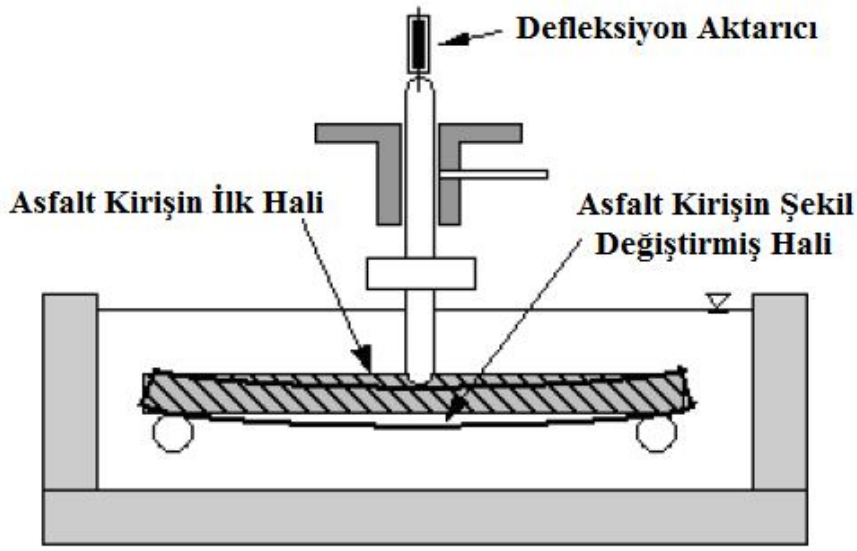
$\delta_{(t)}$ = t anında yer değiştirme (mm).



Şekil 3.28. Sünme oranı (m-değer) değerinin grafikle belirlenmesi (McGennis ve ark., 1994)

Bu testin süresi 4 dakika (240 san) olup daha uzun süreli yüklemeler için aranan rijitlik değerleri cihazın grafik çıktısı ile superpoze edilerek bulunabilmektedir. Sünme rijitlik değeri, kaplamanın minimum tasarım ısısında iki saat yüklemeden sonra elde edilmesi istenmektedir. Ancak araştırmacıların yaptığı çalışmalar sonucunda test ısısını 10 °C'ye yükseltildiğinde 60 saniyelik yükleme sonucunda elde edilen sünme rijitliğine eşit olduğu görülmüştür. Yani minimum kaplama ısısında iki saatlik yükleme sonucu ile 10 °C'de 60 saniyelik yükleme sonucu aynı sünme rijitlik değerini vermektedir. Dolayısıyla 240 saniyelik test süresi fazlasıyla kafi gelmektedir. Test cihazı 60 saniyedeki rijitliği hesaplayarak vermektedir (Tunç, 2004).

Şekil 3.29'da görüldüğü gibi uygulanan yük süresince kirişte oluşan defleksiyon sistem tarafından kaydedilmektedir.



Şekil 3.29. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi (McGennis ve ark., 1994)

Yeni sınıflamaya göre 60 saniyedeki sünme rijitliğinin 300 Mpa'dan daha az olması öngörülmektedir. Ancak bu değer 300-600 Mpa arasında ise direkt çekme kopma deformasyon değeri şartnamede öngörülen şartı sağlamalıdır. Bu testteki ikinci parametre olan m-değeri, S(t) ile t arasındaki ilişkinin değişimini temsil etmektedir. Bu değerde test cihazı tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır. Yeni sınıflamada 60 saniyedeki m-değerinin 0,300'e eşit veya büyük olması öngörülmektedir (Tunç, 2004).

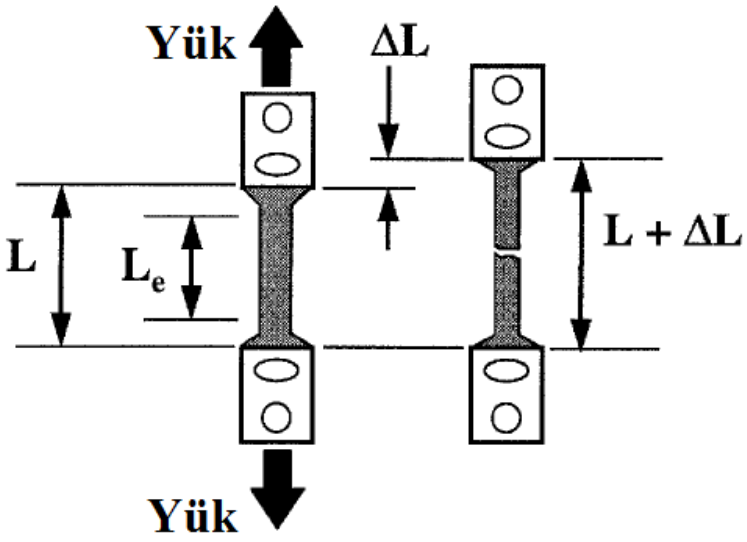
3.5.6. Doğrudan çekme (DTT) deneyi

Bugüne kadar yapılan çeşitli araştırmalarda asfalt bağlayıcıların düşük ısılarda sahip olduğu rijitlik ile kopma anındaki sünme miktarı arasında çok kuvvetli bir ilişki olduğu görülmüştür. Eğer asfalt bağlayıcı çekme gerilmesine tabii tutulduğunda yeterince sünme gösterirse düktil (sünek) ama hiç sünme göstermeden koparsa gevrek (kırılgan) olarak adlandırılır. Yani asfalt ne kadar rijit (katı) ise o kadar gevrek ama ne kadar yumuşak ise o kadar düktil bir davranış gösterir. İdeal bir asfalt bağlayıcı düşük ısılarda da bir miktar sünek davranış sergilemelidir. Aksi takdirde düşük ısılarda trafik yüklerinin etkisi ile kaplamada düşük ısı çatlakları meydana gelmektedir.

Bu test ile tespit edilen sünme rijitliği, asfaltın kopmadan önceki sünme kapasitesini tam olarak karakterize etmemektedir. Zira bazı bağlayıcılar yüksek sünme rijitliği gösterseler de kopmadan önce bir miktar sünme yapabilmektedir. Bu nedenle rijit ancak düktil özellik arzeden bağlayıcıların eğilme kirişi test sonuçları 300 ve 600 MPa arasında ise ilave gereklilikler uygulanmalıdır. Ancak 300 MPa'dan daha az rijitlik gösterirse ilave testlerin yapılmasına gerek kalmamaktadır. Bu test orijinal bağlayıcılara uygulandığı gibi silindir ince film testi ile basınç yaşlandırma kabı testi sonucunda elde edilen bakiye üzerinde de yapılmaktadır. Ayrıca bu test 0 °C ile -36 °C arasındaki ısılarda gevrek davranış gösteren asfalt bağlayıcıların performansının saptanmasında önemli bir göstergedir (Tunç, 2004).

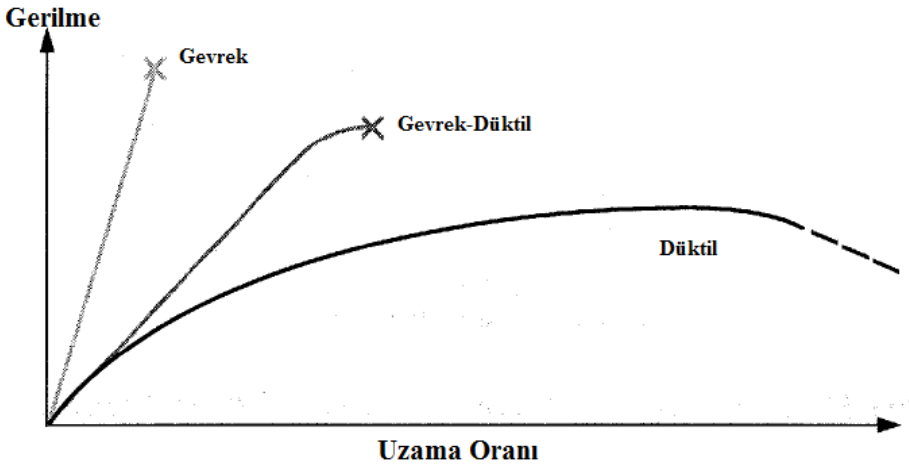
DTT deneyinde, esnek bir silikon lastik içinde kemik şeklinde hazırlanan asfalt numunesi 400–500 N yük uygulanarak iki ucundan 1,0 mm/dakika (0,04 inç/dak) hızla yavaş yavaş kopma anına kadar çekilir (McGennis ve ark., 1994).

Kopmanın meydana geldiği andaki uzunluk, kopma uzaması oranının hesaplanmasında kullanılır (Şekil 3.30.).

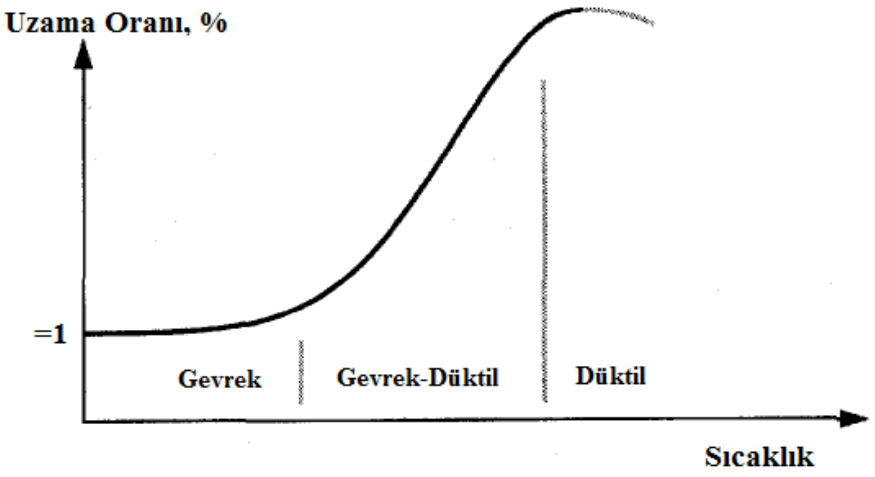


Şekil 3.30. Doğrudan çekme deneyi şematik görünüşü (McGennis ve ark., 1994)

Şartnameye göre düşük sıcaklıklarda elde edilen kopma uzaması, kopma anında en az %1 olmalıdır. Asfalt bağlayıcı birçok farklı sıcaklıklarda deneye tabi tutulduğunda sıcaklığa bağlı olarak Şekil 3.31 ve Şekil 3.32'de görüldüğü gibi üç farklı davranış (gevrek, gevrek-düktil ve düktil) sergilemektedir.

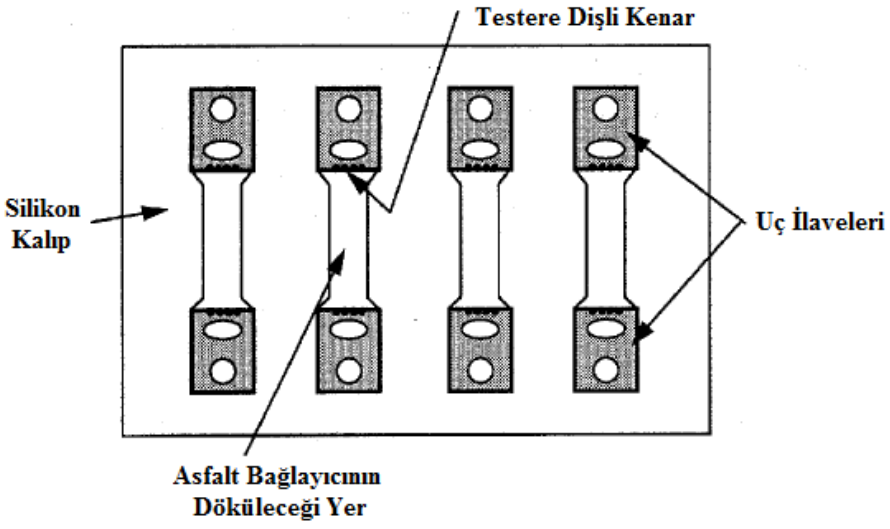


Şekil 3.31. Asfaltın bağlayıcılar çekme gerilme davranışları (McGennis ve ark., 1994)



Şekil 3.32. Asfaltın kopma uzamasında sıcaklığın etkisi (McGennis ve ark., 1994)

DTT deneyinde kullanılacak asfalt numuneler Şekil 3.33'de görülen ve aynı anda dört numune elde etmeye elverişli esnek silikon kalıplarla hazırlanmaktadır. Bu dört numuneden bir deney yapılmaktadır. Montajı yapılan kalıplar 135 ^{o}C'de 30 dakikalık bir ön ısıtmaya tabi tutularak içerisine ısıtılmış asfalt bağlayıcı (135 ^{o}C) dökülür. Deney numunelerinin boyu uç ilaveler ile birlikte toplam 100 mm ve numune ağırlığı ise 3 gr gelmektedir. Deney numunesine ait ölçüler 6x6 mm kare kesitli olup, deney için esas alınan numune ilk boyu 27 mm'dir. Numuneler döküldükten sonra soğuyan asfaltın taşan kısımları temizlenir ve kalıptan çıkartılarak deneyden önce 60 dakika süreyle deney koşullarına getirileceği kap içinde bekletilir (Petersen ve ark., 1994).



Şekil 3.33. Numune kalıpları (McGennis ve ark., 1994)

Deney aletinde numunelerin yerleştirildiği sıvı banyosunda kullanılacak sıvı etanol, metanol veya glikol etilen gibi -40 ^{o}C'ye kadar donmayacak veya sirkilasyonu zorlaştıracak derecede katılaşmayacak bir sıvı olmalıdır. Deney sırasında her bir numune ayrı ayrı deneye tabi tutulmaktadır. Deney başlatılmadan önce yük ve uzama göstergeleri ayarlanarak sıfırlanır. Elektronik sistem hazır hale getirildikten sonra dakikada 1 mm hızla numuneye bir ucundan 400–500 N'luk bir kuvvet uygulanarak kopuncaya kadar çekilir. Numune çekildiği esnada, sabit kesitin ortasında çatlama oluştuğu andaki gerilme ve şekil değiştirme değerleri geçerli deney sonuçları olarak kabul edilmektedir. Deney sonucunda, dört numunenin %0,01 hassasiyetle ölçülen ortalama uzunluk değişimi ve gerilme değerleri kullanılmaktadır (Petersen ve ark., 1994).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

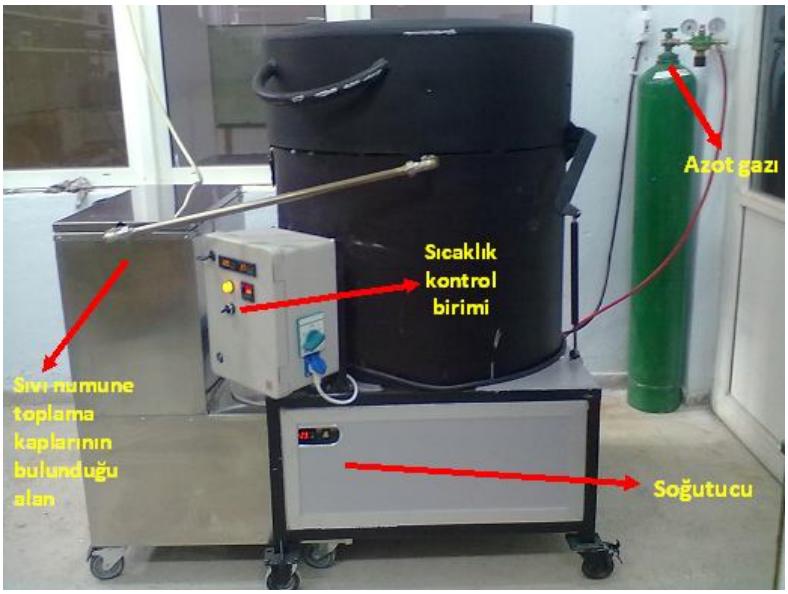
Bu bölümde çalışmada kullanılan atık sıvı lastik katkısının bitümlü bağlayıcı ve bitümlü sıcak karışımlarda modifiyer olarak kullanılabilirliği ile ilgili kullanılan malzemelerin özellikleri, şartname limitleri, yapılan deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

4.1. Piroliz ve Destilasyon

Piroliz, biyokütlenin oksijensiz ortamda ısıl bozundurma işlemidir. Piroliz sırasında düşük proses sıcaklığı ve uzun alıkonma süresinde yüksek katı ürün verimi; yüksek sıcaklık ve kısa alıkonma sürelerinde yüksek gaz ürün verimi; kısa alıkonma süresi ile orta sıcaklıkta optimum sıvı ürün verimi elde edilir (Bridgwater, 2003).

Biyokütleden, piroliz yöntemi ile motorin, fuel-oil ve türbin yakıtı alternatifi sıvı yakıtlar elde edilebilmektedir. Ayrıca piroliz sonucu elde edilen katran (biyo-oil, biyoyakıt) kimyasal hammadde girdisi olarak da kullanım alanı bulabilmektedir (Angın ve Şensöz, 2006).

Atık lastiklerin sıvılaştırılma işlemi Selçuk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma laboratuvarında Şekil 4.1'de gösterilen Piroliz deney sisteminde yapılmıştır. Bu deney sistemi üç farklı birimden oluşmaktadır. Bu birimler reaktör birimi, yoğunlaştırma birimi ve sıcaklık kontrol birimidir.



Şekil 4.1. Piroliz deney sistemi

Piroliz deney sistemini ilk kısmını oluşturan reaktör birimi, 25 cm uzunluğunda yaklaşık olarak 1000-1200 °C'ye kadar dayanıklı iç çapı 10 cm olan çelik bir reaktördür (Şekil 4.2.). Piroliz işleminin gerçekleştirildiği fırının iç kısmında 1200 °C'ye kadar dayanabilen direnç teli bulunmaktadır. Çelik reaktör fırın içine dikey olarak yerleştirilmekte ve istenildiğinde sistemden çıkartılıp temizlenebilmektedir.



Şekil 4.2. Piroliz deney sistemi çelik reaktör birimi

Ayrıca reaktör iç sıcaklığı ölçümü yapmak için kılıf içinde TC01-1K3N15-50 tipi Elimko marka NiCr-Ni ısıl çift dikey konumda yerleştirilmiştir. Piroliz deney düzeneğinin diğer bir ünitesi kontrol birimidir. Bu birimde açma-kapama düğmesi ile sıcaklık ve ısıtma hızının set edilmesini sağlayan düğmeler bulunmaktadır. Bu birimde ayrıca Protherm marka PID sıcaklık kontrol edici bulunmaktadır (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Piroliz deney sistemi PID sıcaklık kontrol birimi ve direnç telleri

Deney düzeneğinin diğer birimi ise yoğunlaştırma birimidir. Reaktörün çıkışına uygun rodajlar kullanılarak yatay konumda -45 °C'ye kadar soğutma yapabilen bir soğutucu bağlanmıştır. Soğutucunun diğer ağzına ise sıvı ürün toplama kapları yerleştirilmiştir (Şekil 4.4.). Bu kaplar soğutucu banyosu içinde deney süresince bulunmaktadır. Ayrıca yoğunlaştırılamayan gaz ürün, sıvı ürün alma kaplarının üst kısmına yerleştirilen bir ağız ve hortum yardımıyla atmosfere bırakılarak yakılmaktadır.



Şekil 4.4. Piroliz deney sistemi yoğunlaştırma birimi ve sıvı ürün toplama kapları

Şekil 4.5'de görülen atık lastiklerin pirolizi 5-59 ^{o}C/dakika ısıtma hızında ve 450 ^{o}C kadar ısıtma yapılmıştır. Reaktör sıcaklığı 150 ^{o}C geldiğinde azot (N_2) gazı reaktör içine verilmeye başlanmıştır. Atık lastiklerin pirolizinin yaklaşık 150 ^{o}C başladığı görülmüştür. Tepkime süresinin sonunda ısıtma kesilerek piroliz işlemine son verilmiştir. Piroliz süresince yoğunlaştırılabilen sıvı ürün toplama kaplarında toplanmıştır. Daha sonra reaktörün bağlantı elemanları ve rodajlar sökülüp sistem soğumaya bırakılmıştır. Reaktör oda sıcaklığına kadar soğuduktan sonra reaktör içinde kalan katı ürün (çar) dışarıya alınarak, elde edilen katı ve sıvı ürün tartılarak verim hesabı yapılmıştır. Piroliz yöntemi atık lastiklerden alternatif enerji ve yeni malzemeler elde edilmesine olanak verdiği için önemli bir teknolojidir. Fakat en önemli yararı çevreye zarar vermeden atık lastiklerin alternatif enerjiye dönüşmesi, atık lastiklerin doğada bozunmaması ve atmosferde sera etkisi oluşturan CO_2 salınımın azaltılmasıdır.



Şekil 4.5. Piroliz yöntemi ile sıvılaştırılacak granüler atık lastik

Piroliz deneyi sonucunda elde edilen katı ve sıvı ürün miktarı ayrı ayrı tartılarak, gaz ürün miktarı ise kütle denkliğinden hesaplanarak belirlenmiştir. Daha sonra aşağıdaki eşitlikler kullanılarak ürünlerin % verimleri hesaplanmıştır (Tiftik, 2006).

$$\%\text{Katı} = \frac{\text{Katı ürün miktarı (gr)}}{\text{Reaktöre beslenen toplam hammadde (gr)}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\%\text{Katı} = \frac{509{,}5}{1000} \times 100 = 50{,}95$$

$$\%\text{Sıvı} = \frac{\text{Sıvı ürün miktarı (gr)}}{\text{Reaktöre beslenen toplam hammadde (gr)}} \times 100 \quad (4.2)$$

$$\%\text{Sıvı} = \frac{322{,}6}{1000} \times 100 = 32{,}26$$

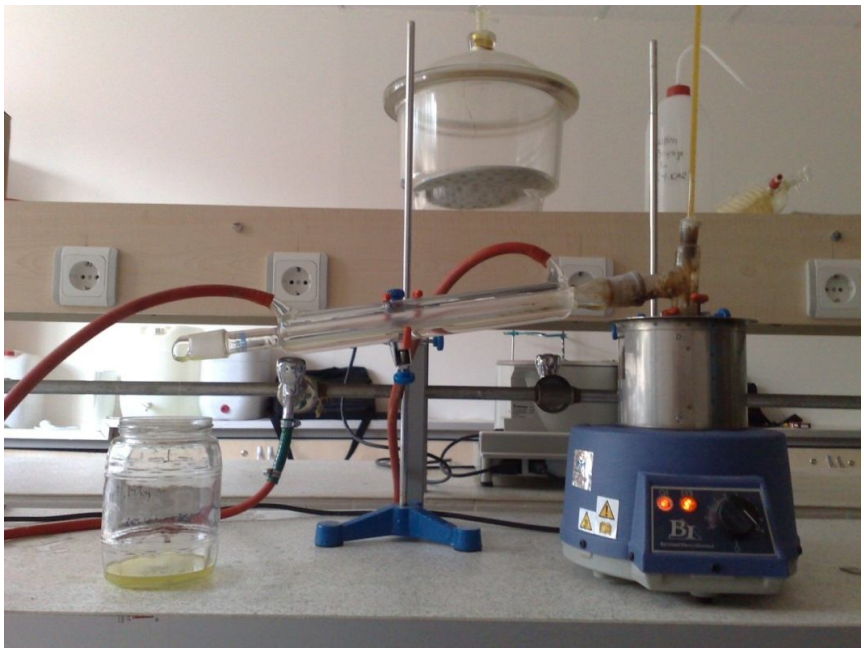
$$\%\text{Gaz} = 100 - (\%\text{Katı ürün} + \%\text{Sıvı ürün}) \quad (4.3)$$

$$\%\text{Gaz} = 100 - (50{,}95 + 32{,}26) = 16{,}79$$

$$\%\text{Toplam Dönüşüm} = \frac{\text{Reaktör toplam hammadde (gr)} - \text{Katı ürün (gr)}}{\text{Reaktör toplam hammadde (gr)}} \times 100 \quad (4.4)$$

$$\%\text{Toplam Dönüşüm} = \frac{1000 - 509{,}5}{1000} \times 100 = 49{,}05$$

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen ürünlerin (katı-sıvı-gaz) yüzdelerine bakıldığı zaman katı ürün (char) miktarı % 50,95, sıvı ürün (prolitik oil) miktarı % 32,26 ve kütle denkliğinden hesap sonucu da gaz ürün miktarı %16,79 olarak bulunmuştur. Yapılan diğer çalışmalarla kıyaslandığı zaman sonuçların örtüştüğü gözlenmektedir. Pirolizden elde edilen prolitik oil daha sonra destile edilerek 4 ayrı ürün elde edilmiştir. Prolitik oilden destilasyon sonucu elde edilen petrol ve türevi ürünlerinden en ağır franksiyon (360 °C üzeri) bitümü modifiye etmek için kullanılmıştır. Destilasyon deney düzeneği Şekil 4.6'da, destilasyondan elde edilen ürünler Şekil 4.7'de ve destilasyon deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Destilasyon deney düzeneği



Şekil 4.7. Destilasyon deneyi elde edilen ürünler

Çizelge 4.1. Atık lastik pirolizi sıvı ürün destilasyon sonuçları

		Destilat (gr)	**Destilat Yüzdesi (%)**
0–180 °C arası	(Hafif)	69,77	21,53
180–240 °C arası	(Orta)	78,63	24,26
240–360 °C arası	(Aromatik)	40,95	12,64
360 °C ve üzeri	(Ağır)	122,64	37,84
Kayıp miktarı:		12,08	3,73
Toplam:		324,07	100

4.1.1. Gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC/MS) analizleri

Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi (GC/MS) analizleri ile maddeleri ayırmak, niteleyici ve niceleyici tayinler yapılmaktadır. Atık sıvı lastiğin hafif, orta ve ağır ürünlerinin nitel ve nicel analizlerinin yapılarak ve kimyasal içeriklerini aydınlatmak için gerçekleştirilen GC/MS ve Elementel analizler Bilecik Şeyh Edebali

Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır. Atık lastiklerden elde edilen piroliz sıvı ürünlerinden destilasyon öncesi ve destilasyon sonrasındaki ürünlerin GC-MS analiz sonuçları Ek 1.'de verilmiştir.

Atık lastiklerden elde edilen piroliz sıvısı ve katı ürün ile destilasyon sonrasında elde edilen ürünlerin GC-MS kromatogramları incelendiğinde genel olarak, piroliz sıvılarının destilasyonları sonrasında elde edilen, hafif ve düşük sıcaklıklarda 0-180 °C arasında ilk gözlenen ürün daha uçucu ve hafif olan ürünlerdir. Ek 1.'de sonuçları verilmiş olan benzene buna örnek olarak verilebilir. Daha sonraki destilasyon ürünlerinde orta sıcaklıklarda 180-240 °C arasında ise kaynama noktası daha büyük olan ürünler elde edilir, naphthalene buna örnek olarak verilebilir. Kaynama noktası daha da yüksek olan ağır destilasyonlarda 360 °C ve üzerinde ise naphthalene, fluoranthene gibi daha az uçucu olan maddeler gözlenmiştir.

Yapılan analiz sonuçlarından elde edilen ürünler ayrıntılı olarak değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1- Atık lastik pirolizi saf numunesinde, en fazla bulunan maddeler; Benzene ve türevleri (%22,92), Limonene (%18,75), Napthalene ve türevleri (%12,89), tricylo (%4,90) olmuştur (Ek 1.1).
2- Atık lastik pirolizi destilasyon sonrası hafif numunesinde, en fazla bulunan maddeler; Benzene ve türevleri (%57,00), Tricylo (%11,03), Napthalene ve türevleri (%7,40), Indene (%7,07), olmuştur (Ek 1.2).
3- Atık lastik pirolizi destilasyon sonrası orta numunesinde, en fazla bulunan maddeler; Benzene ve türevleri (%28,32), Napthalene ve türevleri (%27,77), Indene (%18,10), Benzonitrile (%9,08), olmuştur (Ek 1.3).
4- Atık lastik pirolizi destilasyon sonrası aromatik numunesinde, en fazla bulunan maddeler; Napthalene ve türevleri (%26,12), Benzene ve türevleri (%8,02), Hexatriacontane (%7,74), Indene (%6,97), olmuştur (Ek 1.4).
5- Atık lastik pirolizi destilasyon sonrası ağır numunesinde, en fazla bulunan maddeler; Napthalene ve türevleri (%24,10), Fluoranthene (%11,41), Isopropyl (%8,38), Phenanthrene (%8,04), olmuştur (Ek 1.5).
6- Atık lastik pirolizi reaktör numunesinde, en fazla bulunan maddeler; Hexacontan (%24,33), Trimethylsilyl (%24,21), beta-Carotene (%14,62) olmuştur (Ek 1.6).

Yapılan deneysel çalışma sonucunda, yüksek sıcaklıklarda piroliz sıvı ürün verimi daha düşük, düşük sıcaklıklarda ise piroliz sıvı ürün verimi daha yüksektir. Düşük sıcaklıklarda organik bileşiklerin daha ileriye giden bir bozunmaya uğramadıklarından piroliz sıvı ürün verimi daha yüksek çıkmaktadır.

Destilasyon sonucu elde edilen 1. ürünün 0-180 $^{\circ}$C GC/MS analiz sonuçları karbon sayısına göre incelendiğinde genelde C_6 ile C_{10} arasında olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu hafif ürünün benzin (gasoline) yerine modifiye edilerek kullanılması muhtemeldir. 180-240 $^{\circ}$C arası elde edilen 2. ürün ise genelde C_{12}-C_{20} arasında olduğu ve bununda modifiye edildikten sonra dizel yakıt yerine kullanılabileceği görülmektedir. 240-360 $^{\circ}$C arası elde edilen 3. ürünün GC/MS analiz sonuçları incelendiğinde aromatik yapıların yüzdelerinin çok fazla olduğu gözlenmektedir. Genelde naftalin ve türevlerinin C_{12}-C_{21} ağırlıklı olarak yapıda bulunduğu tespit edilmiştir. 360 $^{\circ}$C sonrası elde edilen ve bitümün modifikasyonunda kullanılan 4. Ürün GC/MS analiz sonuçlarında ise orijinal bitüm de olduğu gibi kimyasal kompozisyonun karmaşık olduğu ve aromatik yapılar çoğunluktadır. Ayrıca reaktörde kalan katı ürünün GC/MS analiz sonuçlarına bakıldığında piyasaya N650 diye sunulan karbon siyahına benzediği gözlemlenmiştir.

4.1.2. Elementel analizler

Elementel analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, piroliz sonucu elde edilen saf (ana) ürünün C, H, N, S yüzdeleri sırasıyla %79,9970; %10,7600; %2,5366; %0,9355 olarak çıkmıştır.

Ham petrolün elementel analiz sonuçları ise ortalama %C=82,2-87,7; %H=11,7-14,7; %N=0,1-1,5; %S=0,1-5,5 olarak verilmektedir (URL 9). Elde edilen saf (ana) ürün ile ham petrolün elementel analiz değerlerinin uyum içerisinde oldukları söylenebilir.

Destilasyon sonucu elde edilen hafif ürünün (0-180 ^{o}C) C, H, N, S yüzdeleri sırasıyla %82,269; %10,767; %4,202; %0,880 olarak çıkmıştır. Yakıt olarak kullanılan benzinin (gasoline) elementel analiz sonuçları ise literatürde ortalama olarak %C= 84,21, %H= 15,79 verilmektedir. Elde edilen bu hafif ürün, benzin (gasoline) ile kıyaslandığında yakıt değeri olarak hemen hemen aynıdır. Azot ve sülfür giderimi yapıldıktan sonra yakıt olarak kullanılması muhtemeldir.

Destilasyon sonucu elde edilen orta ürünün (180-240 ^{o}C) C, H, N, S yüzdeleri sırasıyla %98,346; %13,269; %3,341; %0,955 olarak çıkmıştır. Yakıt olarak kullanılan

dizel yakıtın elementel analiz sonuçları ise literatürde ortalama olarak %C= 85,25; %H=13,6; %S=1,13 verilmektedir. Elde edilen bu orta ürün, dizel yakıt ile kıyaslandığında yakıt değeri olarak hemen hemen aynıdır. Hatta karbon yüzdesi daha fazladır. Bu ürünün de azot ve sülfür giderimi yapıldıktan sonra yakıt olarak kullanılması muhtemeldir.

Destilasyon sonucu elde edilen ağır ürünün (360 ^{o}C ve üzeri) C, H, N, S yüzdeleri sırasıyla %57,394; %7,414; %0; %1,096 olarak çıkmıştır. Bitümün elementel analiz sonuçları ise ortalama %C=82-88; %H=8-11; %S=1-6; %N=0-1; %O=0-1,5 olarak verilmektedir (Tunç, 2004).

Elde edilen bu ağır ürün, bitüm ile kıyaslandığında elementel analiz sonuçları örtüşmektedir. Karbon yüzdesi düşük çıkmasına rağmen sülfür, hidrojen ve nitrojen oranları yönünden orijinal bitüm ile uyum sağlamaktadır.

Bu ürün bitüm katkı maddelerinden Hidrokarbon kategorisine uyum sağladığı gözlenmektedir. Böylece, bitüme yumuşatma, gençleştirme özelliği kazandıracağı, adezyon ve soyulma mukavemetini artıracağı düşünülmektedir. Piroliz ve destilasyon deneyleri sonucunda elde edilen ürünlerin elementel analiz sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Piroliz ve destilasyon ürünlerinin elementel analiz ve ısıl değer sonuçları

Numune No	Numunenin Adı	Nitrogen %	Carbon %	Hydrogen %	Sulphur %
1	**Lastik hafif**	4,2018	82,2690	10,7670	0,8802
2	**Lastik orta**	3,3406	98,3460	13,2690	0,9548
3	**Lastik ağır**	0	57,3940	7,4143	1,0964
4	**Lastik saf (ana)**	2,5366	79,9970	10,7600	0,9356
5	**Lastik karbon siyahı**	0	43,8410	5,6647	1,9797
6	**Lastik aromatik yağ**	3,8567	89,0310	12,0420	1,0150

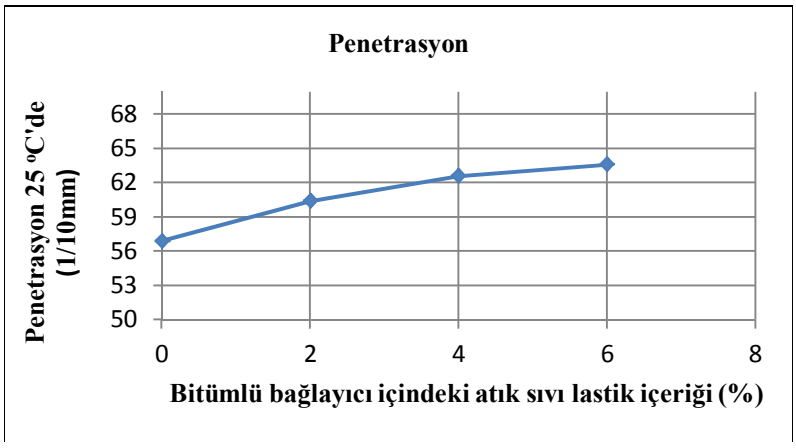
4.2. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Bu çalışmada, Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi (TÜPRAŞ) İzmit rafinerisi tarafından üretilmiş olan 50/70 penetrasyon sınıfı bitümlü bağlayıcı, Konya Selçuklu Belediyesi asfalt şantiyesinden temin edilmiştir. Kullanılan bitümlü bağlayıcının orijinal (katkısız) haldeki ve bitüm ağırlığının %2, %4 ve %6 oranlarında atık sıvı lastik içeren modifiye bitümlerin bazı fiziksel özellikleri geleneksel deneylerle tespit edilerek sonuçları aşağıda Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri

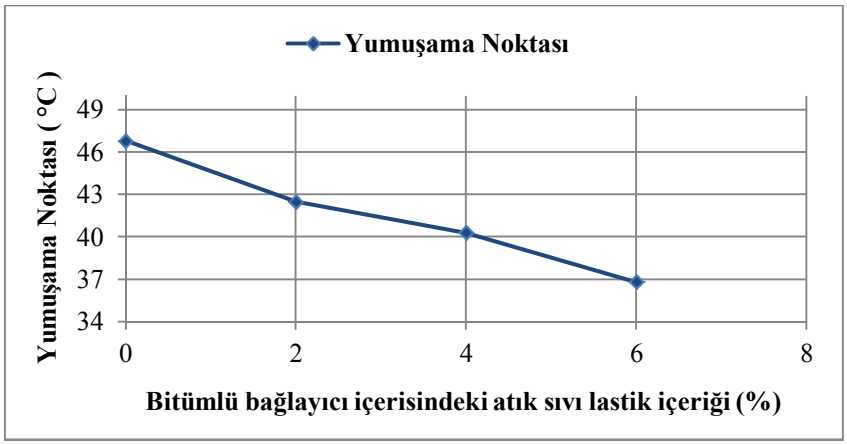
Özellikler	Standart	Deney sonuçları			
		% 0	% 2	%4	%6
Penetrasyon, (25 °C, 1/10 mm)	ASTM D5	56,9	60,4	62,6	63,6
Yumuşama Noktası, (°C)	ASTM D36	46,8	42,5	40,3	36,8
Düktilite, (25 °C, 5 cm/dk)	ASTM D113	>100	>100	>100	>100

Atık sıvı lastik katkısının bağlayıcının penetrasyon değerini artırdığı görülmektedir (Şekil 4.8.). Penetrasyon değerinin artması bitümün daha yumuşak bir kıvama gelmesini sağlayacaktır. Bu ise çok düşük sıcaklıklardaki uygulamalar için atık sıvı lastiğin katkı maddesi olarak kullanılabileceği, işleme kolaylığı getireceği, düşük sıcaklıklardaki çatlama ve kırılmaları önleyebileceği sonuçlarına ulaştıracaktır.



Şekil 4.8. Orijinal ve atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların penetrasyon değerleri

Atık sıvı lastik katkısının bağlayıcının yumuşama noktası değerini azalttığı görülmektedir (Şekil 4.9.). Yumuşama noktasının azalması yüksek sıcaklıklarda deformasyonu erken başlatacak gibi görünse de düşük sıcaklık deformasyonlarının azalacağı beklenmekte olup, çok düşük sıcaklıklardaki çatlama ve kırılmaların önlenebileceği düşünülmektedir. Atık sıvı lastik katkısı düktilite değerini artırmıştır. Bu ise bitümün bağlama yeteneğini artırdığı fakat ısıya karşı fazla duyarlılık gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.9. Orijinal ve atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri

4.2.1. Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deney sonuçları

Saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve yapım sırasındaki yaşlanmasını tespit etmek amacıyla bağlayıcılar, Karayolları Genel Müdürlüğü bitümlü bağlayıcılar laboratuvarında dönel ince film etüvü (RTFOT) deney cihazı kullanılarak yaşlandırılmıştır.

Saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcılar, 140 ^{o}C kadar ısıtılarak, 8 adet şişenin her birinin içine 0,001 gram hassasiyetle tartılarak 35±0,5 gram bitümlü bağlayıcı numunesi doldurulmuştur. Etüv kullanılmadan önce 16 saat süreyle uygulama sıcaklığı olan 163 °C kadar ısıtılıp, numune şişeleri yerleştirilip kapak kapatıldıktan sonra 10 dakika içerisinde bu sıcaklığa çıkacak şekilde termostat ayarlanmıştır. 163 ^{o}C'ye kadar ısıtılmış RTFOT etüvünün dönen tablası üzerine yerleştirilmiş numunelere tabla dakikada 15 devir yapacak ve dakikada 4000 ml hava üfleyecek şekilde 85 dakika süreyle döndürülerek deney yapılmıştır. Dönel ince film etüvü (RTFOT) deney cihazı ve şişelerin deney öncesi ve sonraki hali Şekil 4.10'da görülmektedir.

Deney sonunda, şişelerdeki numunelerin iki tanesi bağlayıcıların kütle kaybının tespiti için kullanılmış, diğer 6 numune ise başka bir kaba boşaltılarak, daha sonra basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ve dinamik kesme reometresi (DSR) performans deneylerinde kullanılmak üzere saklanmıştır.

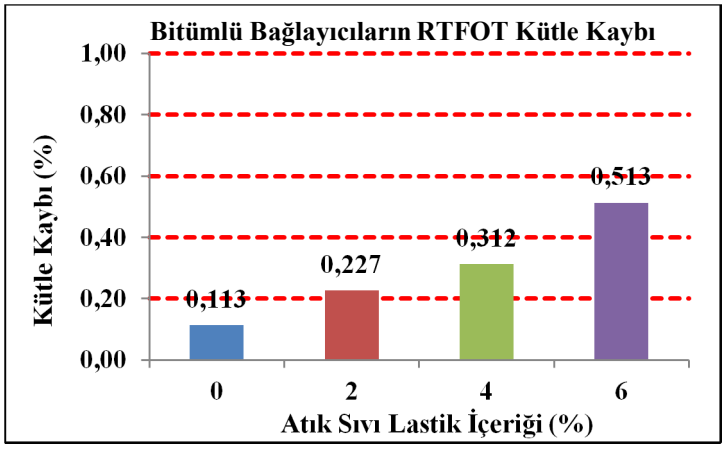


Şekil 4.10. RTFOT deney cihazı ve şişelerin deneyden önceki ve sonraki hali

Saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcılar, RTFOT deney sonrası kütle kayıpları Çizelge 4.4'de, bu bağlayıcılarda atık sıvı lastik katkı oranı değişimi ile kütle kaybı arasındaki ilişki ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların RTFOT kütle kaybı

Özellikler	Şartname Sınırı (%)	% 0 Saf Bitüm	% 2 Atık sıvı lastik ile modifiye edilen	% 4 Atık sıvı lastik ile modifiye edilen	% 6 Atık sıvı lastik ile modifiye edilen
İlk kütle, M_1 (gr)		35,22	35,17	35,24	35,03
Son Kütle, M_2 (gr)	maks. 1,0	35,18	35,09	35,13	34,85
Kütle Kaybı (%) $=100(M_1- M_2)/ M_1$		0,113	0,227	0,312	0,513



Şekil 4.11. Yaşlanma nedeniyle bağlayıcılarda meydana gelen kütle kayıpları

Superpave bağlayıcı şartnamesine göre test sınır değeri olarak, RTFOT için kütle kaybı %1'den fazla olmamalıdır. Saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü

bağlayıcıların yaşlanma sonrası kütle kayıpları şartnamenin öngördüğü sınırın altında kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, atık sıvı lastik ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların kütle kayıpları katkı oranının artmasına paralel olarak artış göstermektedir.

4.2.2. Dinamik kesme reometresi (DSR) deney sonuçları

50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların yüksek servis sıcaklıklarındaki reolojik özellikleri olan kompleks kayma modülü (G*) ve faz açısı (δ) belirlenerek, bağlayıcıların "G*/sin(δ)" tekerlek izi oluşumuna karşı göstereceği dirençler belirlenerek, şartname kriterleri ile kıyaslanmış ve uygunluğu araştırılmıştır. Çalışmada, Karayolları Genel Müdürlüğü bitümlü bağlayıcılar laboratuarında Şekil 4.12.'de görülen Bohlin DSR II dinamik kesme reometresi kullanılmıştır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki özelliklerinin tespiti için yaşlandırılmamış (orijinal), RTFOT ile yaşlandırılmış ve RTFOT+PAV ile yaşlandırılmış numuneler 2 farklı deney sıcaklığında (58, 64 ^{o}C) yapılmıştır. Bitümlü bağlayıcılar 140 ^{o}C ısıtılarak Şekil 4.13'de görüldüğü gibi silikon kalıba doldurularak soğumaya bırakılmış ve soğuyan numuneler, deney sıcaklığına getirilmiş cihazının üst plakasına yerleştirilerek alt ve üst plakalar deney konumuna getirilmiştir. Yaşlandırılmamış, RTFOT ile yaşlandırılmış ve RTFOT+PAV ile yaşlandırılmış numuneler için 1000 mikron (1 mm) aralık ve 25 mm çaplı plakalar kullanılmıştır.



Şekil 4.12. Bohlin DSR II dinamik kesme reometresi



Şekil 4.13. Numunenin silikon kalıba doldurulması ve numune örnekleri

Deneye hazır hale getirilen numuneler, su banyosu yardımıyla 0,1 ^{o}C hassasiyetle deney sıcaklığına (58, 64 ^{o}C) getirilerek ısı dengesinin sağlanması için 10 dakika bekletilmiştir. Daha sonra salınım hızı 10 radyan/saniyelik frekansta, yaşlandırılmamış (orijinal) numuneler için 120 Pa, yaşlandırılmış numuneler için 220 Pa gerilme uygulanarak 10 devirlik bir ön koşullandırma yapılmıştır. 10 devirlik ön koşullandırma işleminden sonra 10 ilave devir daha yapılarak deney verileri kompleks kayma modülü (G*) ve faz açısı (δ) değerleri elde edilmiştir.

Deney sonucunda, saf bitüm ve atık sıvı lastik katkılı %2, %4, %6 içeriklerindeki modifiye bitümlü bağlayıcıların yaşlandırılmadan önce ve sonra farklı sıcaklıklardaki DSR deney sonuçları Çizelge 4.5. - 4.7'de verilerek şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, yaşlandırılmamış (orijinal), RTFOT ile yaşlandırılmış ve RTFOT+PAV ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcıların "G*/sin δ" tekerlek izi oluşumuna karşı göstereceği direnç tespit edilerek, bu bağlayıcıların yüksek servis sıcaklıklarındaki performans dereceleri belirlenmiştir.

Çizelge 4.5. Saf ve katkılı bitümlü bağlayıcıların, orijinal (G*/sin δ ≥1kPa) Dinamik Kesme Reometresi (DSR) sonuçları

	Saf bitüm		
Sıcaklık/Özellik	**G*, (Pa),**	**δ, (°),**	**G* / sin(δ), (kPa),**
58 °C (Orijinal)	2,2072E+03	86,93	2,21040
64 °C (Orijinal)	9,3434E+02	87,89	0,93497
	% 2 atık sıvı lastik katkılı		
Sıcaklık/Özellik	**G*, (Pa),**	**δ, (°),**	**G* / sin(δ), (kPa),**
58 °C (Orijinal)	1,9268E+03	87,26	1,92900
64 °C (Orijinal)	8,3891E+02	88,20	0,83932
	% 4 atık sıvı lastik katkılı		
Sıcaklık/Özellik	**G*, (Pa),**	**δ, (°),**	**G* / sin(δ), (kPa),**
58 °C (Orijinal)	1,2826E+03	87,62	1,28370
64 °C (Orijinal)	5,6948E+02	88,45	0,56969
	% 6 atık sıvı lastik katkılı		
Sıcaklık/Özellik	**G*, (Pa),**	**δ, (°),**	**G* / sin(δ), (kPa),**
58 °C (Orijinal)	1,1379E+03	87,72	1,13880
64 °C (Orijinal)	5,1725E+02	88,43	0,51745

Çizelge 4.6. Saf ve katkılı bitümlü bağlayıcıların, yaşlandırılmış (G*/sin δ ≥ 2,2kPa) Dinamik Kesme Reometresi (DSR) sonuçları

	Saf bitüm		
Sıcaklık/Özellik	**(G*), (Pa),**	**(δ), (°),**	**G* / sin(δ), (kPa),**
58 °C Yaşlandırılmış	4,8941E+03	83,99	4,9212
64 °C Yaşlandırılmış	2,0183E+03	85,77	2,0238
	% 2 atık sıvı lastik katkılı		
Sıcaklık/Özellik	**(G*), (Pa),**	**(δ), (°),**	**G* / sin(δ), (kPa),**
58 °C Yaşlandırılmış	4,1085E+03	85,13	4,1233
64 °C Yaşlandırılmış	1,7300E+03	86,60	1,7331
	% 4 atık sıvı lastik katkılı		
Sıcaklık/Özellik	**(G*), (Pa),**	**(δ), (°),**	**G* / sin(δ), (kPa),**
58 °C Yaşlandırılmış	2,6795E+03	85,25	2,6887
64 °C Yaşlandırılmış	1,1611E+03	85,25	1,1630
	% 6 atık sıvı lastik katkılı		
Sıcaklık/Özellik	**(G*), (Pa),**	**(δ), (°),**	**G* / sin(δ), (kPa),**
58 °C Yaşlandırılmış	3,0517E+03	85,74	3,0602
64 °C Yaşlandırılmış	1,3283E+03	87,13	1,3299

Çizelge 4.7. Saf ve katkılı bitümlü bağlayıcıların, RTFOT+PAV yaşlandırılmış (G*.sin δ ≤5000 kPa) Dinamik Kesme Reometresi (DSR) sonuçları

	Saf bitüm		
Sıcaklık/Özellik	**(G*), Pa,**	**(δ), (°),**	**G* . sin(δ), (kPa),**
25 °C			
RTFOT+PAV Yaşlandırılmış	5,7071E06	53,50	4587,90
22 °C			
RTFOT+PAV Yaşlandırılmış	8,9903E+06	50,07	6894,00
	% 2 atık sıvı lastik katkılı		
Sıcaklık/Özellik	**(G*), Pa,**	**(δ), (°),**	**G* . sin(δ), (kPa),**
25 °C			
RTFOT+PAV Yaşlandırılmış	-	-	-
22 °C			
RTFOT+PAV Yaşlandırılmış	-	-	-
	% 4 atık sıvı lastik katkılı		
Sıcaklık/Özellik	**(G*), Pa,**	**(δ), (°),**	**G* . sin(δ), (kPa),**
25 °C			
RTFOT+PAV Yaşlandırılmış	-	-	-
22 °C			
RTFOT+PAV Yaşlandırılmış	-	-	-
	% 6 atık sıvı lastik katkılı		
Sıcaklık/Özellik	**(G*), Pa,**	**(δ), (°),**	**G* . sin(δ),**
25 °C			
RTFOT+PAV Yaşlandırılmış	-	-	-
22 °C			
RTFOT+PAV Yaşlandırılmış	-	-	-

Bitümlerin yüksek sıcaklıklarda tekerlek izinde oturma şeklinde bozulmalara karşı dayanımı bitüm performans şartnamesinde DSR deneyi ile tespit edilen G*/sinδ değerine bağlanmıştır. Bu değerin orijinal bitümlerde 1,0 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bitümlerde ise 2,2 kPa'dan büyük olması istenmektedir.

Bitümlerin orta sıcaklıklardaki performansı yorulmaya karşı direncine bağlıdır. Superpave bağlayıcı şartnamesinde bunun için RTFOT ve PAV deneyleri ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcıların DSR deneyi ile bulunan kompleks modülünün ordinatındaki viskoz kısmını temsil eden G*.sinδ değerinin maksimum 5000 kPa olması şartı bulunmaktadır. Bu değerin üzerinde bulunan bitümlü bağlayıcılar yorulma davranışı için aşırı sert kabul edilmekte ve yorulma çatlaklarına karşı daha az direnç göstermektedir.

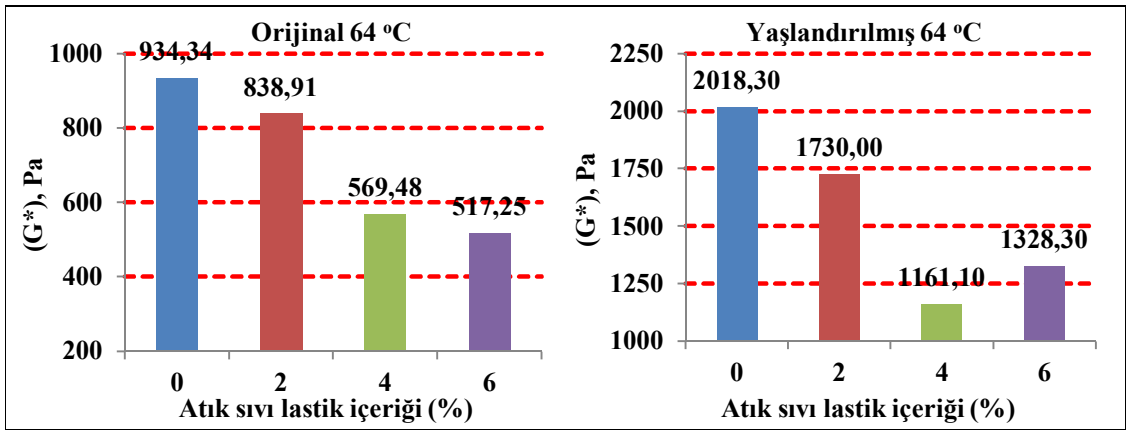
Dinamik Kesme Reometresi (DSR) deneyi sonuçları, Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.6. incelendiğinde; saf ve katkılı bitüm bağlayıcıların, orijinal ve RTFOT yaşlandırılmış numunelerin 58°C sıcaklıkta (G*/sinδ) şartname kriterini sağlayabildiği bu değerlerin üstündeki sıcaklıklarda ise sağlayamadıkları belirlenmiştir. Saf ve katkılı

bitüm bağlayıcılarının, kaplamanın inşaatından sonraki yüksek sıcaklık performans derecesinin PG 58–Y olduğu tespit edilmiştir.

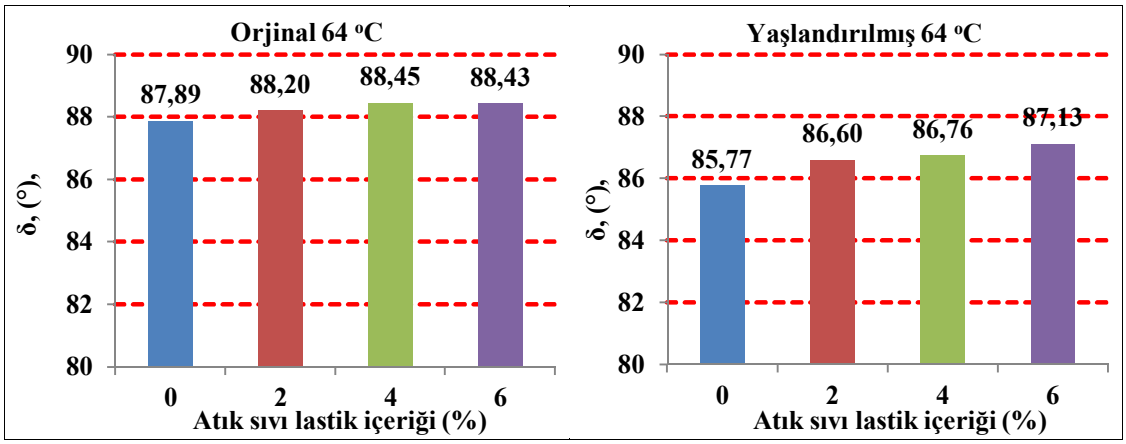
Çizelge 4.7'de verilen RTFOT+PAV yaşlandırılmış numunelerinin dinamik kesme reometresi (DSR) sonuçları incelendiğinde, saf bitümlü bağlayıcıların, 25 ºC G*.sin δ ≤5000 kPa şartını sağladığı, 22 ºC ise sağlamadığı görülmüştür.

Katkılı bitümlü bağlayıcıların ise Çizelge 4.7'de verilen RTFOT+PAV yaşlandırılmış numunelerinin dinamik kesme reometresi (DSR) sonuçları incelendiğinde G*.sin δ ≤5000 kPa şartını sağlamadıkları görülmüştür.

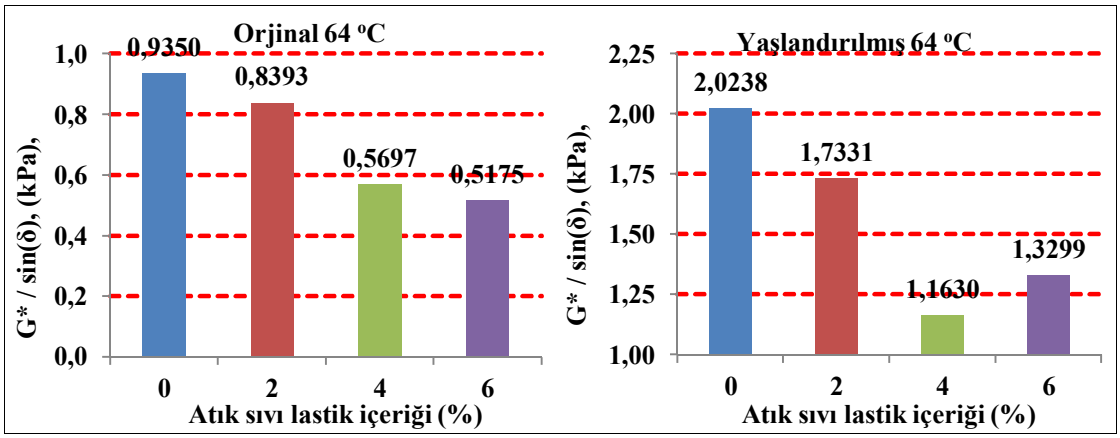
64 °C sıcaklıkta yaşlandırma işleminden önce ve sonra artan atık sıvı lastik içeriğiyle kompleks kayma modülünün (G*) değişimi Şekil 4.14.'de, faz açısının (δ) değişimi Şekil 4.15'de ve tekerlek izi dayanım parametresi olan G*/sin(δ) değerinin değişimi ise Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.14. 64 °C orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcıların atık sıvı lastik içeriği - G* değişimi



Şekil 4.15. 64 °C orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcıların atık sıvı lastik içeriği - δ değişimi



Şekil 4.16. 64°C orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcıların atık sıvı lastik içeriği - G*/sin(δ)değişimi

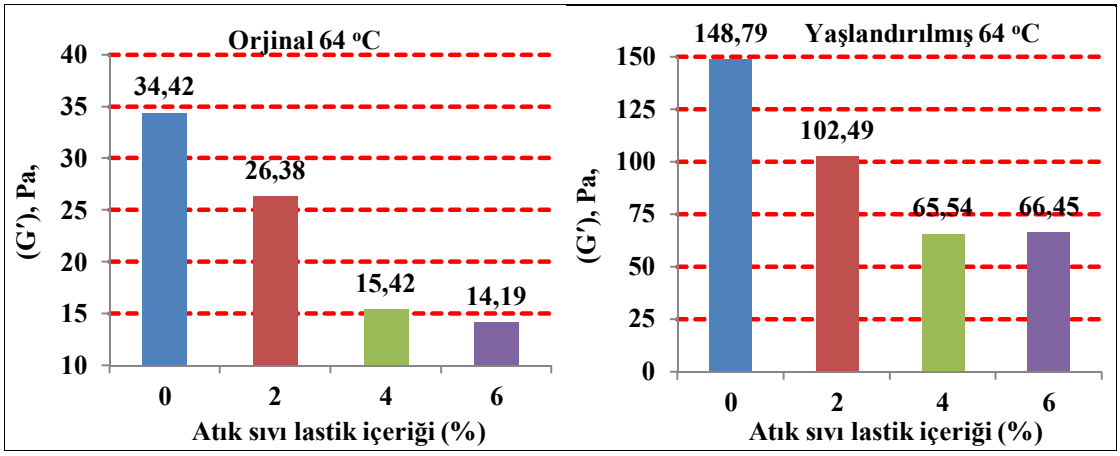
Elde edilen sonuçlardan bitümlü bağlayıcılardaki atık sıvı lastik oranı artıkça G* ve G*/sin(δ) değerinin azaldığı faz açısının (δ) ise artığı belirlenmiştir. DSR deneyleri 25 mm plaklar kullanılarak 1 mm kalınlığında yaşlandırılmamış (orijinal) numuneler için 120 Pa, yaşlandırılmış numuneler için 220 Pa gerilme uygulanarak, 10 radyan/saniyelik frekansta yapılmıştır. Artan atık sıvı lastik içeriğine karşı G*/sin(δ) değerindeki azalma ve faz açısındaki (δ) artış ile bitümlü bağlayıcılardaki atık sıvı lastik içeriği artıkça tekerlek izine karşı dayanımın azaldığını görülmektedir.

Yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılarda kayma modülü (G*), atık sıvı lastik oranı % 4'e kadar azalırken, atık sıvı lastik oranı % 6 olunca %14,4'lik bir artış göstermiş olması malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulması durumunda deformasyonlara karşı yeniden bir direnç göstereceği anlamına gelmektedir.

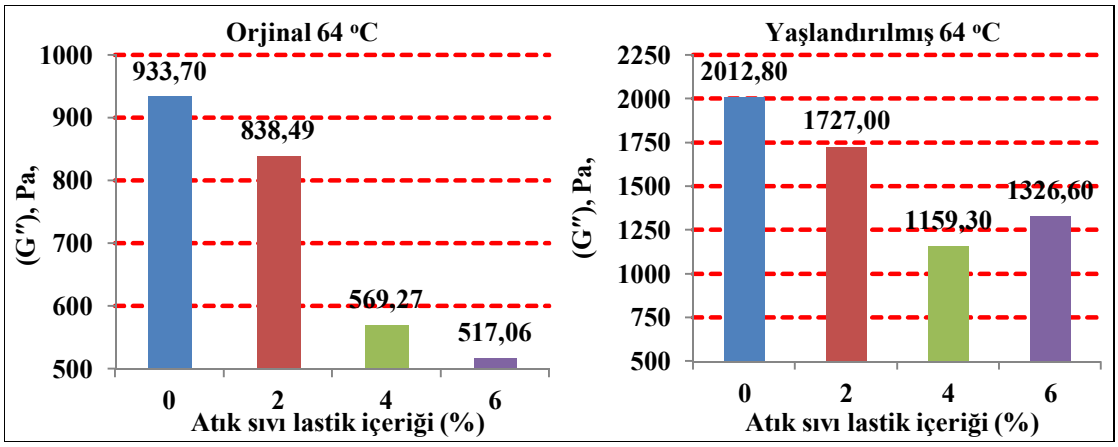
Faz açısı (δ) ise viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının bir göstergesidir. Faz açısındaki (δ) azalma malzemenin daha fazla elastik özellik göstereceğini, artma ise malzemenin viskoz özellik göstereceğini ifade etmektedir. Bağlayıcılardaki atık sıvı lastik içeriğinin artması sonucu orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcılarda faz açısı değeri düşmüştür. Dolayısıyla atık sıvı lastik katkısı bağlayıcıların elastikiyetini azaltırken, viskoz özelliğini artırmıştır.

Soğuk iklim koşullarında ya da hızlı hareket eden trafik yükleri altında asfalt çimentosu elastik katı bir davranış gösterip, kırılabilir veya çatlayabilir. Bağlayıcılardaki atık sıvı lastik içeriği düşük ısı nedeniyle kaplama yüzeyinin büzülmeye çalışmasının ortaya çıkardığı gerilmelerden kaynaklanan bozulmaları olumlu yönde etkileyeceği söylenebilir.

64 °C sıcaklıkta yaşlandırma işleminden önce ve sonra artan atık sıvı lastik içeriğiyle depolama modülünün (G′) değişimi Şekil 4.17'de, kayıp kayma modülün (G″) değişimi Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.17. 64 °C orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcıların atık sıvı lastik içeriği - G′ değişimi



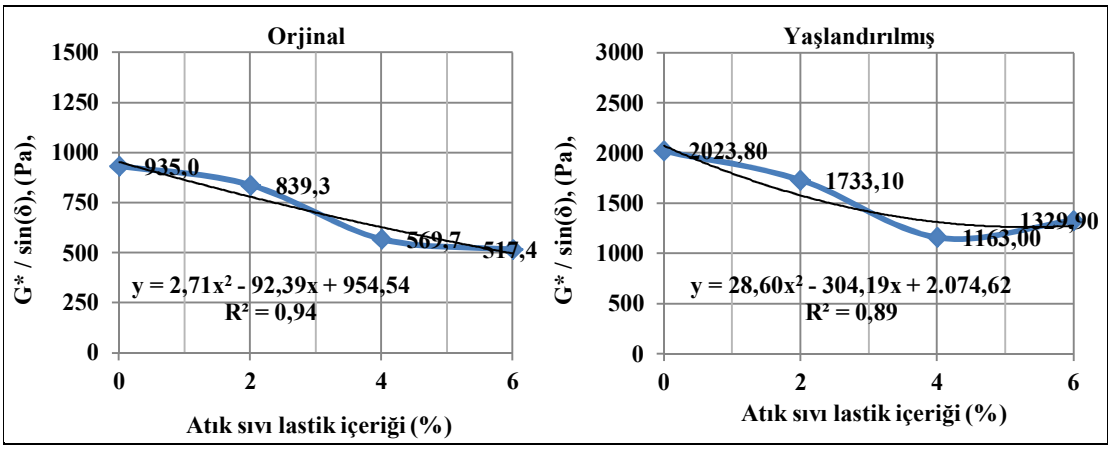
Şekil 4.18. 64 °C orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcıların atık sıvı lastik içeriği - G″ değişimi

Kompleks kayma modülü; kayıp modül (viskoz modül, G″) ve depolama modülü (elastik modül, G′) bileşenlerinden oluşmaktadır. Elastik bileşeni ifade eden depolama modülü her bir yükleme devri boyunca numunede saklanan enerji miktarını göstermektedir. Viskoz bileşeni ifade eden kayıp modül ise her bir yükleme devri boyunca numunedeki kayıp enerji miktarını göstermektedir.

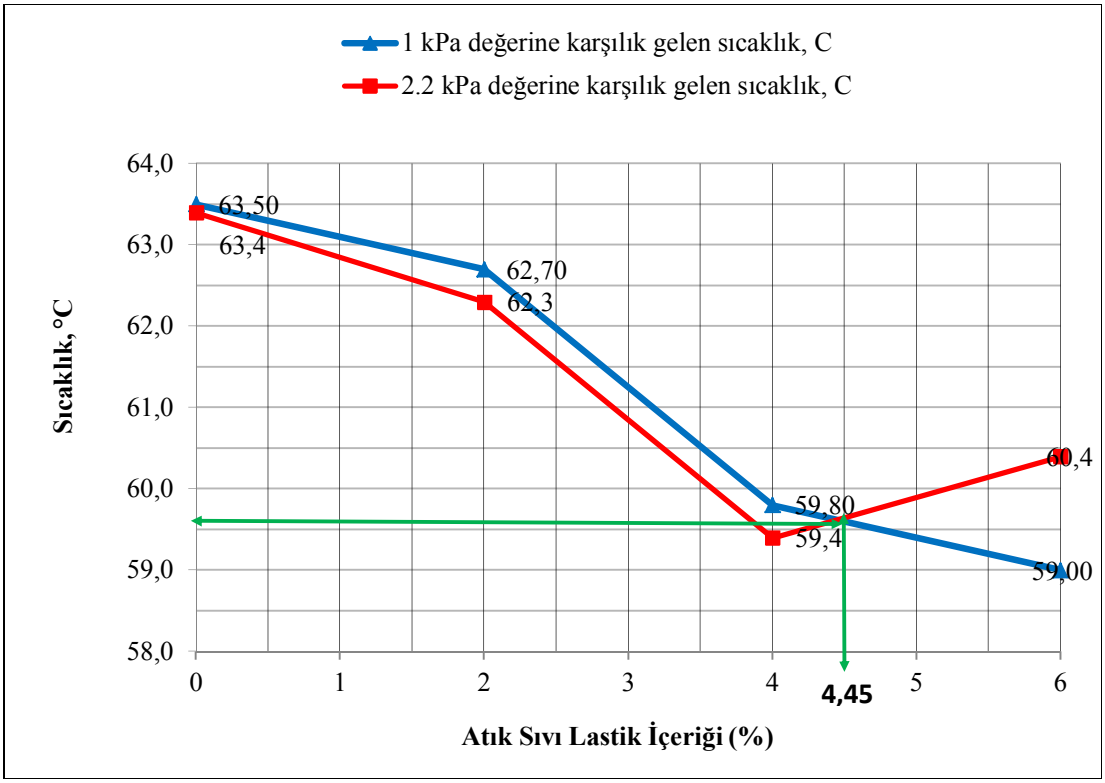
Elde edilen sonuçlardan orijinal bitümlü bağlayıcılardaki atık sıvı lastik oranı artıkça G′ ve G″ değerinin azaldığı belirlenmiştir. Yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılarda depolama modülü (G′) ve kayıp modül (G″) atık sıvı lastik oranı % 4'e kadar azalırken, atık sıvı lastik oranı % 6 olunca sırasıyla % 1,4 ve % 14,4'lik bir artış göstermiş olması

malzemenin düşük sıcaklıklarda asfalt bağlayıcıda, oluşan deformasyonlara karşı bir direnç göstereceği ve malzemenin viskoelastik bir davranış sergileyeceği anlamına gelmektedir.

Orijinal ve yaşlandırılmış modifiye bağlayıcıların 64 °C sıcaklıktaki tekerlek izi parametresinin G*/sin(δ), atık sıvı lastik içeriği yüzdesi ile ilişkisi Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Orijinal ve Yaşlandırılmış modifiye bağlayıcıların 64 °C'deki atık sıvı lastik içeriği-G*/sin(δ) ilişkisi



Şekil 4.20. Orjinal ve yaşlandırılmış bağlayıcıların G*/sin(δ) sınırındaki sıcaklık değerlerinin değişimi

Şekil 4.20'deki grafikten bitüme % 4,45 oranında atık sıvı lastik ilave edildiği noktada yaşlanmanın en az olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarından elde edilen veriler ışığında, atık sıvı lastik katkılı karışımın, RTFOT yaşlandırması sonrasında katkısız malzemeye göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Böylece bitüm içerisindeki atık sıvı lastik katkı miktarı artıkça yaşlanma etkileri azalmakta, atık sıvı lastik katkısı bitümlü bağlayıcıyı gençleştirmektedir.

4.2.3. Kiriş eğilme reometresi (BBR) deney sonuçları

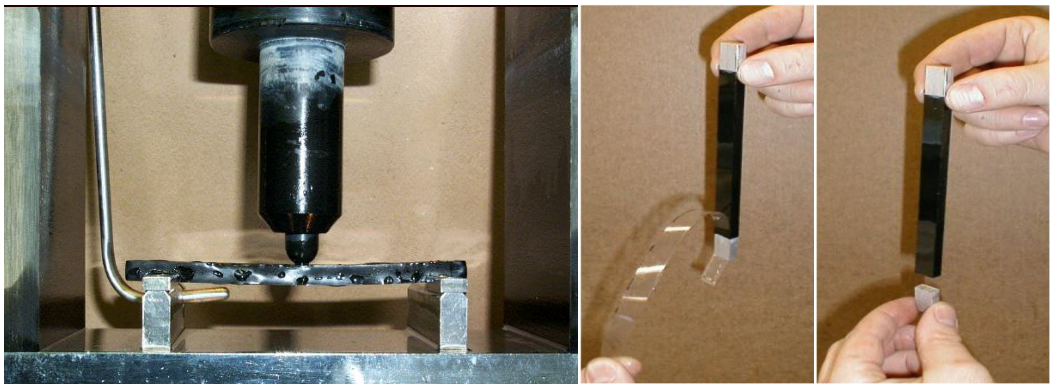
Superpave sisteminde bulunan kiriş eğilme reometresi (BBR) deneyi, bağlayıcıların soğuk havalarda düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dayanımlarını ve bağlayıcının performans seviyesi değerlerini tespit etmek için uygulanan bir deneydir. Superpave yönteminde düşük ısı çatlakları bağlayıcıların servis ömürleri boyunca meydana geldiğinden, bitümlü bağlayıcılar önce RTFOT deney yöntemi ile kısa süreli yaşlandırıldıktan sonra PAV deneyi ile uzun süreli yaşlandırılarak deneye tabi tutulmaktadır.

Deneyde ilk olarak saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların, düşük servis sıcaklığı olan -22 °C'deki performans özelliklerini sağlayıp sağlamadığının tespiti için RTFOT+PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcı, -22 °C'de ve bir düşük sıcaklık derecesi olan -28 °C'de BBR deneyine tabi tutulmuştur. Bağlayıcıların sünme sertliği (s) ve sünme oranı (m-değer) değerleri elde edilerek, bağlayıcının düşük servis sıcaklıklarında termal çatlaklara karşı gösterdiği direnç tespit edilmiştir.

Bağlayıcıların yüke bağlı olmayan, ancak iklim ve çevre şartlarından kaynaklanan düşük sıcaklıklardaki davranışlarının gözlenmesi amacıyla, saf ve atık sıvı lastik katkılı bağlayıcılar, Karayolları Genel Müdürlüğü, bitümlü bağlayıcılar laboratuarında, Şekil 4.21'de görülen kiriş eğme reometresi (BBR) cihazı kullanılarak deneye tabi tutulmuştur. Saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilmiş ve yaşlandırılmış olan bitümlü bağlayıcılar 140 °C ısıtılarak Şekil 4.22'de görüldüğü gibi alüminyum kalıplara doldurulmuştur. Soğuyan numuneler, kalıplardan çıkartılarak BBR aletinin sıvı banyosunda 60 dakika deney sıcaklığında (-22 ve -28 °C) koşullandırılmıştır.



Şekil 4.21. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti



Şekil 4.22. BBR deneyi ve deney numuneleri

Deney için asfalt kiriş numunesi cihazın mesnetleri arasına yerleştirilerek deney başlatılmış ve toplam 240 saniye süreyle kirişe 980±5 mN (100±5 gr) yük uygulanmıştır. Deney esnasında uygulanan 980 mN'luk yükün etkisiyle kirişte meydana gelen defleksiyon, zamana bağlı olarak bilgisayar tarafından grafik halinde çizilmiştir. Ayrıca, sistem yazılımı tarafından 240 saniye sonunda deney yükü otomatik olarak kaldırılmış ve sünme sertliği ile sünme oranı hesaplanmıştır.

Deney sonucunda, saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların 60 saniye sonra elde edilen, -22 °C ve -28 °C'deki eğilme-sünme rijitliği tayini (BBR), deney sonuçları Çizelge 4.8. ve Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.8. Saf ve %2 atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların (BBR) sonuçları

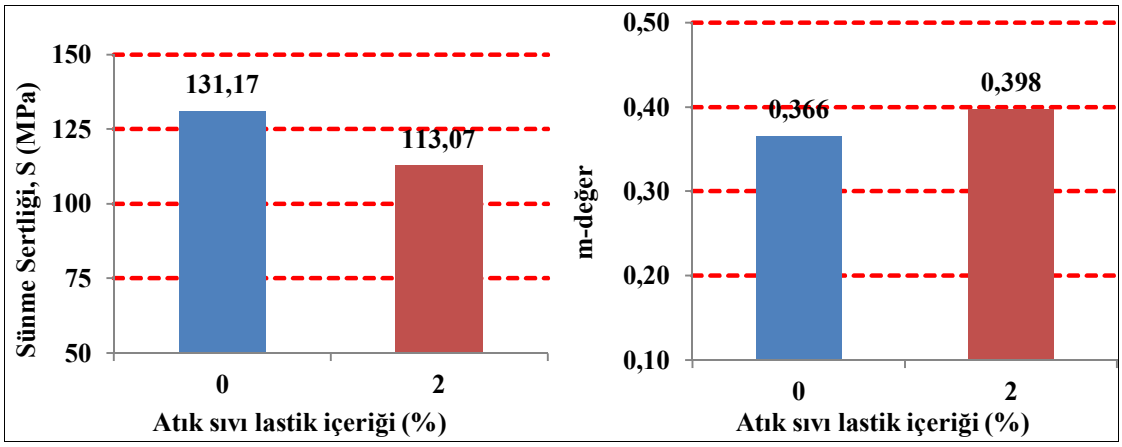
Bağlayıcı	Numune	-22 (-12)				
		Zaman, t (sn)	Kuvvet, P (mN)	Sehim, d (mm)	Sünme Sertliği, S (MPa)	m-değer
Saf bitüm	1	60	1029	0,499	166	0,336
	2	120	1020	0,640	129	0,366
	3	240	1029	0,842	98,5	0,397
	Ortalama			0,660	131,17	0,366
Bağlayıcı	Numune	-22 (-12)				
		Zaman, t (sn)	Kuvvet, P (mN)	Sehim, d (mm)	Sünme Sertliği, S (MPa)	m-değer
% 2 atık sıvı lastik	1	60	1015	0,565	145	0,365
	2	120	1012	0,736	111	0,398
	3	240	1012	0,981	83,2	0,432
	Ortalama			0,761	113,07	0,398

Çizelge 4.9. %4 ve %6 atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların (BBR) sonuçları

Bağlayıcı	Numune	-28 (-18)				
		Zaman, t (sn)	Kuvvet, P (mN)	Sehim, d (mm)	Sünme Sertliği, S (MPa)	m-değer
% 4 atık sıvı lastik	1	60	1015	0,294	278	0,308
	2	120	1015	0,368	222	0,334
	3	240	1016	0,470	174	0,361
	Ortalama			0,377	224,67	0,334
Bağlayıcı	Numune	-28 (-18)				
		Zaman, t (sn)	Kuvvet, P (mN)	Sehim, d (mm)	Sünme Sertliği, S (MPa)	m-değer
% 6 atık sıvı lastik	1	60	1012	0,310	263	0,314
	2	120	1013	0,390	209	0,340
	3	240	1014	0,499	164	0,366
	Ortalama			0,399	212,00	0,340

m-değeri, bağlayıcı maddenin gevşeme yetkinliği için bir ölçüdür. Bununla birlikte yüksek bir m-değeri, çok düşük sıcaklıklardaki gerilimleri azaltmak için malzemenin konumunda ne kadar iyi olduğunun göstergesidir. Sünme sertliği (s) ne kadar düşük olursa, m-değeri ne kadar yüksek olursa, bağlayıcı maddenin düşük sıcaklık tutumu o kadar uygun olduğu anlaşılır.

Katkısız ve %2 atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı numunelerinin, -22 °C sıcaklıklığındaki BBR deneyinden elde edilen ortalama sünme sertiği (s) ve ortalama m-değerlerinin atık sıvı lastik katkı miktarına bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 4.23'de gösterilmiştir.

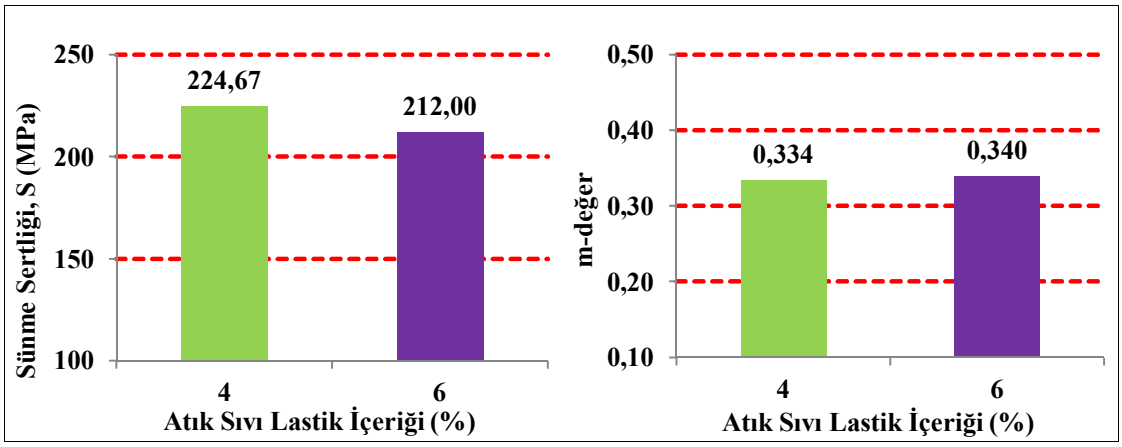


Şekil 4.23. Saf ve %2 atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların, sünme sertliği (S) ve m-değerleri

Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) deneyi sonuçlarına göre, Şekil 4.23.'deki grafik incelendiğinde; saf bitüm bağlayıcısının -22 ^{o}C'deki sünme sertliği değerinin 131,17 MPa ile şartname limiti olan maksimum 300 MPa değerini ve aynı sıcaklıktaki m-değer'in ise 0,366 değeri ile minimum 0,300 şartname limitini sağlamıştır. Saf bitümlü bağlayıcının kaplamanın inşaatından sonraki düşük sıcaklık performans derecesinin PG X–22 olduğu görülmektedir. Saf bitümlü bağlayıcının yüksek ve düşük sıcaklık performans dereceleri birlikte değerlendirildiğinde PG 58–22 performans derecesini sağladığı görülmektedir.

Şekil 4.23.'deki veriler göz önüne alındığında % 2 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitümlü bağlayıcının -22 ^{o}C'deki sünme sertliği değerinin 113,07 MPa ile şartname limiti olan maksimum 300 MPa değerini ve aynı sıcaklıktaki m-değer'in ise 0,398 değeri ile minimum 0,300 şartname limitini sağlamıştır. % 2 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitümlü bağlayıcısının -22 ^{o}C düşük sıcaklıkta limit değerleri sağladığı, dolayısıyla yüksek ve düşük sıcaklık performans dereceleri birlikte değerlendirildiğinde PG 58–22 performans derecesini sağladığı görülmektedir.

Saf ve %2 atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların Şekil 4.23'deki m-değerleri ve sünme sertliği (s) birlikte değerlendirildiğinde, %2 atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların, saf bitüme göre, sünme sertliği (s) %14 daha az ve m-değeri %9 daha fazla çıkmıştır. Böylece, %2 atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklık tutumunun saf bitüme göre daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 4.24. %4 ve %6 atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların, sünme sertliği (S) ve m-değerleri

Şekil 4.24'deki veriler göz önüne alındığında % 4 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitümlü bağlayıcının -28 ^{o}C'deki sünme sertliği değerinin 224,67 MPa ile şartname limiti olan maksimum 300 MPa değerini ve aynı sıcaklıktaki m-değer'in ise 0,334 değeri ile minimum 0,300 şartname limitini sağlamıştır. % 4 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitümlü bağlayıcısının -28 ^{o}C düşük sıcaklıkta limit değerleri sağladığı, dolayısıyla yüksek ve düşük sıcaklık performans dereceleri birlikte değerlendirildiğinde PG 58–28 performans derecesini sağladığı görülmektedir.

Benzer şekilde Şekil 4.24'deki grafik incelendiğinde % 6 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitümlü bağlayıcının -28 ^{o}C'deki sünme sertliği değerinin 212 MPa ile şartname limiti olan maksimum 300 MPa değerini ve aynı sıcaklıktaki m-değer'in ise 0,340 değeri ile minimum 0,300 şartname limitini sağlamıştır. % 6 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitümlü bağlayıcısının -28 ^{o}C düşük sıcaklıkta limit değerleri sağladığı, dolayısıyla yüksek ve düşük sıcaklık performans dereceleri birlikte değerlendirildiğinde PG 58–28 performans derecesini sağladığı görülmektedir.

Kiriş eğme reometresi (BBR) deney sonuçlarına göre; saf ve %2 atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcının, düşük sıcaklık performans derecesinin –22 ^{o}C olduğu, %4 ve %6 atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcılarda ise düşük sıcaklık performans derecesinin bir sınıf yükselerek –28 ^{o}C olduğu tespit edilmiştir. Katkılı bitümlü bağlayıcıların, çok düşük sıcaklıklarda kaplamanın yavaş yavaş maruz kaldığı termal gerilmelerine karşı direnç göstereceği ve düşük sıcaklık tutumunun daha iyi olduğu görülmüştür.

4.2.4. Dönel viskozimetre (RV) deney sonuçları

Dönel viskozimetre deneyi, yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılar üzerinde uygulanan ve karışım tasarımında bağlayıcıların, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, saf ve bu bağlayıcıya belirli oranlarda atık sıvı lastik katılarak elde edilmiş olan modifiye bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir.

Çalışmada, saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri, Karayolları Genel Müdürlüğü, bitümlü bağlayıcılar laboratuarında Şekil 4.25'de görülen DV-III Ultra Brookfield viskozimetresi kullanılarak belirlenmiştir. Deneye tabi tutulacak bağlayıcılar 140°C ısıtılarak viskozimetre kabına yaklaşık 10 gr olacak şekilde dökülmüş ve kap viskozimetreye yerleştirilmiştir. Deney sıcaklığına gelen viskozimetre sıfırlandıktan sonra, silindirik 27 numaralı mil cihaza takılarak dönme hızı 20 devir/dakika (20 rpm.) hıza ayarlanmış ve deney başlatılmıştır. Saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların birer dakika aralıklarla üç okuma değerinin ortalaması alınarak deney sonuçları kaydedilmiş ve sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

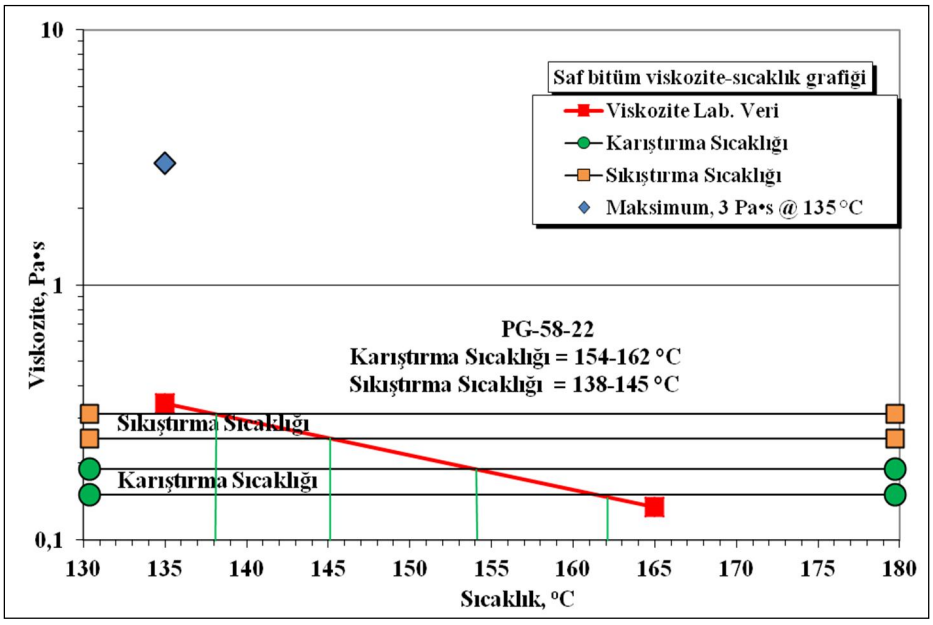


Şekil 4.25. Brookfield DV-III ultra dönel viskozimetresi

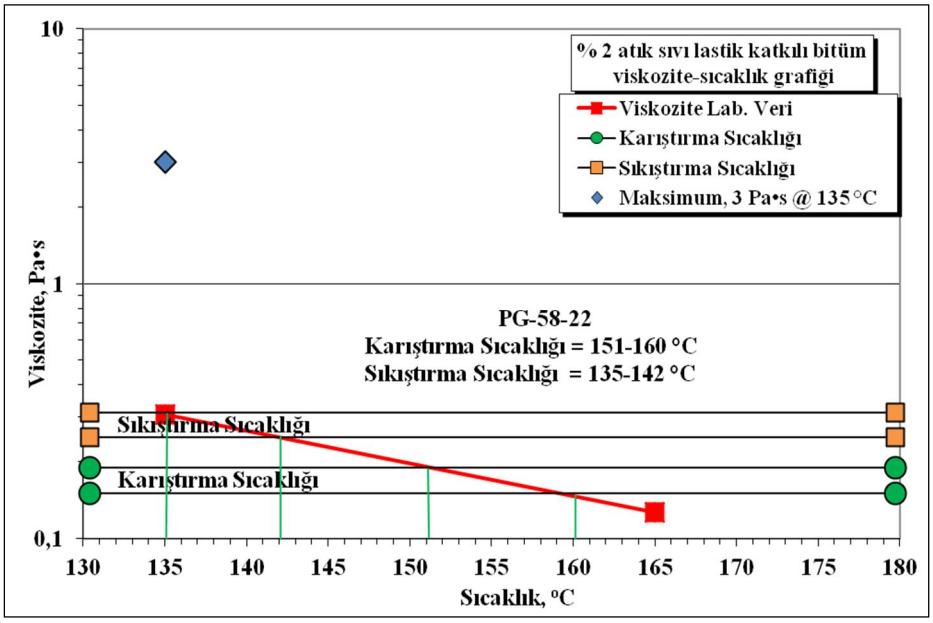
Çizelge 4.10. Saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların Brookfield Viskozite, cP deney sonuçları

Bağlayıcı	Viskozite, cP	
	135 °C	165 °C
Saf bitüm	342	135
% 2 Atık sıvı lastik	305	127
% 4 Atık sıvı lastik	265	117
% 6 Atık sıvı lastik	240	116

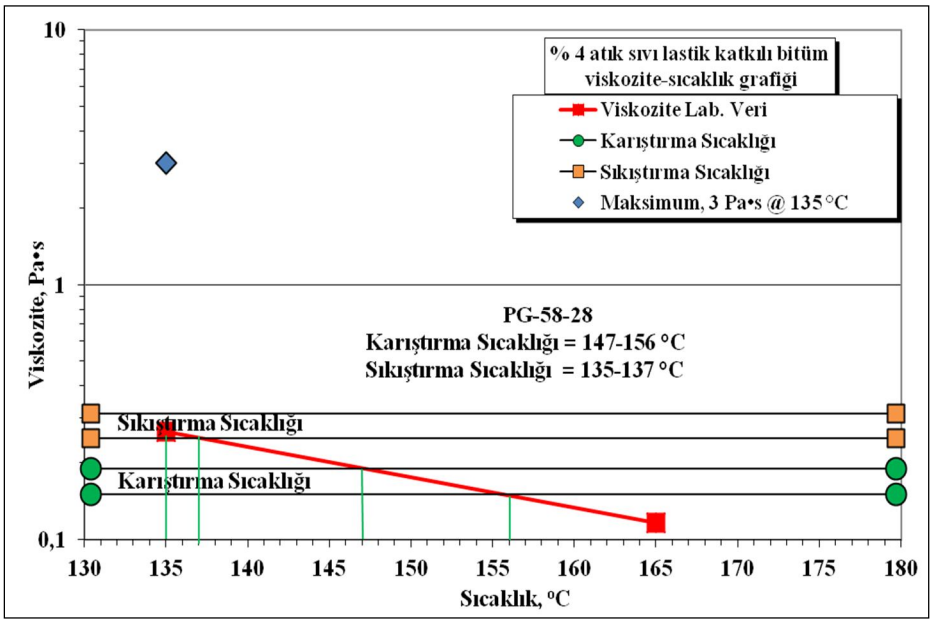
Superpave yönteminde, bağlayıcıların sıcak karışımda kullanılması durumunda, karıştırma için 170±20 cP ve sıkıştırma için 280±30 cP viskozite değerleri kullanılmaktadır. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık aralıklarını belirleyebilmek amacıyla, iki farklı sıcaklıkta (135°C ve 165°C) yapılan viskozite deneylerinden elde edilen viskozite değerleri yardımıyla çizilen viskozite-sıcaklık grafiğinden faydalanılmıştır. Saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların karıştırma (170±20 cP) ve sıkıştırma (280±30 cP) viskozite değerlerinin viskozite-sıcaklık grafiğini kestiği aralıklar belirlenerek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları bulunmuştur. Saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafikleri Şekil 4.26.-4.29'da gösterilmiştir. Bu bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, bu grafiklerden faydalanılarak tespit edilmiş ve Çizelge 4.11'de verilmiştir.



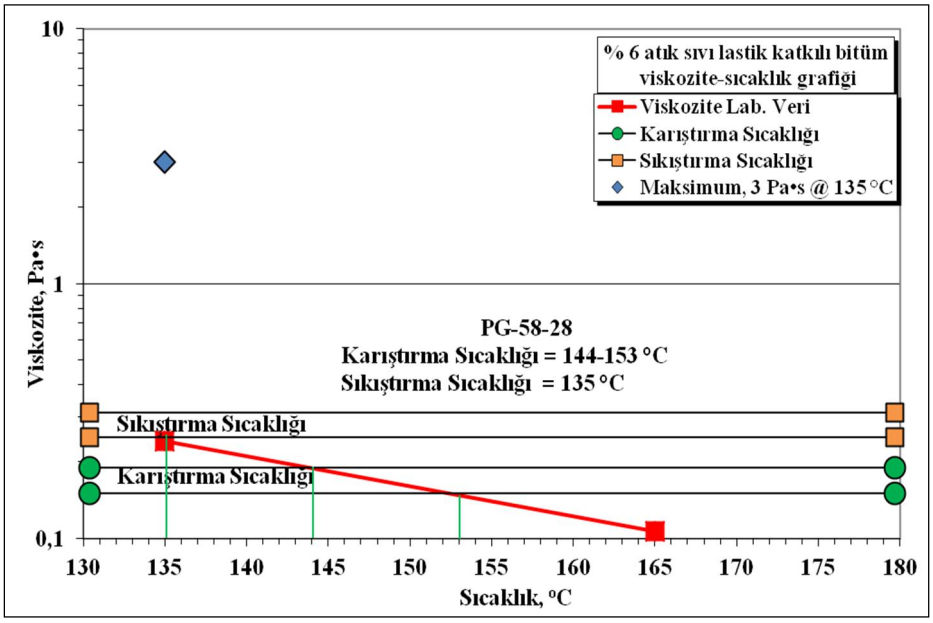
Şekil 4.26. Saf bitümlü bağlayıcının viskozitesinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.27. % 2 Atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcının viskozitesinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.28. % 4 Atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcının viskozitesinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.29. % 6 Atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcının viskozitesinin sıcaklıkla değişimi

Çizelge 4.11. Saf ve atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Bağlayıcı	Karıştırma Aralığı °C	Sıkıştırma Aralığı °C
Saf bitüm	154-162	138-145
% 2 atık sıvı lastik	151-160	135-142
% 4 atık sıvı lastik	147-156	135-137
% 6 atık sıvı lastik	144-153	135

Belirlenen viskozite değerlerinden atık sıvı lastik katkısının bağlayıcıların sertliğini azalttığı, yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirliğini ise artırdığı tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan, atık sıvı lastik içeriğinin oranı artıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcılarla, üretim sırasında daha az enerji harcanan, ılık asfalt (WMA) uygulamalarında kullanılabileceği araştırılmalıdır.

4.3. PG Sınıfının Belirlenmesi

Yüksek Performanslı asfalt kaplama (Superpave) yönteminde bitümler, sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılmıştır. Bu nedenle bu tür bitümlü bağlayıcılara "Performans Sınıfı (Performance Grade)" bitüm adı verilmiş ve PG simgesi ile tanımlanmıştır. Sistemde, bitümün tanımlanması için yapılan deneylerde bitümden beklenen özellikler aynıdır. Ancak bu özelliklerin beklendiği sıcaklıklar farklılık gösterir. Yani, performans sınıfı bitümlerde fiziksel özellikler sabit kalır ancak,

bu özelliklerin elde edileceği sıcaklıklar bitümün kullanılacağı yerdeki iklim şartlarına göre farklılık gösterir (Öztürk ve Çubuk 2004).

Bu çalışmada RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış, saf bitüm ve %2 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitümün performans sınıfı PG 58-22 olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış, % 4 ve % 6 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitümün performans sınıfı ise PG 58-28 olarak belirlenmiştir

Termal çatlama yönünden, katkısız bitüm ve %2 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitüm -22 °C' ye kadar direnç gösterirken, % 4 ve % 6 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitüm ise -28 °C' ye kadar direnç gösterebilmektedir. Çizelge 4.12'de katkısız bitüm ve atık sıvı lastik katkılı modifiye bitüm için belirlenen PG sınıflandırması verilmiştir.

Çizelge 4.12. Katkısız bitüm ve atık sıvı lastik katkılı bitüm için belirlenen PG sınıflandırması

BİTÜM	**Orijinal Bitüm Deneyleri**				**RTFOT Sonrası Bitüm Deneyleri**			
			DSR (G*/sinδ>1kpa)			**DSR (G*/sinδ>2.2kpa)**		
Rafinerisi ve Sınıfı	**Penetrasyon**	**Yumuşama Noktası °C**	**Yenilme Sıcaklığı °C**	**Sınıfı**	**Kütle Kaybı, %**	**Yenilme Sıcaklığı °C**	**Sınıfı**	**SINIFI**
İzmit B 50/70 Saf Bitüm	56,9	43,8	63,5	58	0,113	63,4	58	**PG 58-22**
% 2 Atık sıvı lastik katkılı	60,4	42,5	62,7	58	0,227	62,3	58	**PG 58-22**
% 4 Atık sıvı lastik katkılı	62,6	40,3	59,8	58	0,312	59,4	58	**PG 58-28**
% 6 Atık sıvı lastik katkılı	63,6	36,8	59,0	58	0,513	60,4	58	**PG 58-28**

4.4. Agreganın Karakteristik Özelliklerinin Belirlenmesi

Çalışmada, Konya ve çevresinde bol miktarda bulunan mineral agrega, kalker (kireçtaşı) Konya Selçuklu Belediyesi asfalt şantiyesinden temin edilmiştir. Asfalt karışımlarda kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri laboratuarda yapılan deneyler sonucunda belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 4.13'de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Agrega fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

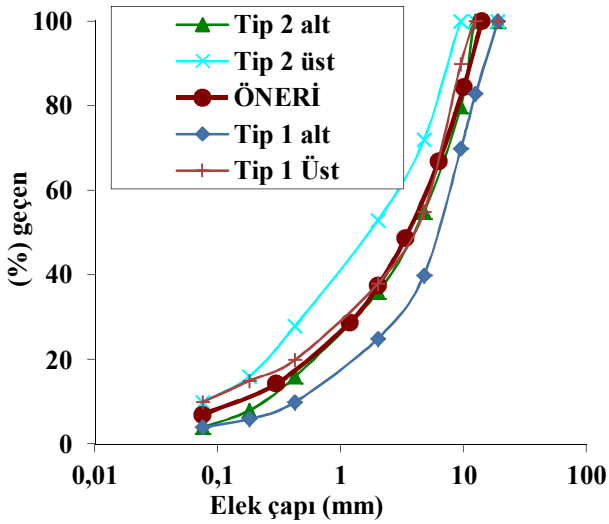
Deney adı	Deney metodu	Deney sonuçları
Aşınma kaybı, %	ASTM C535	27
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık ($MgSO_4$ çözeltisi ile, %)	ASTM C88	4,50
Yassılık indeksi, %	BS-812	22,7
Hacim özgül ağırlık (İri agrega, kg/m^3)	ASTM C127	2703
Su absorbsiyon yüzdesi (İri agrega, %)	ASTM C127	0,199
Hacim özgül ağırlık (İnce agrega, kg/m^3)	ASTM C128	2609
Su absorbsiyon yüzdesi (İnce agrega, %)	ASTM C127	2,145
Zahiri özgül ağırlık (Filler, kg/m^3)	ASTM D854	2675

4.5. Marshall Yöntemi İle Optimum Bağlayıcı Oranı Tespiti

İri, ince ve filler olmak üzere 3 ayrı grupta getirilen agregalar 20 mm, 14 mm, 10 mm, 6,30 mm, 3,35 mm, 2 mm, 1,18 mm, 0,30 mm ve 0.075 mm nolu elekler kullanılarak elek analizi deneyi yapılmıştır. Elenen agregalar üzerinde kaldığı eleklere göre gruplara ayrılmış ve Marshall deney numunelerine ait önerilen granülometri değerleri Çizelge 4.14'de verilmiştir. Önerilen agrega gradasyonuna ait granülometri eğrisi Karayolları Teknik Şartnamesinde istenen aşınma tabakası için Tip 1 ve Tip 2 eğrileri arasında kalmıştır (Şekil 4.30.).

Çizelge 4.14. Marshall deney numunelerinin granülometri değerleri

Elek Çapı (mm)	Geçen (%)	Kalan (%)	Geçen Miktar (gr)	Kalan Miktar (gr)
20	100	0	2400	0
14	100	0	2400	0
10	84,46	15,53	2027,04	372,72
6,3	66,96	17,49	1357,31	419,76
3,35	48,74	18,22	661,55	437,28
2	37,58	11,15	248,61	267,6
1,18	28,78	8,79	71,55	210,96
0,3	14,34	14,44	10,26	346,56
0,075	7	7,34	0,72	176,16
Pan		7		168
			Toplam	2400



Şekil 4.30. Marshall deney numunelerinin agrega granülometri eğrisi

Bu çalışmada; 2400 gr olarak alınan agregalara karşılık olarak sırasıyla % 3,5 – 4 – 4,5 – 5 – 5,5 oranlarında 50-70 penetrasyonlu saf bitüm ve % 2-4-6 oranlarında atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitüm için ayrı ayrı Marshall deneyi uygulanmıştır.

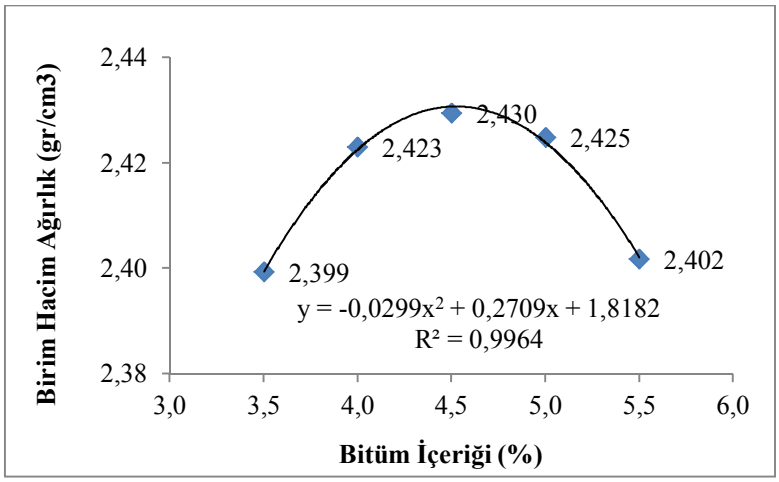
Etüvde bekletilen agrega numuneleri karıştırma işleminin yapılacağı ısıtmalı miksere alınmıştır. Kap + agreganın darası alınıp hangi oranda karışım yapılacaksa o oranda bağlayıcı hassas terazi yardımıyla ilave edilerek 160 °C sıcaklıkta karışım homojen oluncaya kadar ısıtmalı mikserde karıştırılmıştır. Oluşturulan bu karışım önceden etüvde ısıtılan silindirik numune kaplarına yaklaşık 1200 gr olarak doldurulmuştur. Her bağlayıcı oranı için 4 adet numune hazırlanmıştır. Numuneler biraz sıkışması için dıştan içe doğru 25 vuruş miktarı şişlenmiştir. Numunelerin alt ve üst yüzeylerine filtre vazifesi görmesi için dairesel kâğıtlar konulmuştur. Şişlenen numuneler bekletilmeden otomatik Marshall tokmağına yerleştirilip her iki yüzüne de 75 adet vuruş yapılmıştır. Bu işlemin ardından silindirik numuneler kriko yardımı ile kaplarından çıkarılıp tebeşir yardımıyla % kaç bağlayıcı ve kaçıncı numune olduğu yazılmıştır. Şekil 4.31'de Marshall stabilite cihazı ve deney numuneleri görülmektedir.



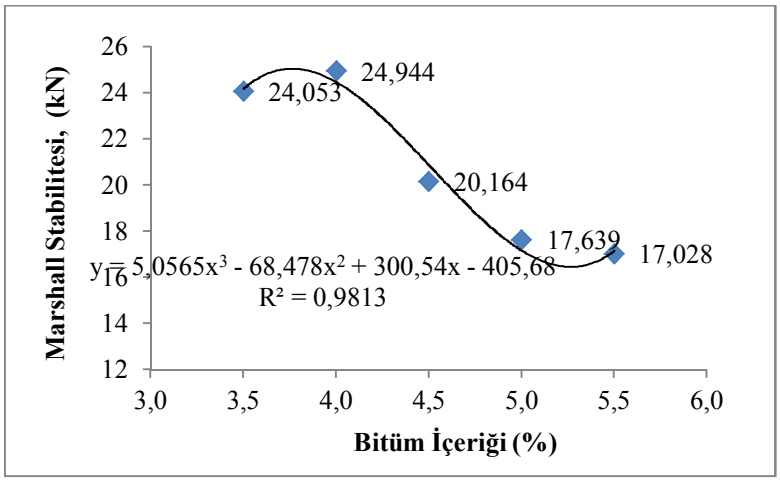
Şekil 4.31. Marshall cihazı ve deney numuneleri

Marshall briketlerinin üç farklı noktasından dijital kumpas ile yükseklik ölçümü yapılıp bu değerler not edilmiştir. Bu işlemin ardından numuneler havada ve suda tartılarak ağırlık değerleri bulunmuştur. Ölçümleri yapılan briketler 60 °C ye kadar ısıtılmış sıcak su havuzunda 40 dakika beklemeye bırakılmıştır. Sıcak su havuzundan çıkarılan numuneler vakit geçirilmeden test cihazının alt segmanının ortasına yerleştirilmiştir. Üst segman da bunun üzerine tespit edilmiştir. Bu tertibat tazyik makinesine yerleştirilmiştir. Yükleme işlemi başlamadan makinenin dijital göstergesinden yük ve deplasman değerleri sıfırlanmıştır. Numunelere dakikada 2 inçlik sabit bir yük tatbik edilmiş ve bu işe numune kırılana kadar devam edilmiştir. Kırılma anında yük göstergesinden maksimum yük, deplasman göstergesinden de akma değeri tüm numuneler için ölçülmüştür.

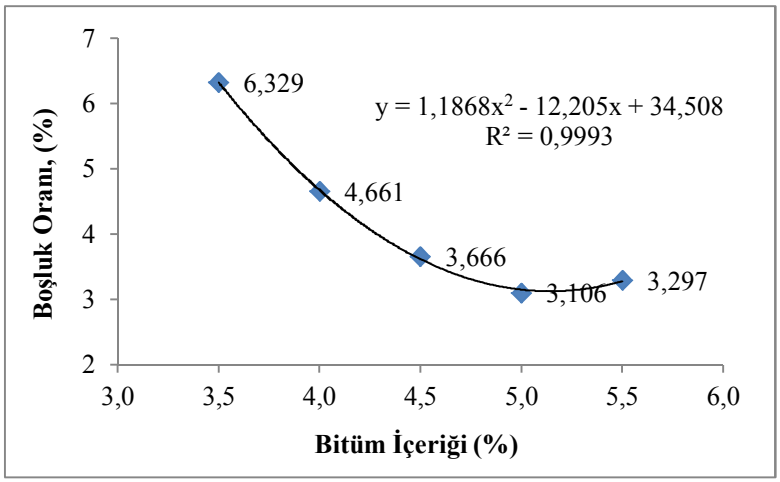
50-70 penetrasyonlu bitüm kullanılarak hazırlanan numuneler için, Şekil 4.32.-4.37' de verildiği üzere birim hacim ağırlık, Marshall stabilite, boşluk oranı, agrega taneleri arası boşluk oranı (VMA), bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (Vfb) ve akma grafikleri çizilmiştir.



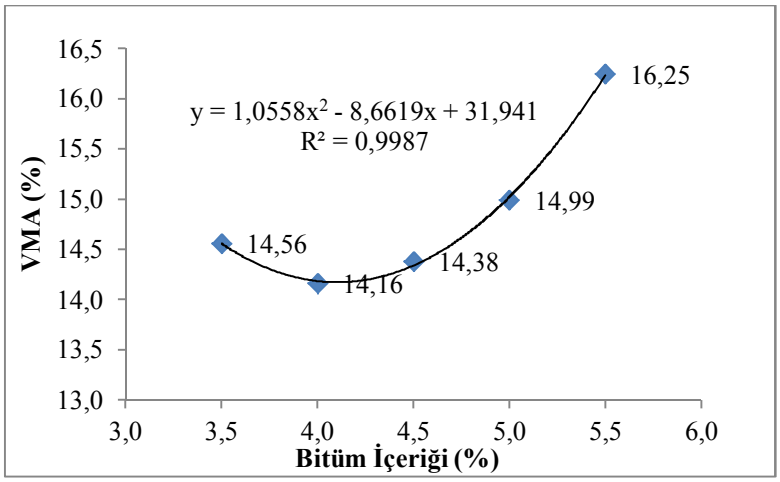
Şekil 4.32. 50-70 penetrasyonlu katkısız bitüm içeriği-Birim hacim ağırlık



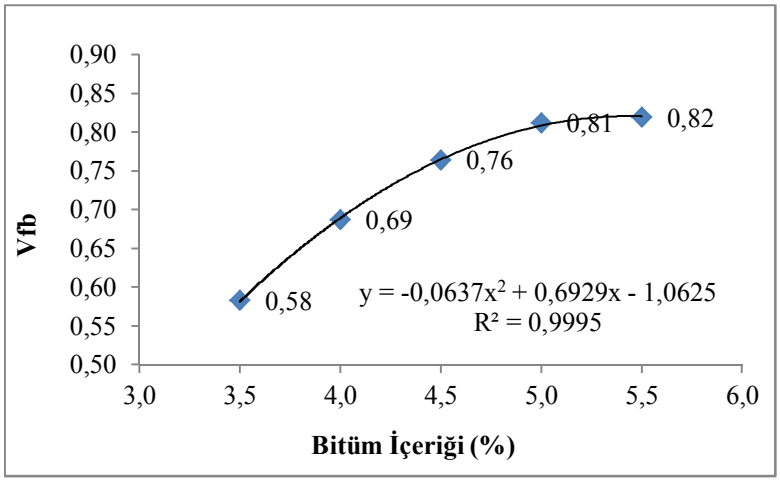
Şekil 4.33. 50-70 penetrasyonlu katkısız bitüm içeriği-Marshall stabilitesi



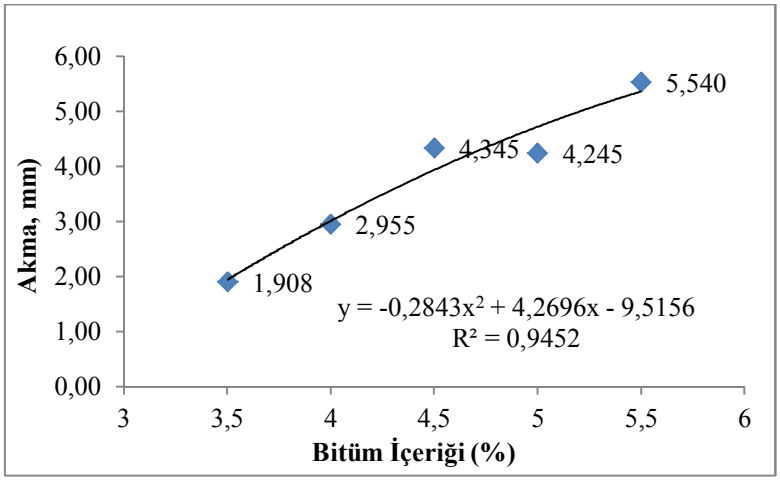
Şekil 4.34. 50-70 penetrasyonlu katkısız bitüm içeriği-Boşluk oranı



Şekil 4.35. 50-70 penetrasyonlu katkısız bitüm içeriği-VMA



Şekil 4.36. 50-70 penetrasyonlu katkısız bitüm içeriği-Vfb



Şekil 4.37. 50-70 penetrasyonlu katkısız bitüm içeriği-Akma

50/70 penetrasyonlu saf bitüm için optimum bitümlü bağlayıcı oranı Şekil 4.32. - 4.36'daki grafiklerden aşağıdaki gibi tespit edilmiştir. Optimum bitüm miktarına göre deney sonuçları Çizelge 4.15'de verilmiştir.

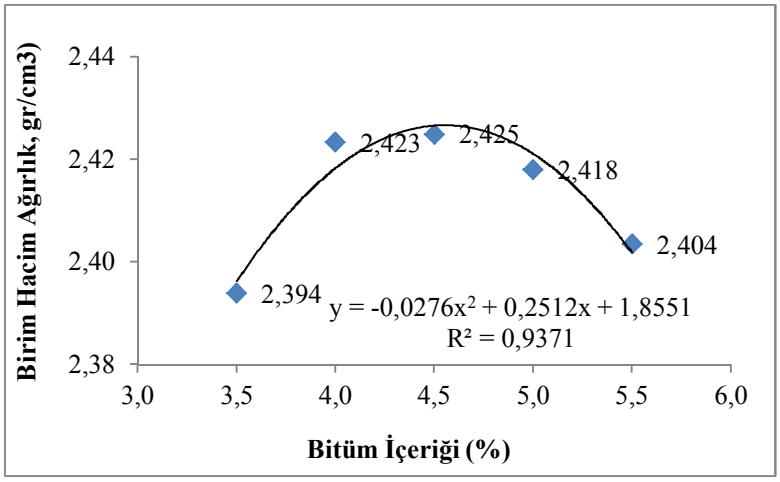
- Maksimum birim hacim ağırlık : 4,54 (Şekil 4.32.)
- Maksimum Marshall Stabilitesi : 3,76 (Şekil 4.33.)
- % 4 Boşluk oranı : 4,28 (Şekil 4.34.)
- Minimum agrega taneleri arası boşluk oranı (VMA) : 4,10 (Şekil 4.35.)
- % 80 Bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (Vfb) : 4,86 (Şekil 4.36.)

50/70 penetrasyonlu saf bitüm için optimum bitümlü bağlayıcı oranı: (4,54+3,76+4,28+4,10+4,86)/5 = 4,31 olarak bulunmuştur.

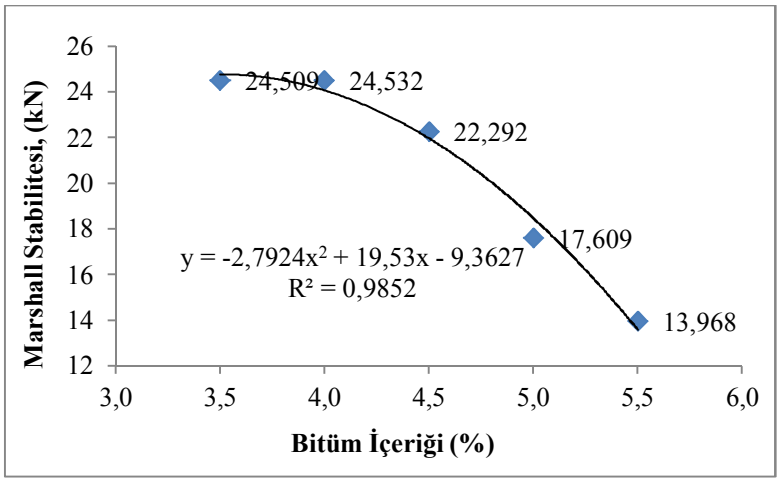
Çizelge 4.15. Optimum bitüm miktarına göre deney sonuçları (50/70 penetrasyonlu saf bitüm)

Marshall Özellikleri	**Sonuç**	**Min**	**Max**
Marshall Stabilitesi (kg)	2202,5	900	-
Boşluk oranı (%)	3,95	3	5
Bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (Vfb, %)	73	65	75
Agrega taneleri arası boşluk oranı (VMA, %)	14,25	14	-
Akma (mm)	3,45	2	4

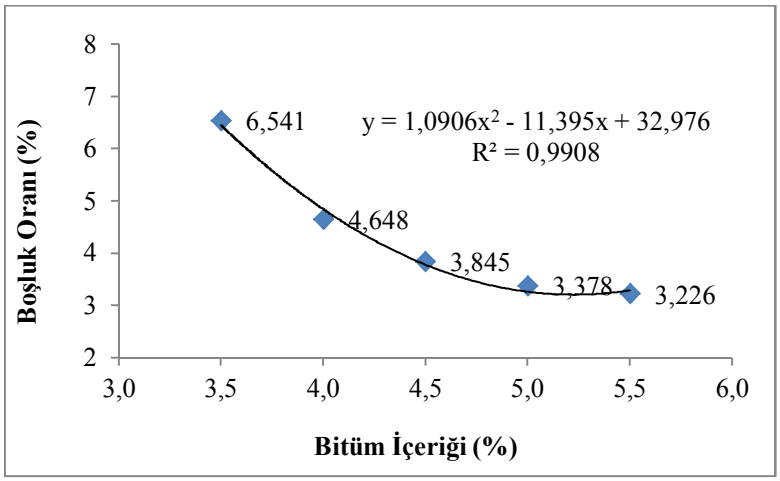
% 2 Atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı kullanılarak hazırlanan Marshall numuneleri için, Şekil 4.38.-4.43'de verildiği üzere birim hacim ağırlık, Marshall stabilite, boşluk oranı, agrega taneleri arası boşluk oranı (VMA), bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (Vfb) ve akma grafikleri çizilmiştir.



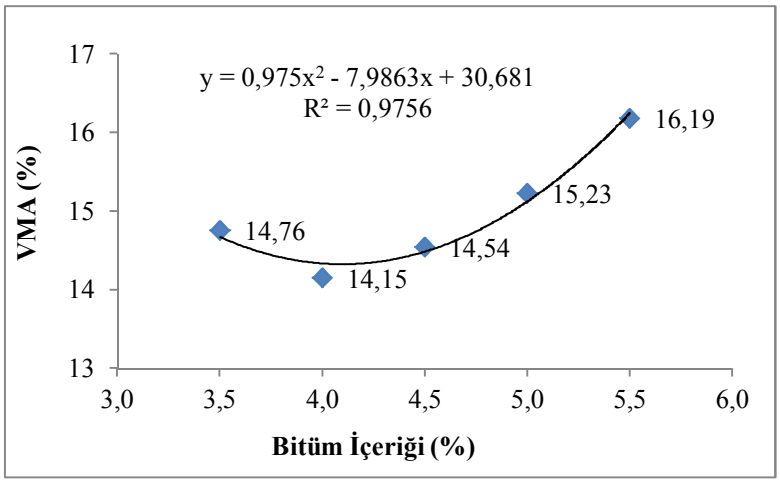
Şekil 4.38. %2 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-birim hacim ağırlık



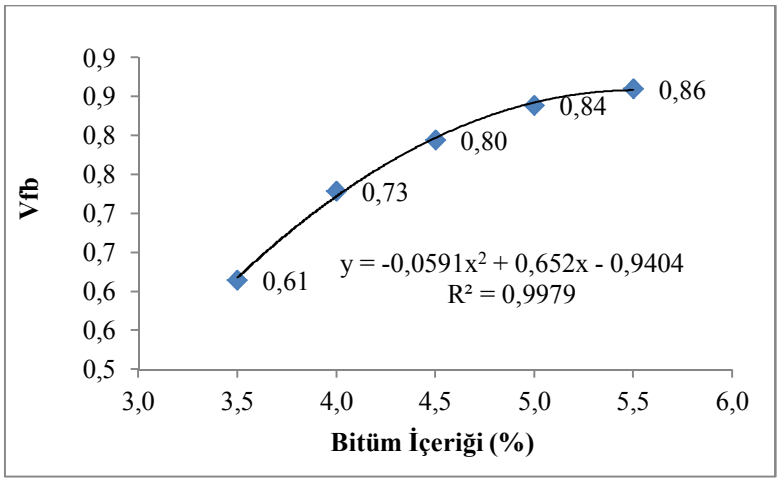
Şekil 4.39. %2 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-Marshall stabilitesi



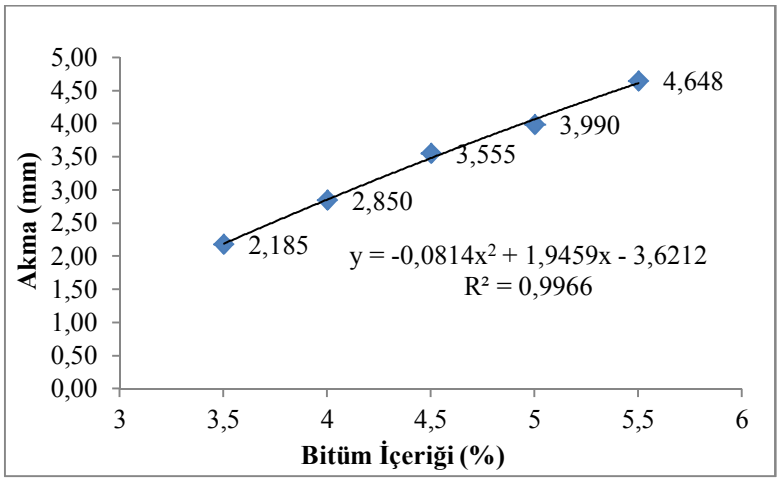
Şekil 4.40. %2 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-boşluk oranı



Şekil 4.41. %2 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-VMA



Şekil 4.42. %2 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-Vfb



Şekil 4.43. %2 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-akma

% 2 atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı için optimum bitümlü bağlayıcı oranı Şekil 4.38.-4.42'deki grafiklerden aşağıdaki gibi tespit edilmiştir. Optimum bitüm miktarına göre deney sonuçları Çizelge 4.16'da verilmiştir.

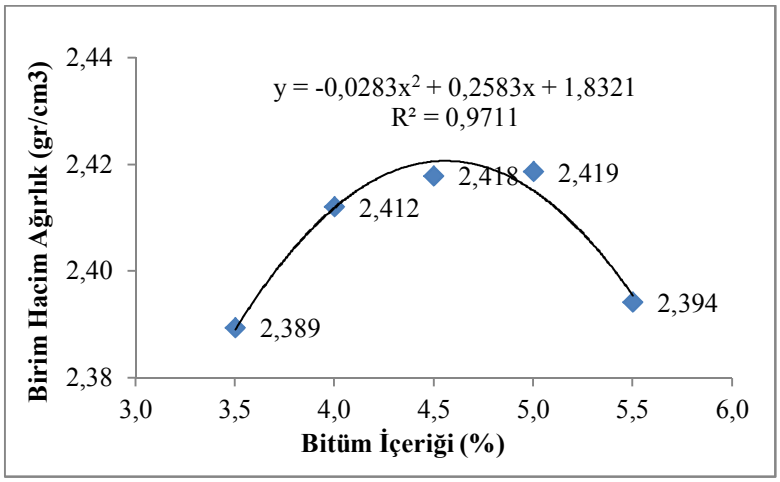
- Maksimum birim hacim ağırlık : 4,56 (Şekil 4.38.)
- Maksimum Marshall Stabilitesi : 3,78 (Şekil 4.39.)
- % 4 Boşluk oranı : 4,37 (Şekil 4.40.)
- Minimum agrega taneleri arası boşluk oranı (VMA) : 4,08 (Şekil 4.41.)
- % 80 Bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (Vfb) : 4,52 (Şekil 4.42.)

% 2 atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı için optimum bitümlü bağlayıcı oranı: (4,56+3,78+4,37+4,08+4,52)/5 = 4,26 olarak bulunmuştur.

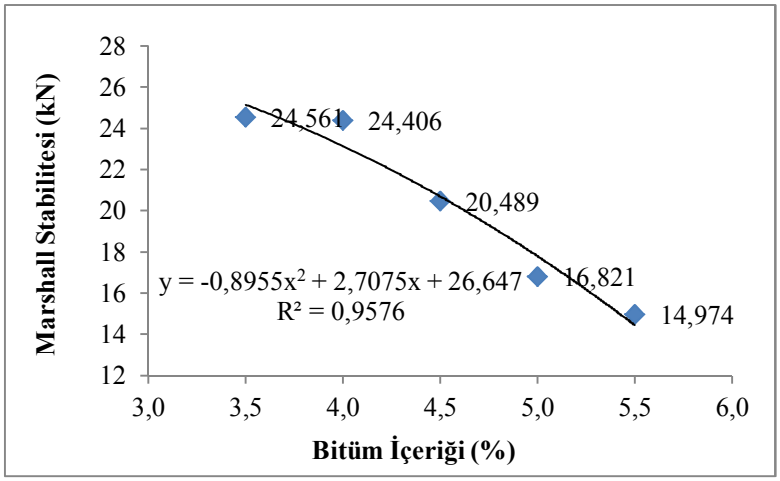
Çizelge 4.16. % 2 atık sıvı lastik ile modifiye edilen optimum bitüm miktarına göre deney sonuçları

Marshall Özellikleri	**Sonuç**	**Min**	**Max**
Marshall Stabilitesi (kg)	2366	900	-
Boşluk oranı (%)	4,2	3	5
Bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (Vfb, %)	76	65	75
Agrega taneleri arası boşluk oranı (VMA, %)	14,35	14	-
Akma (mm)	3,15	2	4

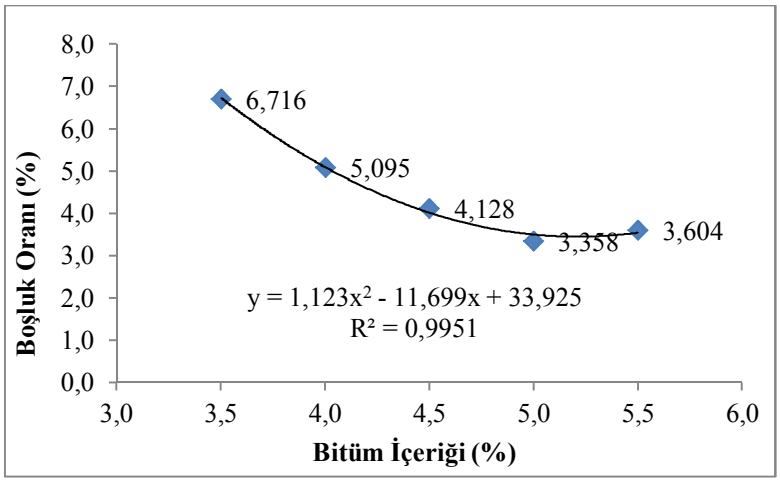
% 4 Atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı kullanılarak hazırlanan Marshall numuneleri için, Şekil 4.44.-4.49'da verildiği üzere birim hacim ağırlık, Marshall Stabilite, boşluk oranı, agrega taneleri arası boşluk oranı (VMA), bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (Vfb) ve akma grafikleri çizilmiştir.



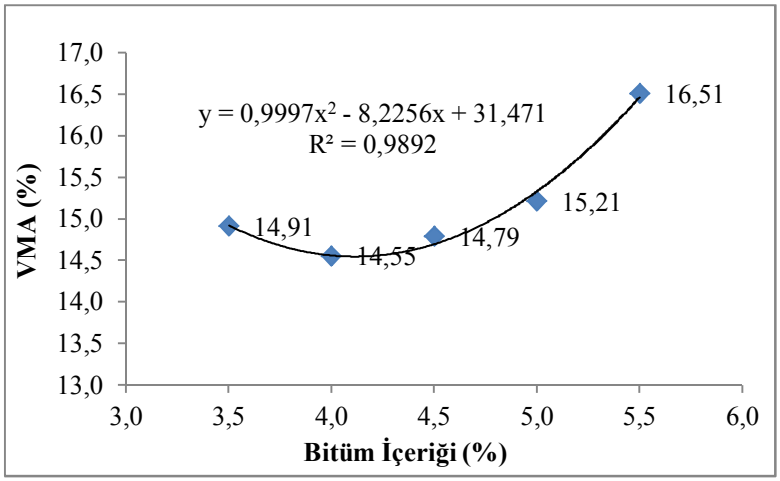
Şekil 4.44. %4 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-birim hacim ağırlık



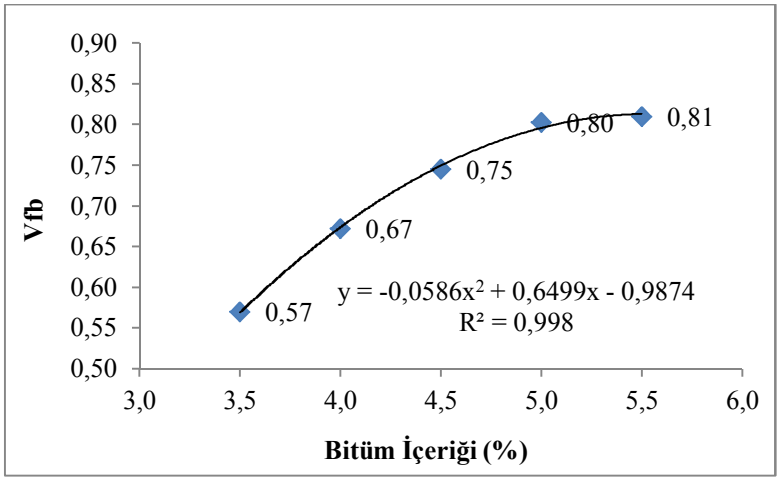
Şekil 4.45. %4 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-Marshall stabilitesi



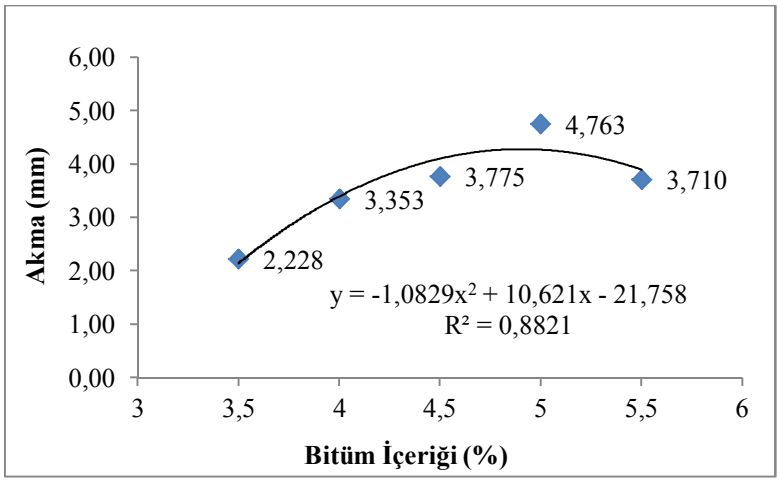
Şekil 4.46. %4 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-boşluk oranı



Şekil 4.47. %4 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-VMA



Şekil 4.48. %4 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-Vfb



Şekil 4.49. %4 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-akma

% 4 atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı için optimum bitümlü bağlayıcı oranı Şekil 4.44.-4.48'deki grafiklerden aşağıdaki gibi tespit edilmiştir. Optimum bitüm miktarına göre deney sonuçları Çizelge 4.17'de verilmiştir.

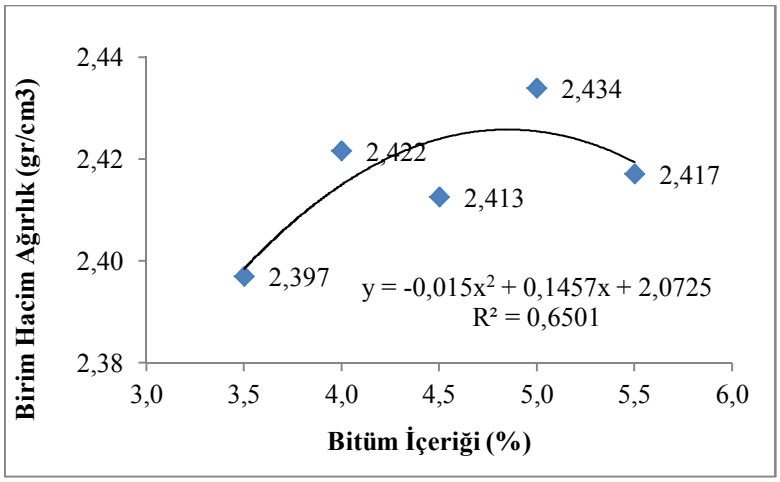
- Maksimum birim hacim ağırlık : 4,46 (Şekil 4.44.)
- Maksimum Marshall Stabilitesi : 3,70 (Şekil 4.45.)
- % 4 Boşluk oranı : 4,35 (Şekil 4.46.)
- Minimum agrega taneleri arası boşluk oranı (VMA) : 4,08 (Şekil 4.47.)
- % 80 Bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (Vfb) : 4,81 (Şekil 4.48.)

% 4 atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı için, optimum bitümlü bağlayıcı oranı: (4,46+3,70+4,35+4,08+4,81)/5 = 4,28 olarak bulunmuştur.

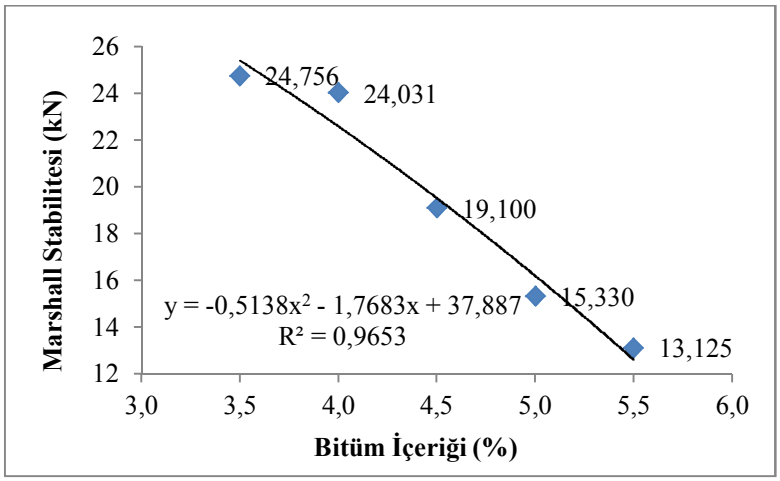
Çizelge 4.17. % 4 atık sıvı lastik ile modifiye edilen optimum bitüm miktarına göre deney sonuçları

Marshall Özellikleri	**Sonuç**	**Min**	**Max**
Marshall Stabilitesi (kg)	2172	900	-
Boşluk oranı (%)	4,25	3	5
Bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (Vfb, %)	73	65	75
Agrega taneleri arası boşluk oranı (VMA, %)	14,65	14	-
Akma (mm)	3,90	2	4

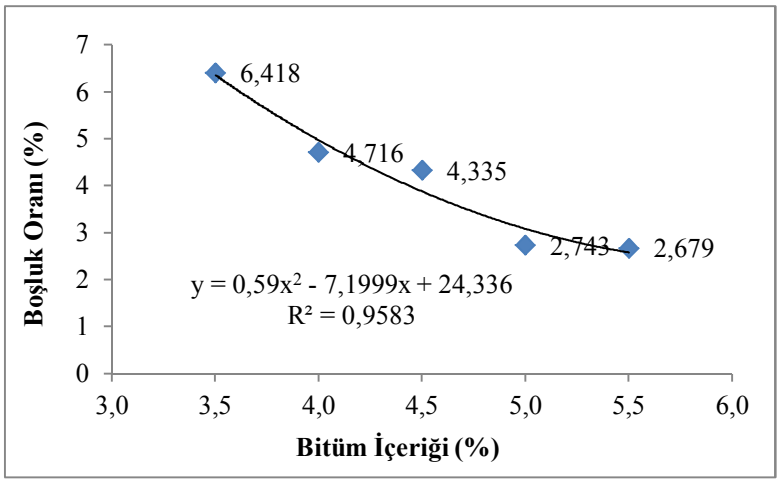
% 6 Atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı kullanılarak hazırlanan Marshall numuneleri için, Şekil 4.50.-4.55'de verildiği üzere birim hacim ağırlık, Marshall stabilite, boşluk oranı, agrega taneleri arası boşluk oranı (VMA), bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (Vfb) ve akma grafikleri çizilmiştir.



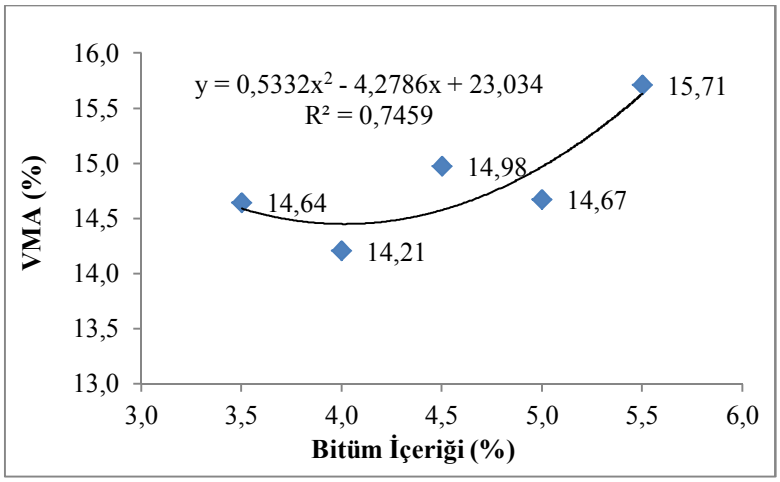
Şekil 4.50. %6 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-birim hacim ağırlık



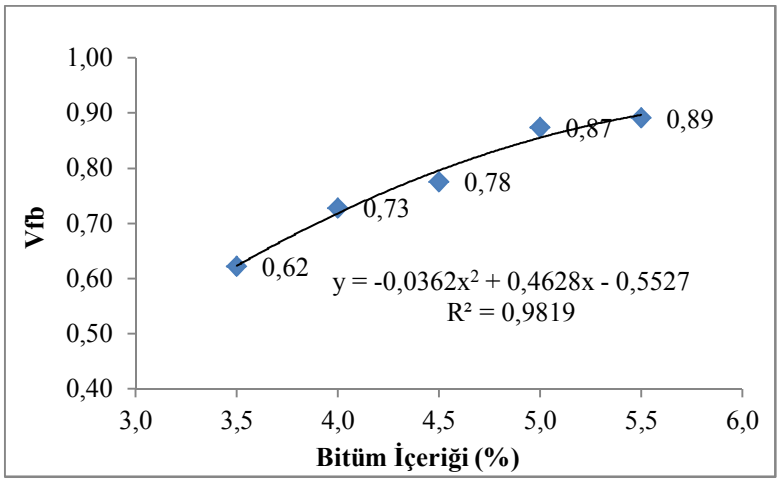
Şekil 4.51. %6 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-Marshall stabilitesi



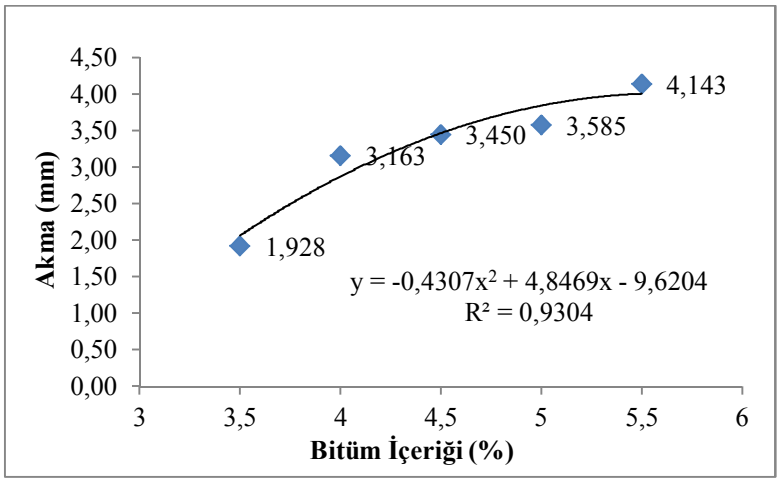
Şekil 4.52. %6 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-boşluk oranı



Şekil 4.53. %6 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-VMA



Şekil 4.54. %6 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-Vfb



Şekil 4.55. %6 atık sıvı lastik katkılı bitüm içeriği-Akma

% 6 Atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı için optimum bitümlü bağlayıcı oranı Şekil 4.50.-4.54'deki grafiklerden aşağıdaki gibi tespit edilmiştir. Optimum bitüm miktarına göre deney sonuçları Çizelge 4.18'de verilmiştir.

- Maksimum birim hacim ağırlık : 4,86 (Şekil 4.50.)
- Maksimum Marshall Stabilitesi : 3,62 (Şekil 4.51.)
- % 4 Boşluk oranı : 4,44 (Şekil 4.52.)
- Minimum agrega taneleri arası boşluk oranı (VMA) : 4,00 (Şekil 4.53.)
- % 80 Bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (Vfb) : 4,58 (Şekil 4.54.)

% 6 Atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı için optimum bitümlü bağlayıcı oranı: (4,86+3,62+4,44+4,00+4,58)/5 = 4,30 olarak bulunmuştur.

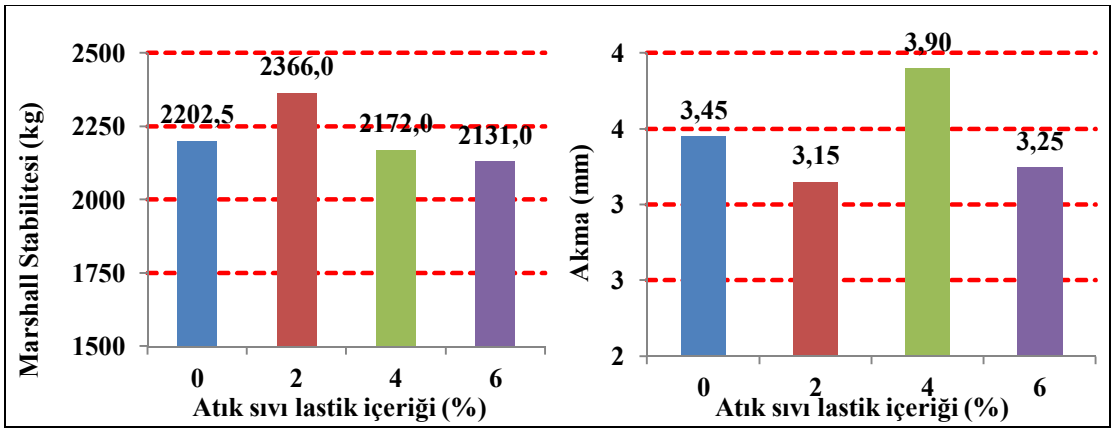
Çizelge 4.18. % 6 atık sıvı lastik ile modifiye edilen optimum bitüm miktarına göre deney sonuçları

Marshall Özellikleri	**Sonuç**	**Min**	**Max**
Marshall Stabilitesi (kg)	2131	900	-
Boşluk (%)	4,3	3	5
Bitümlü Bağlayıcı ile dolu boşluk (VFA (%)	76	65	75
Agrega taneleri arası boşluk (VMA) (%)	14,5	14	-
Akma (mm)	3,25	2	4

Marshall deneyleri bitümlü sıcak karışımların performansının değerlendirilmesinde tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Marshall deneyinde, Marshall stabilitesi, birim hacim ağırlık, boşluk oranı, bitümle dolu boşluk oranı ve akma miktarları deneyde bulunan önemli değerlerdir. Saf bitüme, % 2-4-6 oranlarında atık sıvı lastik ilave edilerek hazırlanan Marshall numuneleri, TCK Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'de verilen Marshall dayanım değerlerini (900 kg, aşınma tabakası için) ve akma değerlerini (2-4 mm, aşınma tabakası için) sağlamaktadır.

Ancak atık sıvı lastik ilavesi ile boşluk oranı artmaktadır. Boşluk oranının artması atık sıvı lastiğin agrega tanelerini daha iyi kaplamasına ve esnekliğine bağlı olabilir. Optimum bitümlü bağlayıcı oranında, atık sıvı lastik katkısı ile önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.

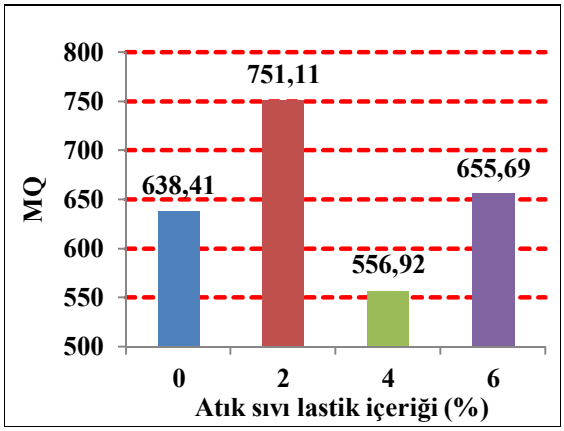
Şekil 4.56'da görüldüğü gibi numuneler kendi aralarında kıyaslandığında en yüksek Marshall Stabilite değeri ve en düşük akma oranı % 2 atık sıvı lastik katkılı numunelerde elde edilmiştir.



Şekil 4.56. Optimum bitüm miktarlarına göre Marshall stabilitesi ve akma deney sonuçları

4.5.1. Marshall oranı (MQ) deney sonuçları

Marshall oranı (MQ), karışım rijitliğinin ve asfalt betonunun deformasyon karşısındaki direncinin bir göstergesi olmaktadır. Marshall oranı değerleri, numunelerin deformasyon direncinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Daha yüksek bir (MQ) oran değeri, daha rijit bir karışım ve bundan dolayı daha dirençli bir karışım olmaktadır. Marshall Stabilite değerinin akma değerine bölümünden elde edilen Marshall Oranı (MQ) değerlerinin atık sıvı lastik içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 4.57'de verilmiştir. % 2 atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü sıcak karışımın MQ (Marshall Oranı) diğer tüm karışımlardan elde edilen MQ değerinden daha büyük çıkmıştır. Yüksek bir MQ değeri çıkmış olması karışımın deformasyonlara karşı daha dirençli olma olasılığını göstermektedir. MQ değeri kalıcı deformasyon direncinin ve bundan dolayı tekerlek izi oluşumunun bir ölçüsüdür.



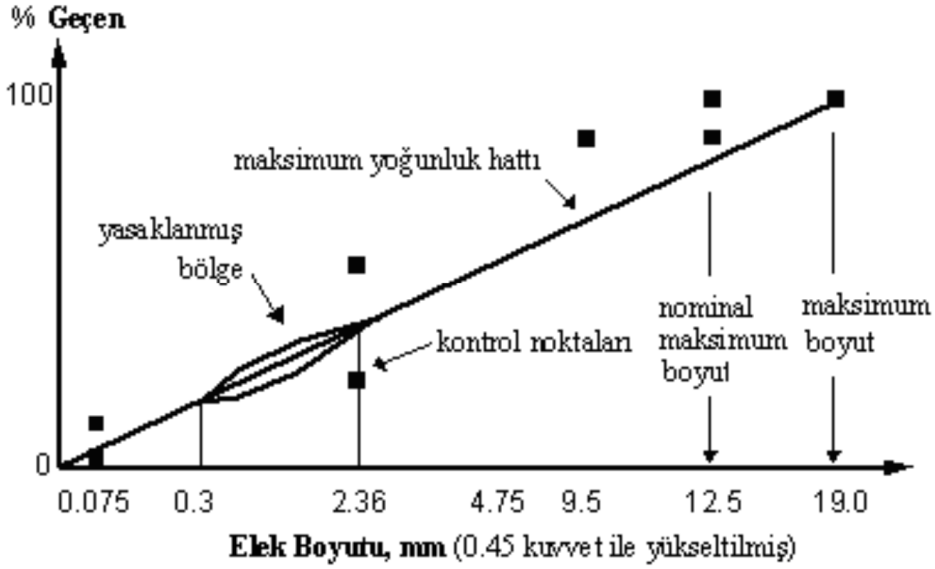
Şekil 4.57. Optimum bitüm miktarlarına göre Marshall Oranı (MQ) deney sonuçları

4.6. Superpave Karışım Tasarımı

Bu kısımda AASHTO T312'ye göre optimum bitüm yüzdesini bulmaya yönelik Superpave karışım tasarımı süreci vurgulanmıştır. Deneyler, Karayolları Genel Müdürlüğü bitümlü sıcak karışımlar laboratuarında gerçekleştirilmiştir.

4.6.1. Superpave dizayn agrega gradasyonu

Superpave yönteminde, müsaade edilebilir agrega gradasyonunu belirlemek amacıyla geleneksel yöntemlerden farklı bir gradasyon grafiği kullanılmaktadır. Superpave yönteminde, müsaade edilebilir agrega gradasyonunu belirlemek amacıyla grafiğin düşey ekseninde % geçen, yatay ekseninde ise elek açıklıklarının "mm" olarak 0,45'lik üstel kuvvet ile yükseltilmiş boyutları kullanılmaktadır. Şekil 4.58'de görüldüğü gibi agrega gradasyonunu belirlemek amacıyla, 0,45 kuvvet eğrisine "kontrol noktaları" ve "yasaklanmış bölge" kavramları getirilmiştir (McGennis ve ark., 1995).



Şekil 4.58. Superpave gradasyon limitleri (McGennis, 1995)

Bu yöntemde, Çizelge 4.19'da gösterilen maksimum ve nominal maksimum agrega boyutu kavramları geliştirilmiştir.

- Nominal maksimum boyut: Agrega malzemesinin %10'dan fazlasının üstte kaldığı (veya %90'ının geçtiği) ilk eleğin bir üst elek boyutudur.

- Maksimum boyut: Nominal maksimum boyuttan bir büyük elek boyutu olarak tanımlanmıştır (McGennis ve ark., 1995).

Çizelge 4.19. Superpave karışım gradasyonları (McGennis ve ark., 1995)

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

Çalışmada, maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan Superpave agrega gradasyonu seçilmiştir. Superpave karışım dizayn yöntemine göre, çalışma için seçilmiş olan nominal maksimum 12,5 mm büyüklüğündeki agregaya boyutu esas alınarak, aşağıda Çizelge 4.20'de belirtilen sınırlar içerisinde (kontrol noktaları ve yasaklanmış bölge) kalacak şekilde bir gradasyon dizisini kapsayan karışım gradasyonu belirlenmiştir.

Çizelge 4.20. Superpave 12,5 mm nominal karışım için gradasyon kriterleri (Harman ve ark., 2002)

Elek Boyutu, mm	Kontrol Noktaları		Yasaklanmış Bölge	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
19,0	100	100		
12,5	90	100		
9,5				
4,75				
2,36	28	58	39,1	39,1
1,18			25,6	31,6
0,600			19,1	23,1
0,300			15,5	15,5
0,150				
0,075	2	10		

Çalışmada kullanılmak üzere, yukarıda Çizelge 4.20'de belirtilen şartname sınırları içerisinde kalacak şekilde seçilen 12,5 mm nominal karışım için dizayn agrega gradasyonu ve agrega karışımında kullanılan kaba, ince ve filler agregalarının ağırlıkça yüzdeleri Çizelge 4.21'de verilmiştir.

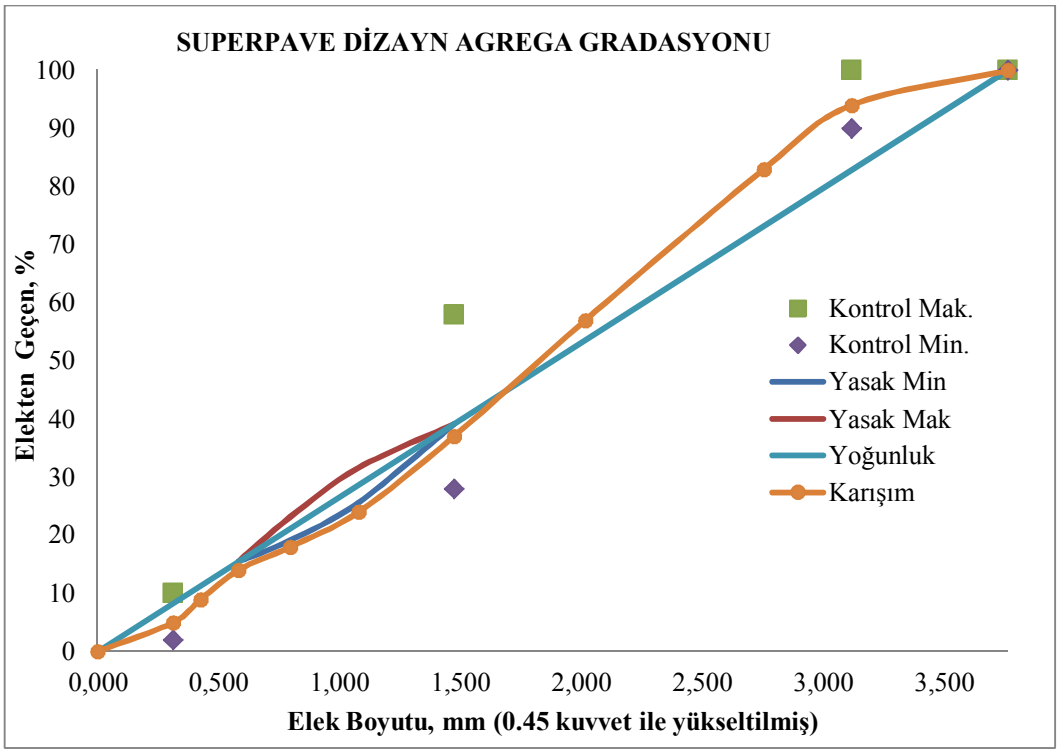
Ayrıca, deney numunelerinin granülometri değerleri Çizelge 4.22'de ve dizayn agrega granülometri eğrisi Şekil 4.59'da verilmiştir.

Çizelge 4.21. Superpave 12,5 mm nominal karışım için dizayn agrega gradasyonu

Elek Boyutu, mm	Dizayn Agrega Gradasyonu, %Geçen
19,0	100
12,5	94
9,5	83
4,75	57
2,36	37
1,18	24
0,600	18
0,300	14
0,150	9
0,075	5
Karışımlardaki Agrega Yüzdeleri	
Kaba Agrega	43
İnce Agrega	52
Filler	5

Çizelge 4.22. Superpave deney numunelerinin granülometri değerleri

Elek Çapı (mm)	Kümülâtif Geçen (%)	Kalan (%)	Kümülâtif Ağırlık (gr)	Her bir Elek Üstünde Kalan Miktar (gr)
19,0	100	-	-	-
12,5	94	6	270	270
9,5	83	17	765	495
4,75	57	43	1935	1170
2,36	37	63	2835	900
1,18	24	76	3420	585
0,600	18	82	3690	270
0,300	14	86	3870	180
0,150	9	91	4095	225
0,075	5	95	4275	180
Pan			4500	225
			Toplam	**4500**



Şekil 4.59. Superpave deney numunelerinin agrega granülometri eğrisi

Sıkıştırma enerjisinin bir fonksiyonu olan yoğurma sayısı; tasarım eşdeğer tek dingil yükü (ETDY) ve yolun sınıfına bağlı olarak sıkıştırma parametreleri Çizelge 4.23'de görülmektedir.

Çizelge 4.23. Trafik seviyesine göre sıkıştırma parametreleri (Superpave-2000, 1999)

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

Superpave sisteminde sıkıştırma enerjisi, yoğurma sayısının (N_{des}) bir fonksiyonu olarak alınmaktadır. N_{ini} sayısı karışımın sıkışabilirliğini, Nmaks sayısı ise karışımın ulaşabileceği maksimum yoğunluğu tespit etmek için kullanılmaktadır. Çalışmada, kabul edilen 3–30 milyon eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısına göre sıkıştırma parametreleri; Nini = 8, Ndes = 100 ve Nmaks =160 olarak alınmıştır.

Çalışmada, Karayolları Genel Müdürlüğü, Bitümlü Sıcak Karışımlar laboratuarında bulunan Servopac Gyratory Compaktor yoğurmalı presi kullanılarak

numuneler hazırlanmıştır. Cihaz, 0,5-1,5° aralığında yoğurma açısına sahip, yoğurma hızı 30 devir/dakika, yoğurma basıncı 0–700 kPa olarak ayarlanabilen ve 100 mm ile 150 mm'lik numune hazırlamaya elverişlidir. Cihaza ait bir yazılım programı mevcuttur ve işlemler anında bilgisayara aktarılmaktadır. Deney çalışmalarında kullanılan yoğurmalı pres Şekil 4.60'da gösterilmiştir.



Şekil 4.60. Çalışmada kullanılan "Servopac Gyratory Compaktor" yoğurmalı presi

4.6.2. Superpave deney numunelerini hazırlama adımları

Tasarım agrega gradasyonuna göre hazırlanan karışımın tahmini bitüm içeriğinde, ±%0,5 ve +%1,0 olmak üzere dört ayrı bitüm içeriğinde ve her bitüm içeriği için en az iki numune olmak üzere toplam 8 asfalt karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu dört bitüm içeriği, Superpave karışım tasarım yöntemi için minimum gereksinimdir. Karışım için; 50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve yaşlandırmanın en az olduğu %4,45 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitüm bağlayıcısı kullanılarak %3,50; %4,00; %4,50 ve %5,00 içeriklerinde hazırlanan karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bunun için;

1. Dizayn agrega gradasyonuna göre gerekli tartımlar yapılarak, uygun kaplara konulmuştur. Agregaların özgül ağırlığına bağlı olarak 4500 gr agrega ile 115 mm ±5 mm yüksekliğinde numuneler üretilmiştir.

2. Çalışmada, kullanılan bitümlü bağlayıcı viskozite deney sonuçlarına göre uygun karışım sıcaklığında agregayla birlikte ısıtıldıktan sonra agrega ve bitüm mekanik karıştırıcıda karıştırılmıştır (Şekil 4.61.).



Şekil 4.61. Superpave deney numunelerinin mekanik karıştırıcıda karıştırılması

3. Karıştırma işlemi bittikten sonra gevşek haldeki karışım bir tepsiye konularak ve 4 saat 135 ^{o}C etüvde kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Sıkıştırma kalıbı, tepsisi ve diğer sıkıştırma aparatları sıkıştırma işleminden 1 saat öncesi etüve yerleştirilmiştir.

4. Yoğurmalı sıkıştırıcının çalışmasıyla ilgili ayarlar yapılarak (açı, basınç, sıkışma sayısı vb.) bilgisayar yazılım programına aktarılmıştır. Sıkıştırma için kullanılan kalıp ve diğer parçalar yağlandıktan sonra kalıbın altına ve karışım kalıba doldurulduktan sonra üzerine kağıt konularak yoğurmalı sıkıştırıcının numune haznesine bırakılmıştır (Şekil 4.62.).



Şekil 4.62. Yoğurmalı sıkıştırıcı ve numune kalıbı

5. Sıkıştırmada seçilen yük 600 kpa uygulanarak, sıkışma yüksekliği ve diğer bilgiler bilgisayar yazılım programı tarafından kaydedilmiştir. Sıkışma sayısı kadar

dönme gerçekleşince yoğurmalı sıkıştırıcı cihazı otomatik olarak işlemi durdurmuştur. Kalıp cihazdan dışarıya alındıktan sonra, sıkıştırılan numunenin bozulmaması için kalıp biraz soğuduktan sonra numunenin üzerindeki ve altındaki kağıtlar çıkartılmıştır (Şekil 4.63.).



Şekil 4.63. Yoğurmalı sıkıştırıcıdan numunenin çıkarılması

6. Bu işlemin ardından kalıptan çıkartılan deney numunelerine tebeşir yardımıyla % kaç bağlayıcı ve kaçıncı numune olduğu yazılmıştır. Şekil 4.64'de yoğurmalı sıkıştırıcıdan çıkan deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 4.64. Yoğurmalı sıkıştırıcıdan çıkarılan deney numuneleri

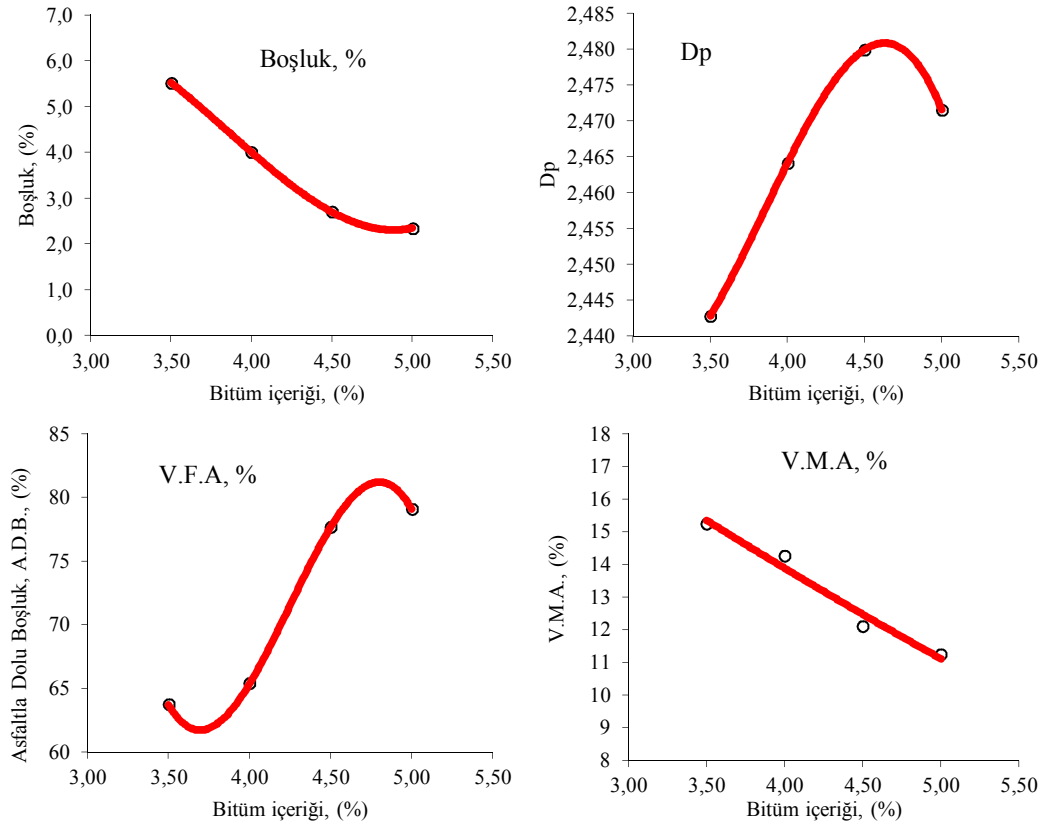
4.6.3. Saf karışımın bitümlü bağlayıcı içeriğinin tespit edilmesi

Tasarım agrega gradasyonuna göre seçilen, agrega karışımlarının farklı bitümlü bağlayıcı içeriklerinde sıkıştırılan karışım numunelerinin fiziksel özellikleri belirlenerek Çizelge 4.24.'de gösterilmiştir. Tasarım yoğurma sayısında (Ndes=100) hesaplanan Va,

VMA, VFA ve DP değerleri ile yoğunluk değerlerinin, bitüm yüzdelerine bağlı olarak değişimini gösteren grafikler çizilerek Şekil 4.65'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.24. Farklı bitümlü bağlayıcı içeriklerinde sıkıştırılan saf numunelerin fiziksel özellikleri

No	Bitüm Wa,%	g	Ortalama Yükseklik, mm	Havada Ağırlık,g A	Sudaki Ağırlık,g C	Doy.Yüz. Ağırlık,g B	Hacim cm³ V	Hacim Özg.Ağırl Dp	Maks.Teo. Özgül Ağ. Dt	% Boşluk Vh	% V.M.A	Asf.Dol Boşluk V.F.A
1	3,50	157,5	112,8	4810,6	2865,5	4830,7	1965,2	2,448				
2	3,50	157,5	108,6	4685,0	2777,9	4699,7	1921,8	2,438				
								2,443	2,586	5,52	15,23	63,7
3	4,00	180,0	112,7	4881,4	2930,3	4899,7	1969,4	2,479				
4	4,00	180,0	112,3	4850,4	2900,3	4880,3	1980,0	2,450				
								2,464	2,567	4,01	14,25	65,4
5	4,50	202,5	112,4	4937,3	2968,7	4958,5	1989,8	2,481				
6	4,50	202,5	112,8	4939,5	2967,9	4960,7	1992,8	2,479				
								2,480	2,549	2,70	12,11	77,7
7	5,00	225,0	113,1	4955,5	2972,3	4977,5	2005,2	2,471				
8	5,00	225,0	113,1	4953,3	2971,2	4975,1	2003,9	2,472				
								2,472	2,531	2,35	11,24	79,1



Şekil 4.65. Karışımların hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm içeriği ile değişimi

Karışımlarda bağlayıcı olarak kullanılan 50/70 penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcı için tasarım bitümlü bağlayıcı içeriği; karışımın hava boşluğu yüzdesi-bitüm içeriği yüzdesi grafiği yardımıyla, boşluk % 4 olacak şekilde %4,01 olarak tespit

edilmiştir. Bulunan bu tasarım bitümlü bağlayıcı yüzdesine göre, grafikler yardımıyla diğer tasarım değerleri tespit edilerek sonuçları Çizelge 4.25'de verilmiş ve Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.25. Optimum bitüm miktarına göre deney sonuçları (50/70 penetrasyonlu saf bitüm)

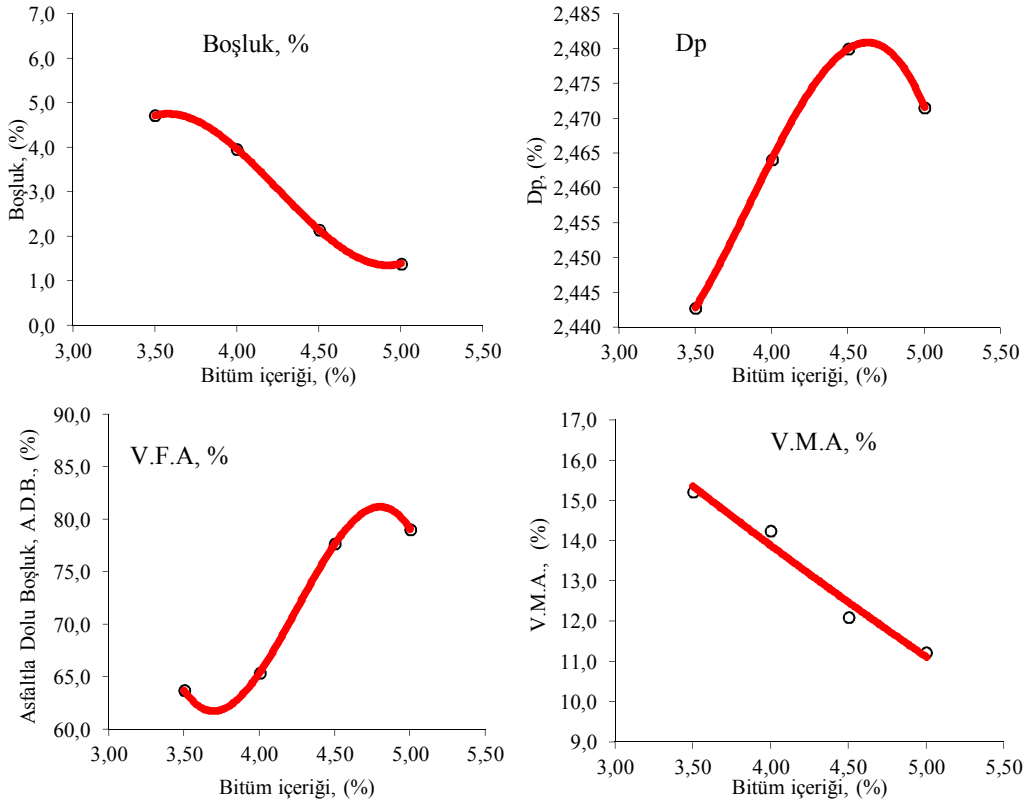
Karışımın Özelliği	**Sonuç**	**Şartname Kriteri**
Hava Boşluğu Yüzdesi, (Va)	%4,0	% 4,0
Agregalar arası Boşluk Yüzdesi, (VMA)	% 14,10	Min. % 14,0
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi, (VFA)	%65,50	% 65-75
Filler/Bitüm Oranı	1,24	0,8-1,6

4.6.4. Modifiye edilen karışımın bitümlü bağlayıcı içeriğinin tespit edilmesi

Tasarım agrega gradasyonuna göre seçilen, agrega karışımlarının % 4,45 atık sıvı lastik ile modifiye edilen farklı katkılı bitümlü bağlayıcı içeriklerinde sıkıştırılan karışım numunelerinin fiziksel özellikleri belirlenerek Çizelge 4.26'da gösterilmiştir. Tasarım yoğurma sayısında (Ndes=100) hesaplanan Va, VMA, VFA ve DP değerleri ile yoğunluk değerlerinin, bitüm yüzdelerine bağlı olarak değişimini gösteren grafikler çizilerek Şekil 4.66'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.26. Farklı bitümlü bağlayıcı içeriklerinde sıkıştırılan katkılı numunelerin fiziksel özellikleri

No	Bitüm		Ortalama Yükseklik, mm	Havada Ağırlık,g A	Sudaki Ağırlık,g C	Doy.Yüz. Ağırlık,g B	Hacim cm³ V	Hacim Özg.Ağırl Dp	Maks.Teo. Özgül Ağ. Dt	% Boşluk Vh	% V.M.A	Asf.Dol Boşluk V.F.A
	Wa,%	g										
1	3,50	157,5	113,9	4880,8	2910,8	4898,2	1987,4	2,456				
2	3,50	157,5	113,3	4870,3	2911,6	4884,4	1972,8	2,469				
								2,462	2,584	4,72	15,23	69
3	4,00	180,0	112,9	4915,0	2925,0	4927,0	2002,0	2,455				
4	4,00	180,0	112,4	4875,3	2907,9	4879,8	1971,9	2,472				
								2,464	2,565	3,96	14,25	65,4
5	4,50	202,5	113,4	4953,3	2960,9	4955,5	1994,6	2,483				
6	4,50	202,5	112,6	4936,6	2965,2	4938,8	1973,6	2,501				
								2,492	2,547	2,15	12,11	82,3
7	5,00	225,0	113,2	4940,1	2960,2	4945,6	1985,4	2,488				
8	5,00	225,0	113,8	4939,5	2965,7	4941,7	1976,0	2,500				
								2,494	2,529	1,39	10,43	86,7



Şekil 4.66. Karışımların hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm içeriği ile değişimi

Karışımlarda kullanılan %4,45 atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı için tasarım bitümlü bağlayıcı içeriği; karışımın hava boşluğu yüzdesi-bitüm içeriği yüzdesi grafiği yardımıyla, boşluk % 4 olacak şekilde %3,94 olarak tespit edilmiştir. Bulunan bu tasarım bitümlü bağlayıcı yüzdesine göre, grafikler yardımıyla diğer tasarım değerleri tespit edilerek sonuçları Çizelge 4.27'de verilmiş ve Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.27. Optimum bitüm miktarına göre deney sonuçları (% 4,45 atık sıvı lastik ile modifiye edilen)

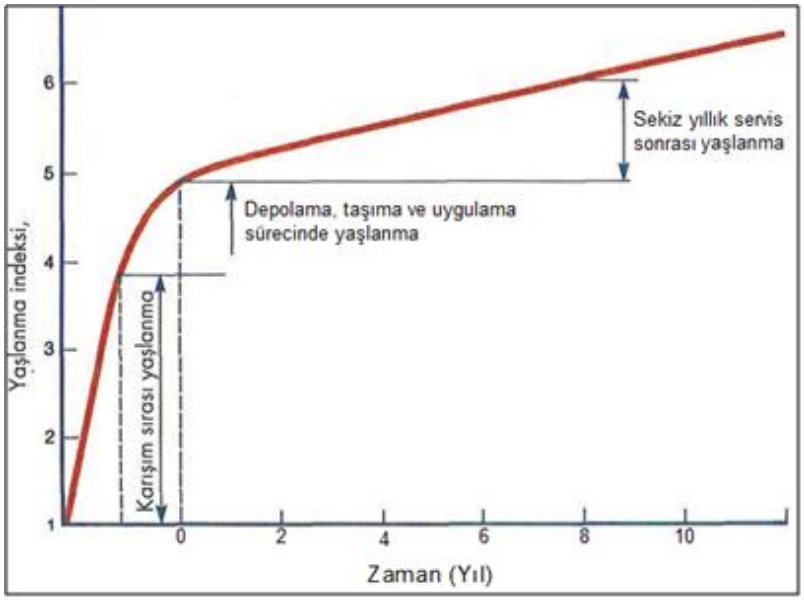
Karışımın Özelliği	Sonuç	Şartname Kriteri
Hava Boşluğu Yüzdesi, (Va)	% 4,0	% 4,0
Agregalar arası Boşluk Yüzdesi, (VMA)	14,20	Min. % 14,0
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi, (VFA)	% 65,50	% 65-75
Filler/Bitüm Oranı	1,27	0.8-1.6

4.7. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Yaşlanmanın Etkisi

Yollardan beklenen hizmet düzeyi büyük ölçüde yol üstyapılarında kullanılan bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır. Bu özelliklerin en önemlilerinden biri yaşlanmadır. Yaşlanma, kaplamanın yapımı sırasında bağlayıcının hafif bileşenlerinin buharlaşması ve oksidasyonudur. Oksidasyon, yolun servis ömrü boyunca da devam etmektedir. Her iki durum da, bağlayıcının viskozitesinin artışına, penetrasyon değerinin düşmesine ve karışımın sertleşmesine neden olmaktadır (Şengöz ve Ağar 2005).

Bitümlü bağlayıcının asfalt kaplama performansını doğrudan etkileyen en önemli özelliği dayanıklılığıdır. Bitümlü bağlayıcının dayanıklılığı sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Bitümlü bağlayıcının çeşitli nedenlerden dolayı sertleşmesi ve kırılgan hale gelmesine de "yaşlanma" veya "zamana bağlı yaşlanma" denilmektedir (Bell ve ark., 1994a; Bell ve ark., 1994b).

Bitümlü bağlayıcıda oluşan yaşlanma meydana geliş süresine göre kısa ve uzun dönem olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Kısa dönem yaşlanma, bitümün depolanma, plente taşınma, agregayla karıştırılma, uygulama bölgesine taşınma, serilme ve sıkıştırılma sırasında meydana gelirken, uzun dönem yaşlanma yolun servis ömrü boyunca meydana gelmektedir. Yaşlanma derecesini tespit etmek amacıyla yaşlanma indeksi kullanılmaktadır. Yaşlanma indeksi ve zaman arasındaki ilişki Şekil 4.67'de verilmiştir (İsfalt, 2004).



Şekil 4.67. Bitümün yaşlanma indisindeki değişimin zamanla ilişkisi (İsfalt, 2004)

Şekil 4.67'de görüldüğü gibi kısa dönem yaşlanma süresince oksidasyonun yaklaşık %70'inin meydana geldiği; uzun dönem yaşlanma süresince de oksidasyonun yavaşlayarak 8 yılda yalnızca %30 civarında gerçekleştiği görülmektedir (Şengöz ve Ağar 2005).

Bitümlü sıcak karışımların yaşlanması için iki prosedür önerilmektedir:

- Kısa vadeli yaşlanma: karışımların sıkıştırılmadan gevşek halde 4 saat süresince 135 °C sıcaklıkta hava sirkülasyonlu etüvde bekletilmesi,
- Uzun vadeli yaşlanma: kısa süreli yaşlandırılmış karışımların, sıkıştırıldıktan sonra 85 °C sıcaklıkta hava sirkülasyonlu etüvde 120 saat (5 gün) boyunca bekletilmesinin en uygun yöntem olduğu belirtilmiştir (Bell ve Sosnovske, 1994; Bell ve ark., 1994a ; Bell ve ark., 1994b).

Bitümlü sıcak karışımların standartta belirtilen şekilde 85 °C'deki hava sirkülasyonlu etüvde 120 saat (5 gün) bekletilmesi şeklinde uzun dönem yaşlandırılması ile arazide 5-10 yıllık yaşlanmanın laboratuvar ortamına yansıtılması sağlanmaktadır (Kandhal ve Chakraborty, 1996).

Marshall Stabilitesi değerinin akma değerine bölünmesi ile belirlenen Marshall Oranı (MQ), karışımın sertliğinin ve asfalt betonunun deformasyona karşı direncinin bir göstergesi sayılmaktadır (Hınıslıoğlu ve Ağar, 2004; Yılmaz ve Kök, 2009).

Nem hasarına karşı bitümlü sıcak karışımların dayanımını belirlemek amacıyla geliştirilmiş bir yöntem olan kalıcı Marshall Stabilitesi yönteminde numuneler 60 °C suda 24 saat bekletildikten sonra Marshall stabilite deneyine tabi tutulmaktadır (Aksoy ve ark., 2005).

4.7.1. Kalıcı Marshall Stabilitesi deneyi

Bitümlü sıcak karışımların kısa dönem yaşlandırılması amacıyla sıkıştırılmamış numuneler 135 °C sıcaklıktaki etüvde 4 saat bekletildikten sonra sıkıştırılmış, uzun dönem yaşlandırma amacıyla sıkıştırılmış numuneler 85 °C'deki hava sirkülasyonlu etüvde 120 saat (5 gün) bekletilmiş daha sonra deneylere tabi tutulmuştur (Şekil 4.68.).



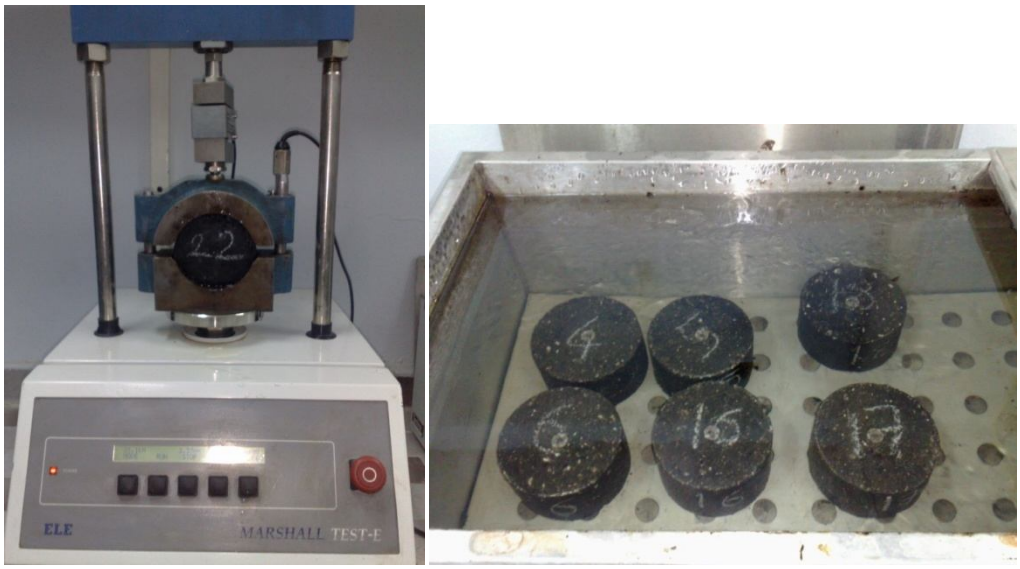
Şekil 4.68. Bitümlü sıcak karışım deney numunelerinin kısa ve uzun dönem yaşlandırılması

Saf ve atık sıvı lastik katkılı bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall Stabilite ve akma deneyi ile nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall Stabilitesi deneyi yapılmıştır. Karışım numuneleri gradasyona uygun olarak optimum bitüm içeriklerinde hazırlanmıştır (Şekil 4.69.).



Şekil 4.69. Kalıcı Marshall Stabilitesi için hazırlanan deney numuneleri

Numunelere daha sonra koşullandırma işlemi yapılmıştır. Normal Marshall Stabilite ve akma deneyinde numuneler 60 °C suda 40 dakikada bekletilmiştir (Şekil 4.70.).



Şekil 4.70. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılan karışımların Marshall stabilite deneyi

24 saat 60 °C suda bekletilen numunelerin Marshall değerinin normal Marshall değerine oranlanması ile kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS) değerleri belirlenmiştir. Marshall deneylerinde kullanılacak karışım numunelerinin isimlendirilmesi Çizelge 4.28'de verilmiştir.

Çizelge 4.28. Marshall deneylerinde kullanılacak karışım numuneleri

Karışımın Türü	Adı	Simgesi
Kısa süre yaşlandırılmış, 60 ^{o}C suda 40 dakika bekletilmiş	Kısa süre yaşlandırılmış, Normal	KN
Kısa süre yaşlandırılmış, 60 ^{o}C suda 24 saat bekletilmiş	Kısa süre yaşlandırılmış, Koşullandırılmış	KŞ
Uzun süre yaşlandırılmış, 60 ^{o}C suda 40 dakika bekletilmiş	Uzun süre yaşlandırılmış, Normal	UN
Uzun süre yaşlandırılmış, 60 ^{o}C suda 24 saat bekletilmiş	Uzun süre yaşlandırılmış, Koşullandırılmış	UŞ

4.7.2. Kısa süreli yaşlandırılmış numunelerin Marshall deney sonuçları

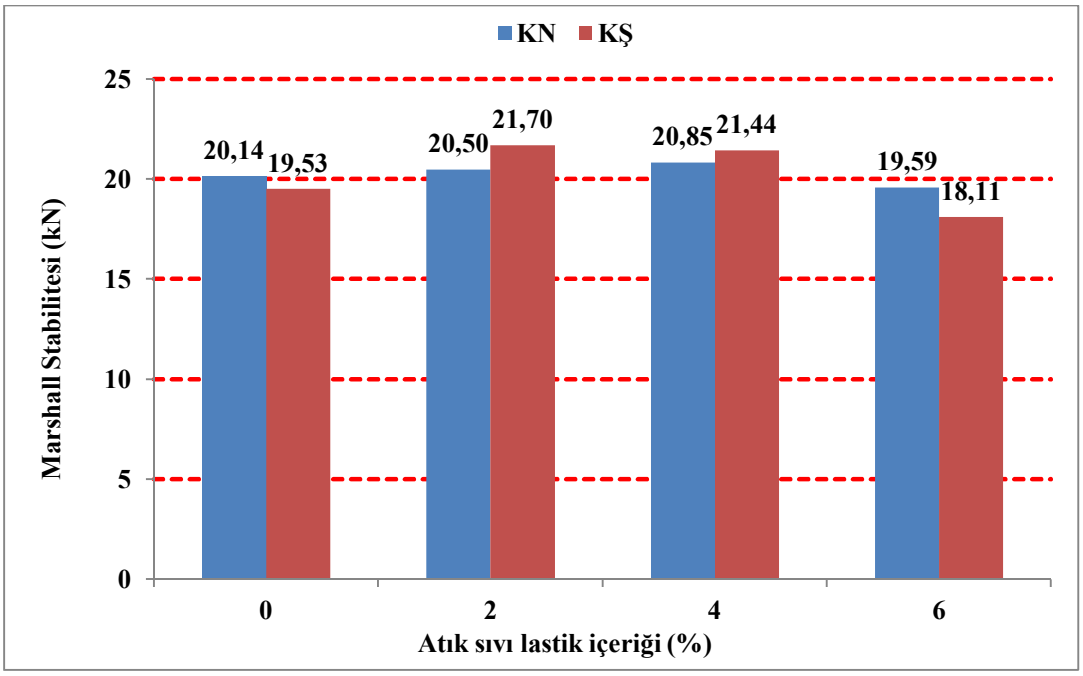
Saf ve atık sıvı lastik katkılı, kısa süreli yaşlandırılmış, koşullandırılmamış ve koşullandırılmış bitümlü sıcak karışım numunelerine uygulanan Marshall Stabilite ve akma deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.29. ve Çizelge 4.30'da verilmiştir. Ayrıca koşullandırma işleminden önce ve sonra Marshall Stabilite değerlerinin atık sıvı lastik katkısının, artışı ile değişimi Şekil 4.71'de verilmiştir.

Çizelge 4.29. Kısa süreli yaşlandırılmış, koşullandırılmamış (KN) numunelerin Marshall sonuçları

Atık sıvı lastik içeriği %	Numune No	h_1, (mm)	h_2, (mm)	h_3, (mm)	h_{ort}, (mm)	Stabilite, (kN)	Akma, (mm)	Düzeltme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite, (kN)	MQ, (kN/mm)
0	1	62,94	63,37	63,10	63,14	21,20	5,13	1,0082	21,37	**4,02**
	2	67,89	67,72	68,30	67,97	22,20	4,76	0,8991	19,96	
	3	63,99	64,78	65,61	64,79	19,70	5,15	0,9689	19,09	
	Ortalama						**5,01**		**20,14**	
2	4	64,00	63,43	64,08	63,84	21,60	3,39	0,9908	21,40	**5,33**
	5	63,52	63,35	63,79	63,55	18,60	4,36	0,9977	18,56	
	6	63,54	64,10	63,64	63,76	21,70	3,79	0,9927	21,54	
	Ortalama						**3,85**		**20,50**	
4	7	64,07	64,18	64,51	64,25	20,70	2,99	0,9811	20,31	**6,87**
	8	63,06	64,48	63,59	63,71	21,50	3,48	0,9939	21,37	
	9	63,88	64,07	63,78	63,91	21,10	2,63	0,9891	20,87	
	Ortalama						**3,03**		**20,85**	
6	10	64,68	63,86	64,38	64,31	20,40	2,89	0,9798	19,99	**6,99**
	11	64,65	64,43	64,17	64,42	19,80	2,70	0,9773	19,35	
	12	64,36	63,91	63,90	64,06	19,70	2,81	0,9856	19,42	
	Ortalama						**2,80**		**19,59**	

Çizelge 4.30. Kısa süreli yaşlandırılmış ve koşullandırılmış (KŞ) numunelerin Marshall sonuçları

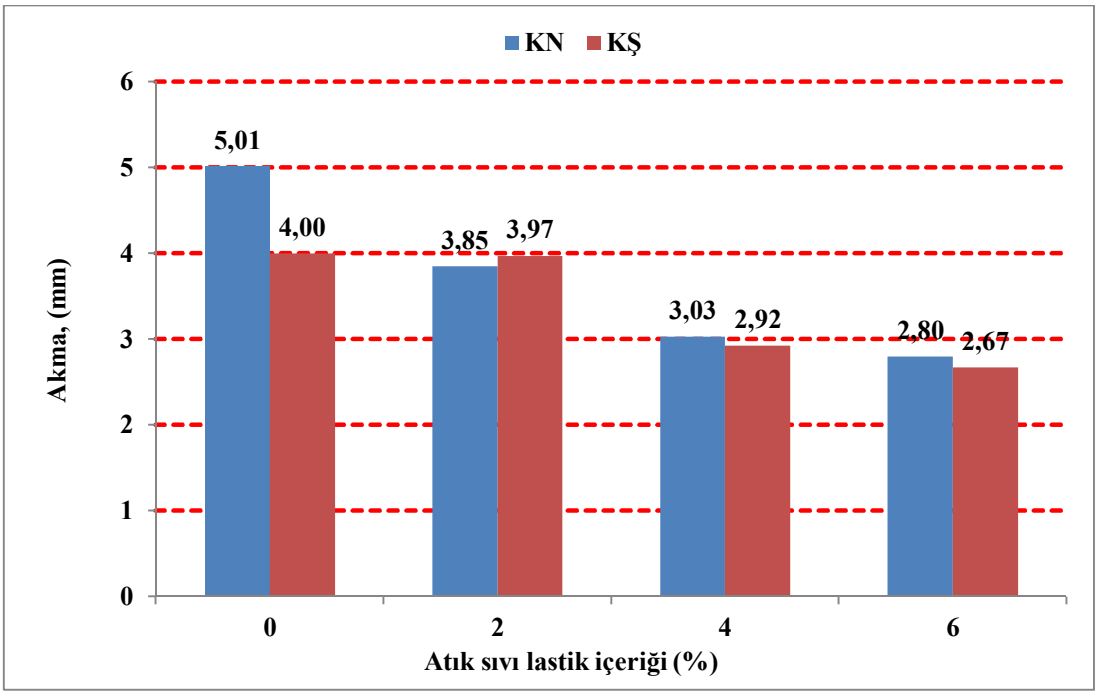
Atık sıvı lastik içeriği %	Numune No	h_1, (mm)	h_2, (mm)	h_3, (mm)	h_{ort}, (mm)	Stabilite, (kN)	Akma, (mm)	Düzeltme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite, (kN)	MQ, (kN/mm)	RMS, (%)
0	1	65,33	65,43	66,66	65,81	22,30	3,57	0,9473	21,12	**5,09**	**96,95**
	2	63,93	63,31	65,60	64,28	20,60	3,93	0,9804	20,20		
	3	63,31	63,25	62,74	63,10	17,10	4,01	1,0091	17,26		
	Ortalama						**3,84**		**19,53**		
2	4	65,12	65,51	65,30	65,31	20,70	3,91	0,9578	19,83	**5,47**	**105,88**
	5	63,68	64,24	64,13	64,02	20,80	3,20	0,9866	20,52		
	6	64,25	63,99	64,29	64,18	25,20	4,80	0,9828	24,77		
	Ortalama						**3,97**		**21,70**		
4	7	63,51	64,02	64,14	63,89	22,30	2,40	0,9896	22,07	**7,34**	**102,86**
	8	64,54	64,42	64,27	64,41	22,20	3,39	0,9775	21,70		
	9	63,22	62,90	62,72	62,95	20,30	2,98	1,0131	20,57		
	Ortalama						**2,92**		**21,44**		
6	10	63,13	63,16	63,87	63,39	19,00	2,74	1,0018	19,03	**6,77**	**92,48**
	11	64,66	64,34	65,07	64,69	18,10	2,64	0,9712	17,58		
	12	64,09	63,80	63,72	63,87	17,90	2,64	0,9900	17,72		
	Ortalama						**2,67**		**18,11**		



Şekil 4.71. KN ve KŞ karışımlarının atık sıvı lastik içeriği ile Marshall Stabilite değişimi

Şekil 4.71. incelendiğinde koşullandırma işleminden önce atık sıvı lastik içeriği artıkça stabilite değerlerinde düzensiz bir artış meydana gelmiştir. Saf ve %2, %4, %6 oranında atık sıvı lastik içeren karışımların stabilite değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. En yüksek stabilite değeri ise %4 atık sıvı lastik içeren karışımda görülmüştür.

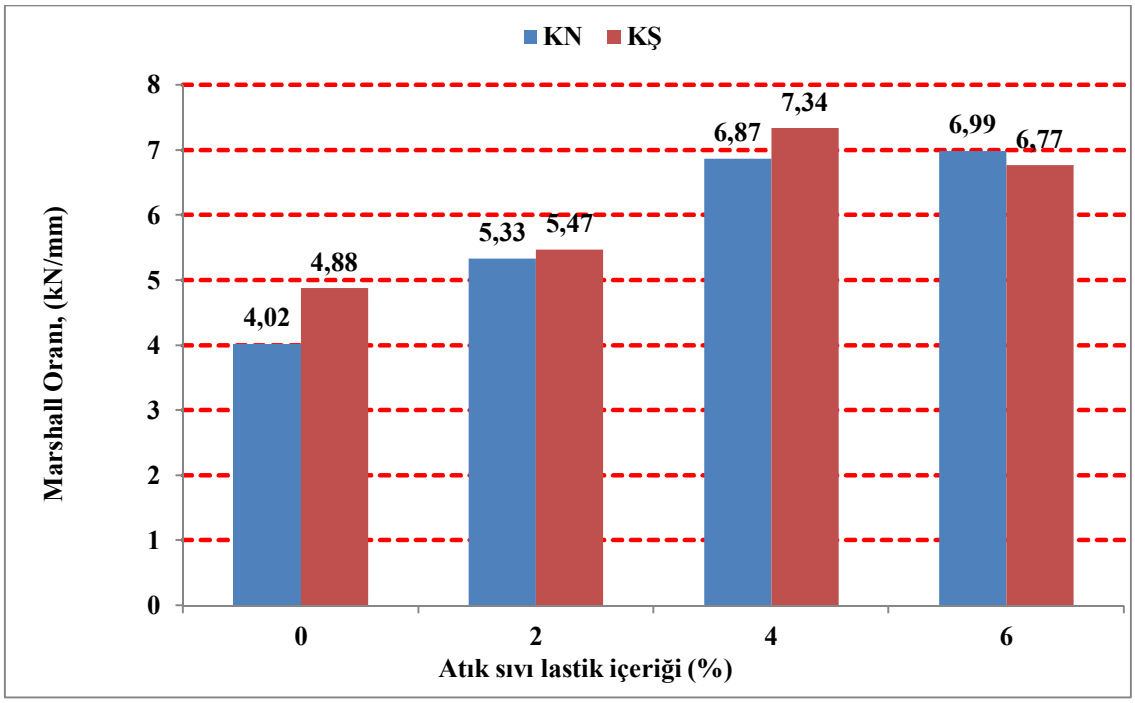
Ayrıca koşullandırma işleminden sonra atık sıvı lastik içeriğinin artışıyla stabilite değerlerinin düzenli şekilde artığı tespit edilmiştir. Koşullandırma işleminden sonra en yüksek stabiliteye %2 atık sıvı lastik içeren karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %2 atık sıvı lastik kullanılması durumunda stabilite değerinin saf karışıma göre %11 oranında artığı tespit edilmiştir. Kısa süreli yaşlandırılmış karışımların akma değerlerinin atık sıvı lastik içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 4.72'de verilmiştir.



Şekil 4.72. KN ve KŞ karışımlarının atık sıvı lastik içeriği ile akma değerlerinin değişimi

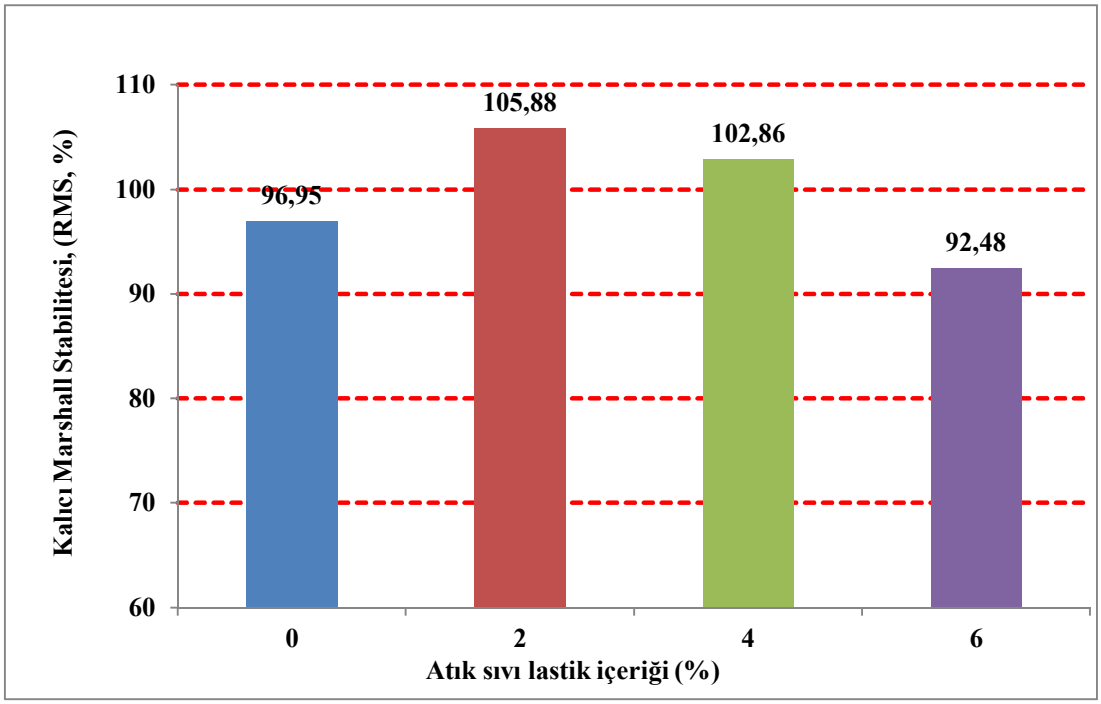
Koşullandırılmamış karışımların akma değerleri incelendiğinde atık sıvı lastik içeriğinin artışıyla bir azalma görülmüştür. Koşullandırılmış karışımların akma değerlerinin değişimi, koşullandırılmamış karışımlarla benzer özellik göstermiştir. Koşullandırılmamış karışımlar ve koşullandırılmış karışımlar içerisinde en yüksek akma değerlerine saf karışımda rastlanmıştır. En düşük akma değeri ise her iki durumda ağırlıkça %6 atık sıvı lastik içeren karışımda gözlenmiştir. Marshall stabilite değerinin akma değerine bölümünden elde edilen Marshall Oranı (MQ) değerlerinin atık sıvı lastik içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 4.73'de verilmiştir.

Marshall Oranı (MQ) değerleri incelendiğinde koşullandırma işleminden önce ve sonra atık sıvı lastik içeriğindeki artış ile MQ değerlerinde düzenli bir artış gözlenmiştir. Koşullandırma işleminden önce en yüksek MQ değerine ağırlıkça %6 atık sıvı lastik içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma işleminden sonra en yüksek MQ değerine ağırlıkça %4 atık sıvı lastik içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum koşullandırma işleminden sonra atık sıvı lastik içeren karışımların saf karışımlara göre kalıcı deformasyonlara karşı dayanımlarının daha yüksek olacağını göstermektedir. Koşullandırma öncesinde %6 atık sıvı lastik kullanılması durumunda MQ değerinde %74 artış meydana gelirken, koşullandırma işlemi sonrasında %4 atık sıvı lastik içeren karışımda %50 oranında saf karışımın MQ değerine göre artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.73. KN ve KŞ karışımlarının atık sıvı lastik içeriği ile Marshall Oranı (MQ) değişimi

Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall Stabilitesi değerlerinin atık sıvı lastik içeriğinin artışı ile değişimi ise Şekil 4.74'de verilmiştir.



Şekil 4.74. Kısa süreli yaşlandırılmış karışımlarının atık sıvı lastik içeriği ile RMS değişimi

Koşullandırılmış numunelerin Marshall Stabilite değerlerinin ortalamasının koşullandırılmamış numunelerin Marshall Stabilite değerlerinin ortalamalarına oranlanması sonucu elde edilen kalıcı Marshall Stabilitesi değerleri incelendiğinde atık sıvı lastik içeriği artıkça kalıcı Marshall Stabilitesi değerlerinin artığı belirlenmiştir. En yüksek kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS) değerine ağırlıkça %2 atık sıvı lastik içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

Ağırlıkça %2 atık sıvı lastik içeren karışımın kalıcı Marshall Stabilitesi değerinin saf karışıma göre %9 oranında artığı belirlenmiştir. Bu durum atık sıvı lastik kullanımının bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımını artırdığını özellikle %2 ve %4 oranında atık sıvı lastik kullanımının nem hasarına karşı dayanımda daha etkin olduğunu göstermektedir.

4.7.3. Uzun süreli yaşlandırılmış numunelerin Marshall deney sonuçları

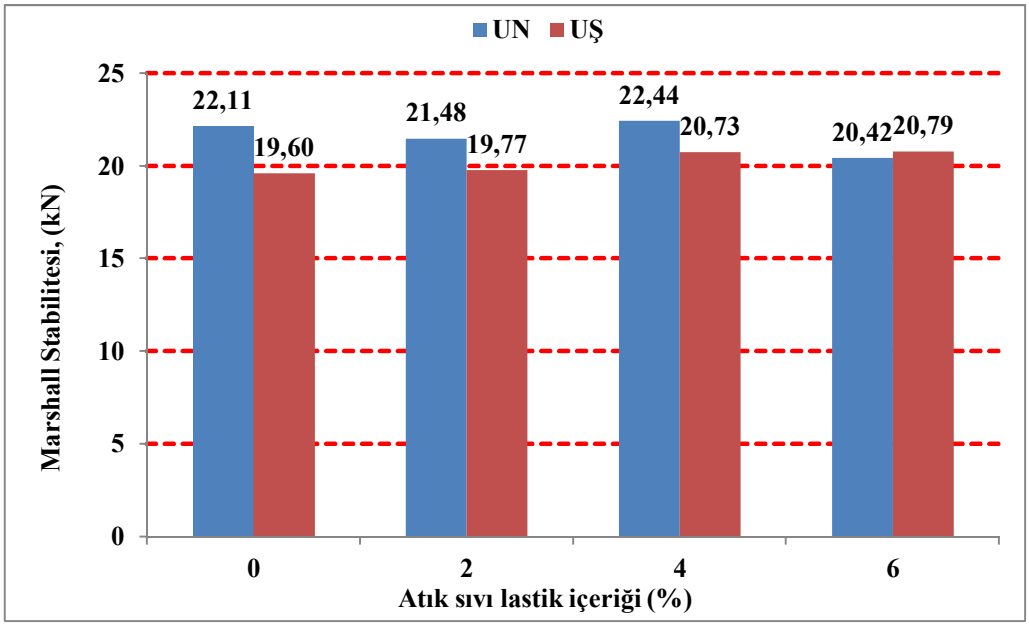
Saf ve atık sıvı lastik içeren uzun süreli yaşlandırılmış bitümlü sıcak karışım numunelerine (UN-UŞ) uygulanan Marshall Stabilite ve akma deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.31. ve Çizelge 4.32'de verilmiştir. Ayrıca uzun süreli yaşlandırılmış karışımların koşullandırma işleminden önce ve sonra Marshall Stabilite değerlerinin atık sıvı lastik içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 4.75'de verilmiştir.

Çizelge 4.31. Uzun süreli yaşlandırılmış koşullandırılmamış (UN) numunelerinin Marshall sonuçları

Atık sıvı lastik içeriği %	Numune No	h_1, (mm)	h_2, (mm)	h_3, (mm)	h_{ort}, (mm)	Stabilite, (kN)	Akma, (mm)	Düzeltme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite, (kN)	MQ, (kN/mm)
0	1	63,86	64,11	64,39	64,12	22,30	2,99	0,9841	21,95	**7,14**
	2	65,44	65,78	65,20	65,47	23,50	2,67	0,9543	22,43	
	3	64,41	64,85	64,25	64,50	22,50	3,63	0,9754	21,95	
	Ortalama						**3,10**		**22,11**	
2	4	63,80	63,89	63,92	63,87	22,50	3,74	0,9900	22,28	**5,77**
	5	64,69	65,25	65,07	65,00	21,50	3,92	0,9643	20,73	
	6	64,65	64,37	64,59	64,54	22,00	3,51	0,9746	21,44	
	Ortalama						**3,72**		**21,48**	
4	7	64,15	64,00	64,02	64,06	21,80	3,74	0,9856	21,49	**6,11**
	8	64,37	63,48	64,12	63,99	23,60	3,55	0,9872	23,30	
	9	65,17	65,06	64,97	65,07	23,40	3,73	0,9630	22,53	
	Ortalama						**3,67**		**22,44**	
6	10	64,00	64,06	63,85	63,97	21,50	3,05	0,9877	21,23	**5,70**
	11	64,19	63,51	63,74	63,81	20,30	3,72	0,9914	20,13	
	12	64,20	64,05	64,69	64,31	20,30	3,97	0,9797	19,89	
	Ortalama						**3,58**		**20,42**	

Çizelge 4.32. Uzun süreli yaşlandırılmış ve koşullandırılmış (UŞ) numunelerinin Marshall sonuçları

Atık sıvı lastik içeriği %	Numune No	h_1, (mm)	h_2, (mm)	h_3, (mm)	h_{ort}, (mm)	Stabilite, (kN)	Akma, (mm)	Düzeltme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite, (kN)	MQ, (kN/mm)	RMS, (%)
0	1	64,20	65,49	64,09	64,59	19,60	3,81	0,9734	19,08	**4,93**	**88,66**
	2	58,44	58,73	58,85	58,67	19,10	3,38	1,1422	21,82		
	3	70,41	71,28	71,03	70,91	22,70	4,73	0,7889	17,91		
	Ortalama						**3,97**		**19,60**		
2	4	64,36	64,50	65,85	64,90	19,30	3,67	0,9665	18,65	**5,66**	**92,04**
	5	64,92	65,04	64,55	64,84	21,50	3,42	0,9680	20,81		
	6	65,43	65,42	65,51	65,45	20,80	3,39	0,9547	19,86		
	Ortalama						**3,49**		**19,77**		
4	7	64,07	63,86	63,72	63,88	20,60	3,48	0,9897	20,39	**5,99**	**92,40**
	8	64,59	64,28	64,60	64,49	21,50	3,52	0,9757	20,98		
	9	63,92	63,13	63,70	63,58	20,90	3,38	0,9970	20,84		
	Ortalama						**3,46**		**20,73**		
6	10	63,76	64,20	64,30	64,09	21,10	3,33	0,9849	20,78	**6,32**	**101,81**
	11	64,57	64,65	64,80	64,67	21,70	3,10	0,9716	21,08		
	12	63,99	64,14	63,49	63,87	20,70	3,43	0,9900	20,49		
	Ortalama						**3,29**		**20,78**		

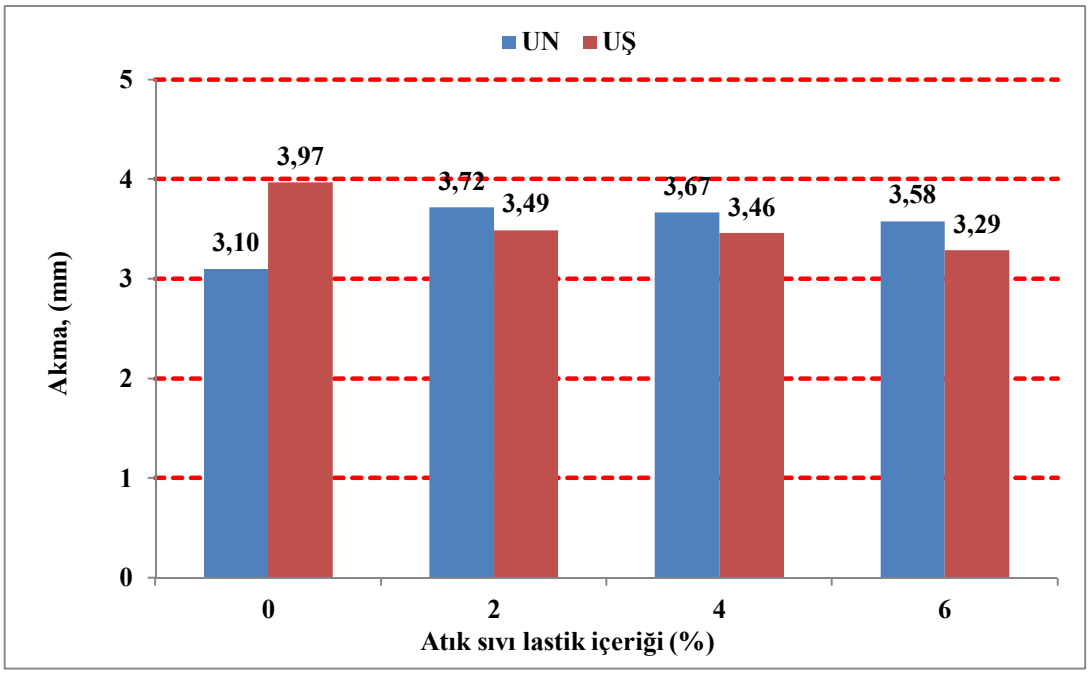


Şekil 4.75. UN ve UŞ karışımlarının atık sıvı lastik içeriği ile Marshall Stabilite değişimi

Şekil 4.75'de görüldüğü üzere uzun süreli yaşlandırılmış karışımlarda koşullandırma işleminden önce atık sıvı lastik içeriği artıkça Marshall Stabilite değerlerinde düzensiz bir azalma ve artış meydana gelmiştir. Saf ve atık sıvı lastik içeren karışımların Marshall Stabilite değerlerinin birbirine yakın ve 20 kN değerinin

üzerinde olduğu tespit edilmiştir. En yüksek Marshall Stabilite değerine ise %4 atık sıvı lastik içeren karışımda rastlanılmıştır.

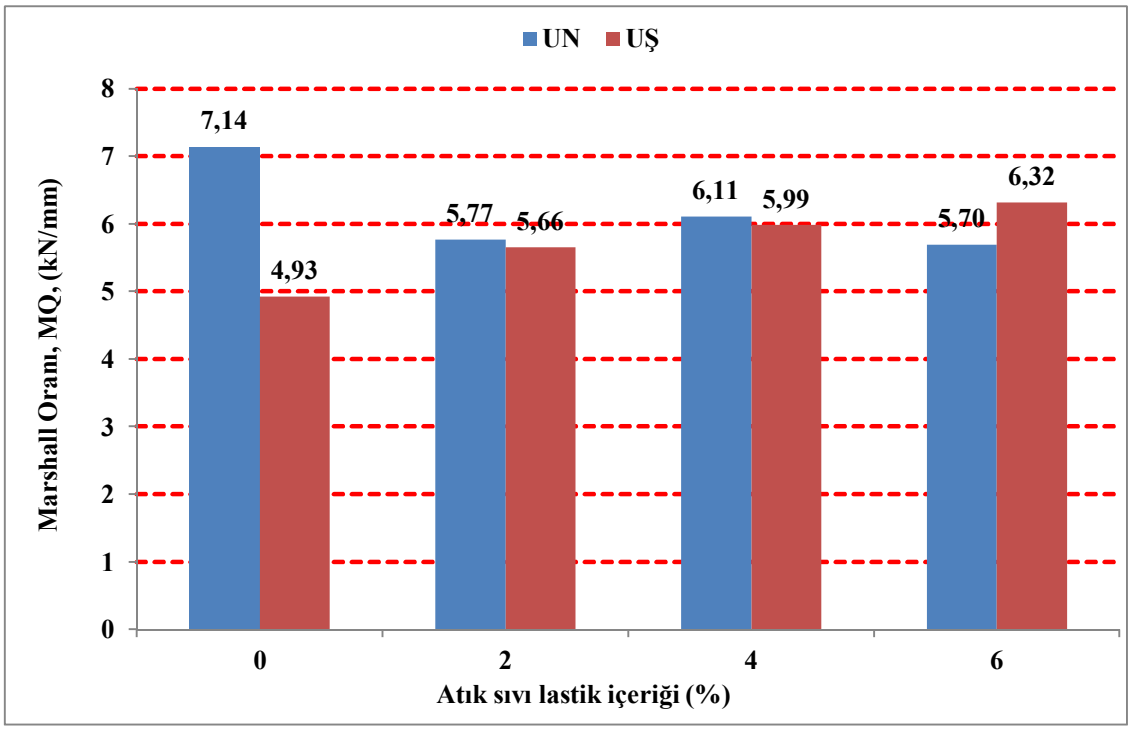
Koşullandırma işlemi nedeniyle stabilite değerlerinde bir miktar azalma meydana gelmiştir. Kısa süreli yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi uzun süreli yaşlandırılmış karışımlarda da koşullandırma işleminden sonra atık sıvı lastik içeriğinin artışıyla Marshall Stabilite değerlerinin düzenli bir şekilde artığı tespit edilmiştir. Koşullandırma işleminden sonra en yüksek stabiliteye %6 atık sıvı lastik içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %6 atık sıvı lastik kullanılması durumunda stabilite değerinin saf karışıma göre %6 oranında artığı tespit edilmiştir. Kısa süreli yaşlandırılmış karışımların akma değerlerinin atık sıvı lastik içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 4.76'da verilmiştir.



Şekil 4.76. UN ve UŞ karışımlarının atık sıvı lastik içeriği ile akma değerlerinin değişimi

Koşullandırılmamış karışımların akma değerleri incelendiğinde atık sıvı lastik içeriğinin artışıyla düzensiz bir değişim gözlenmiştir. Koşullandırma öncesinde en az akma değerine saf karışımda rastlanılmıştır. Koşullandırılmış karışımlar içerisinde en yüksek akma değeri saf karışımda gözlenirken en düşük akma değerleri kısa süreli yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi %6 oranında atık sıvı lastik içeren karışımda gözlenmiştir. Atık sıvı lastik içeren bütün karışımların akma değeri saf karışımdan daha düşük çıkmıştır.

Marshall Stabilite değerinin akma değerine bölümünden elde edilen Marshall Oranı (MQ) değerlerinin atık sıvı lastik içeriğinin artışı ile değişimi Şekil 4.77'de verilmiştir.

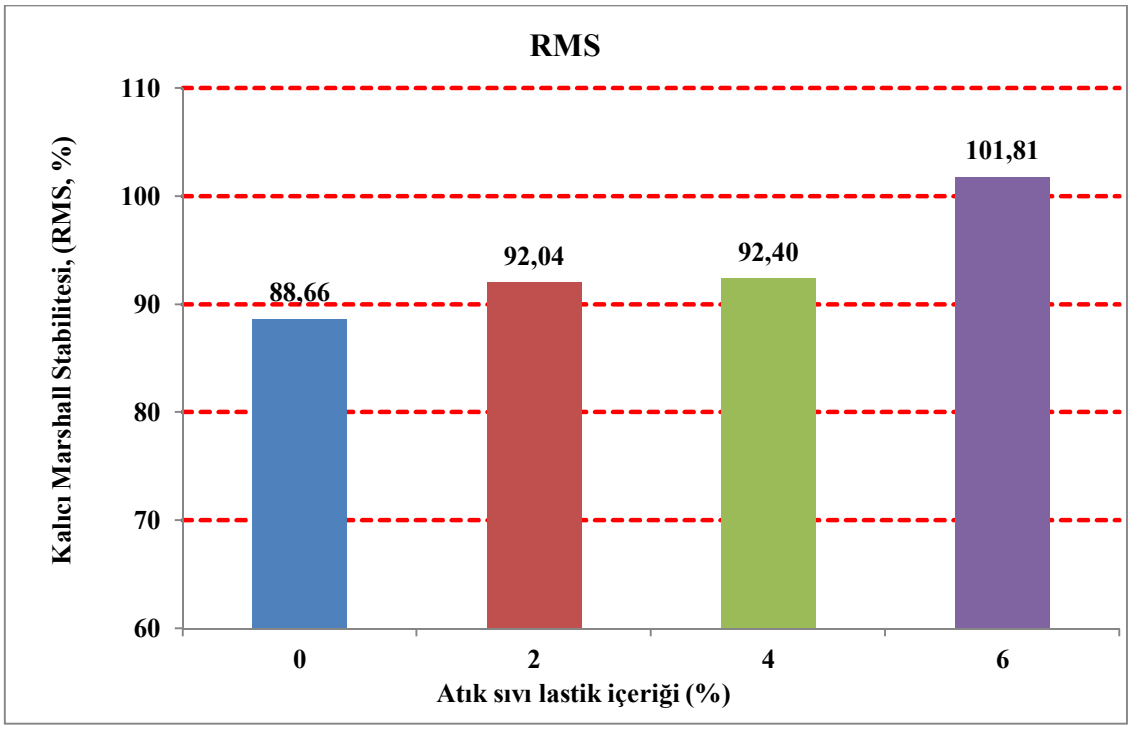


Şekil 4.77. UN ve UŞ karışımlarının atık sıvı lastik içeriği ile Marshall oranı (MQ) değişimi

Marshall Oranı (MQ) değerleri incelendiğinde, uzun süreli yaşlandırılmış karışımlarda koşullandırma işleminden önce atık sıvı lastik içeriğinin artışı ile MQ değerlerinde düzensiz bir azalma gözlenirken, koşullandırma işleminden sonra düzenli bir artış gözlenmiştir. Koşullandırma işleminden önce en yüksek MQ değerine saf karışımın sahip olduğu, daha sonra ise %4 atık sıvı lastik içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir.

Koşullandırma işlemi nedeniyle bütün karışımların MQ değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. Koşullandırma işleminden sonra en yüksek MQ değerine %6 atık sıvı lastik içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma işleminden sonra atık sıvı lastik içeren karışımların saf karışımlara göre kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının daha yüksek olacağını göstermektedir. Koşullandırma sonrasında %6 atık sıvı lastik içeren karışımın %28 oranında saf karışımın MQ değerine göre artış meydana gelmiştir.

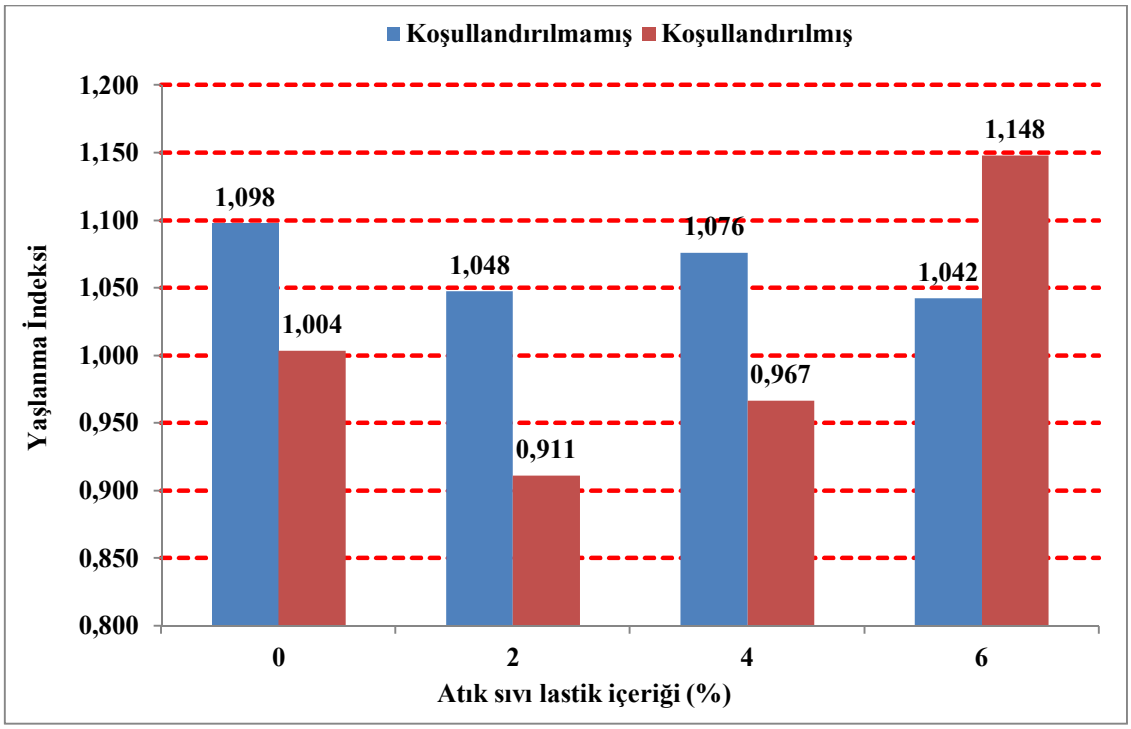
Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall Stabilitesi değerlerinin atık sıvı lastik içeriğinin artışı ile değişimi ise Şekil 4.78'de verilmiştir.



Şekil 4.78. Uzun süreli yaşlandırılmış karışımların atık sıvı lastik içeriği ile RMS değişimi

Kalıcı Marshall Stabilitesi değerleri incelendiğinde atık sıvı lastik içeriği artıkça kalıcı Marshall Stabilitesi değerlerinin artığı belirlenmiştir. Atık sıvı lastik içeren karışımların RMS değerleri %90 ve üzerinde çıkmıştır. Ağırlıkça %6 atık sıvı lastik içeren karışımın kalıcı Marshall Stabilitesi değerinin saf karışıma göre %15 oranında artığı belirlenmiştir. Bu durum atık sıvı lastik kullanımının bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımını artırdığını, kısa süreli yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi özellikle %4 ve %6 oranında atık sıvı lastik kullanımının nem hasarına karşı dayanımda daha etkin olduğunu göstermektedir.

Uzun süreli yaşlanmanın etkisini daha net bir şekilde gösterebilmek amacıyla yaşlanmadan sonraki Marshall Stabilite değerinin, yaşlanmadan önceki Marshall Stabilitesi değerine bölümüyle belirlenen "Yaşlanma İndeksi" değerlerinin atık sıvı lastik içeriği ile değişimi Şekil 4.79'da verilmiştir.



Şekil 4.79. Yaşlanma İndeksi değerlerinin atık sıvı lastik içeriği ile değişimi

Şekil 4.79'da görüldüğü üzere koşullandırılmamış karışımlarda en yüksek yaşlanma indeksi değeri saf karışımda görülürken en düşük yaşlanma indeksi değeri ağırlıkça %6 atık sıvı lastik içeren karışımlarda görülmüştür. Koşullandırma işlemi sonrasında ise en yüksek yaşlanma indeksi değerleri %6 atık sıvı lastik içeren karışımda daha sonra ise saf karışımda görülmüştür. En düşük yaşlanma indeksi değeri ise %2 atık sıvı lastik içeren karışımlarda görülmüştür. Koşullandırılmış %6 atık sıvı lastik içeren karışım dışında atık sıvı lastik içeren bütün karışım numunelerinin yaşlanma indeksi değerlerinin saf karışımdan düşük olduğu belirlenmiştir. Marshall Stabilite değerlerinden genel olarak atık sıvı lastik kullanımının uzun süreli yaşlanmanın etkilerini azalttığı söylenebilir.

4.8. Hamburg Tekerlek İzi Deneyi

Hamburg tekerlek izi cihazı, sıcak su içerisine batırılmış asfalt betonu numunelerinin yüzeyleri boyunca, çelik bir tekerleğin hareketiyle oluşan tekerlek izi ve su hasarının birleştirilmiş etkilerini ölçmektedir. Tekerlek geçiş sayısı 10.000'den sonra bazı karışım numunelerinin sudan dolayı hasara uğradıkları görülmüştür. Şekil.4.80'de görülen cihaz 1970'de Esso A.G. tarafından Hamburgda geliştirilmiştir (Romero ve Stuart, 1998).



Şekil 4.80. Hamburg tekerlek izi cihazı

Hamburg tekerlek izi deneyinde numuneler, kalıbın üst kenarıyla aynı yükseklikte olmalıdır. İhtiyaç duyulursa, numunenin altına konulması için çelik plakalar kullanılabilir. Kalıplar çelik plaka üzerine konulur. Hamburg tekerlek izi deneyinde en çok kullanılan deney sıcaklığı 50 ºC'dir. Temelde kullanılacak karışımlar için 40 ºC kullanılır. Su sıcaklığı 45 dakikada 50 ºC'ye ulaşır. Numuneler en az 30 dk deney sıcaklığında koşullandırılır ve suyun sıcaklığı sabit tutulur. Tekerlek izi derinliği otomatik ve sürekli olarak 0,01 mm hassasiyetle ölçülür. Her bir 20, 50, 100 veya 200 geçişte oluşan tekerlek izi derinlikleri alınabilir. 20.000 tekerlek geçişi yaklaşık 6,5 saat sürer. Bununla birlikte, numunelerin birindeki tekerlek izi derinliği 30 mm'yi aşarsa, cihaz otomatik olarak durmaktadır (URL:8).

Tekerlek izi cihazlarının geliştirilmesindeki amaçlar; karışımların tekerlek izi oluşum potansiyellerini incelemek, farklı karışımların performanslarını karşılaştırmak, performans ölçütlerini belirlemek ve arazide oluşabilecek tekerlek izi miktarlarını

tahmin etmektir. Deney koşullarının, malzemelerin ve bölgesel şartların farklı olmasından dolayı, her ülke kendine ait farklı bir performans ölçütü belirlemiştir;

APA : 8mm / 8000 devir

Hamburg :10mm/20000 devir

LCPC :10mm/30000 devir

Deneylerin kuru ve su içerisinde yapılabilmesi, silindirik ve plak numunelerin kullanılabilmesi, APA ve Hamburg tekerlek izi cihazlarının üstün yönleridir. (Kutluhan ve Ağar, 2004).

4.8.1. Tekerlek izi deneyi ve tekerlek izi miktarlarının değerlendirilmesi

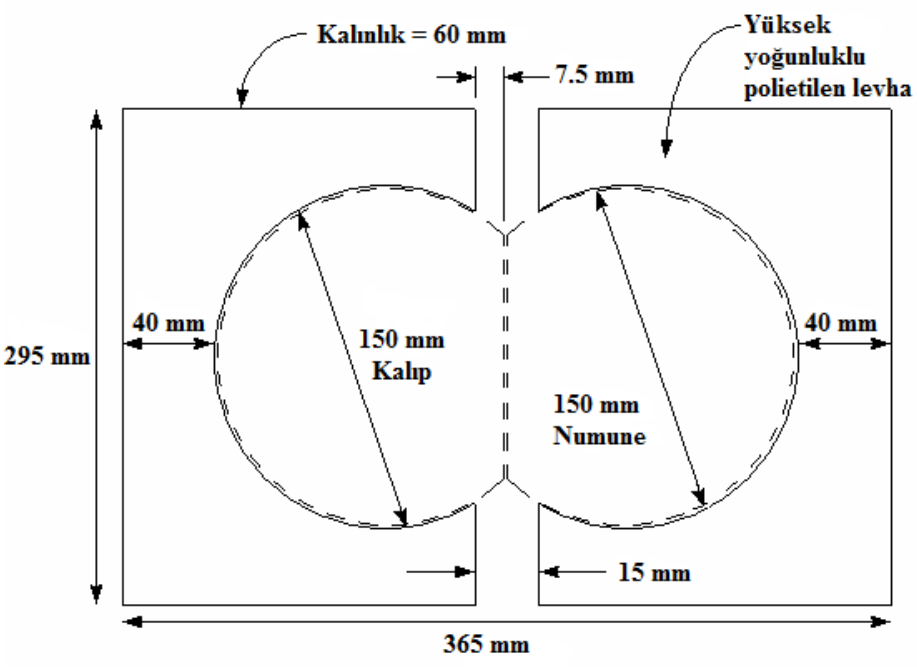
Çalışmada Şekil 4.81'de görülen, 112M116 numaralı "Piroliz Yöntemi Kullanılarak Sıvılaştırılmış Atıklar İle Modifiye Edilen Bitümlü Karışımların Mühendislik Özellikleri" başlıklı proje kapsamında TÜBİTAK desteği ile alınan Controls marka "GYROCOMP, Gyratory Compactor" yoğurmalı sıkıştırıcı ile numuneler hazırlanmıştır.



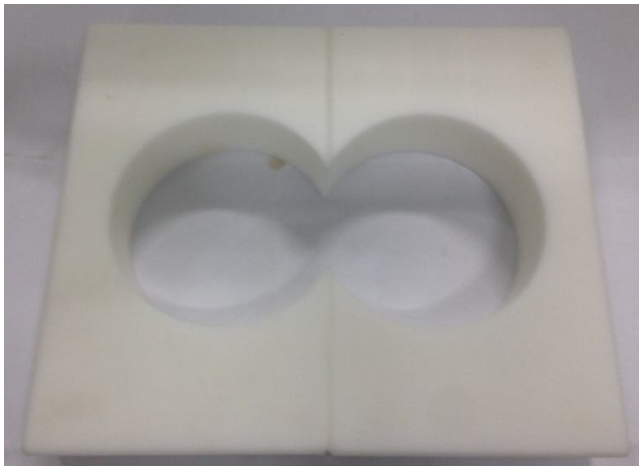
Şekil 4.81. Gyrocomp yoğurmalı sıkıştırıcı

Saf ve atık sıvı lastik katkılı bitümlü sıcak karışım numuneleri, gradasyona uygun olarak optimum bitüm içeriklerinde % 4-7 hava boşluğuna sahip olacak şekilde

16 adet numune hazırlanmıştır. Yoğurmalı sıkıştırıcıda hazırlanan 150 mm çapa sahip numuneler için aşağıda Şekil 4.82. ve Şekil 4.83'de görülen tekerlek izi numune kalıbı referans alınmıştır.



Şekil 4.82. Hamburg tekerlek izi cihazı test numune kalıbının üstten görünümü



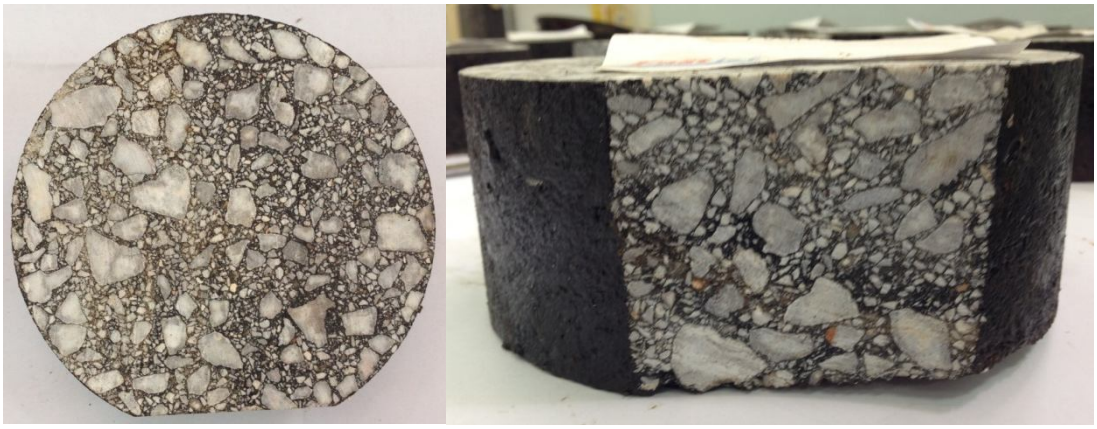
Şekil 4.83. PAVELAB DWT Tekerlek izi numune kalıbı

Yoğurmalı sıkıştırıcıda hazırlanan 150 mm çapa sahip numuneler, önce tekerlek izi deneyi için Şekil 4.84'de görülen asfalt kesme makinesinde 60 mm kalınlık ve numune kenarlarından 7.5 mm kesilerek uygun boyutlara getirilmiştir.



Şekil 4.84. Asfalt kesme makinesi

Şekil 4.85'de görülen numuneler referans kalıbına uygun hale getirildikten sonra kesin boyutları dijital kumpas ile hassas bir şekilde ölçülmüştür. Ayrıca Dp (pratik birim hacim ağırlık) belirlenmiştir.



Şekil 4.85. Referans kalıba uygun hale getirilen numuneler ve kesitleri

Tekerlek izi deneyleri için Şekil 4.86'da görülen 112M116 numaralı "Piroliz Yöntemi Kullanılarak Sıvılaştırılmış Atıklar İle Modifiye Edilen Bitümlü Karışımların Mühendislik Özellikleri" başlıklı proje kapsamında TÜBİTAK desteği ile alınan, Controls marka "77-PV31A05 PAVELAB DWT Hamburg Type double wheel tracker" tipi deney cihazı kullanılmıştır. Tekerlek izi deneyinde aynı anda iki numune test edilebilmektedir.



Şekil 4.86. PAVELAB DWT Hamburg tekerlek izi cihazı

Deneyler, yollarda görülebilecek ortam ve hizmet (servis) sıcaklığı olarak, 50 ºC sıcaklıkta yapılmıştır. Başlangıçta karışımın pekleşmesi ve düzgün bir yüzeye sahip olması için 25 ºC'de 1000 devir uygulanmıştır. Saf ve atık sıvı lastik katkılı bitümlü sıcak karışım numuneleri 30 dakika test sıcaklığında suda bekletilerek koşullandırılmıştır. Hızı 26 devir/dakika olan tekerlere 705 N yük uygulanmıştır. Bozulma kriteri olarak 20 mm deformasyona ulaşmak için gerekli minimum tekerlek geçiş sayısı uygulanmıştır. Numunelerde meydana gelen tekerlek izi derinlikleri Şekil 4.86'da görülen sensör ile otomatik olarak ölçülmektedir.



Şekil 4.86. Hamburg tekerlek izi cihazı deformasyon ölçer sensör

PAVELAB DWT Hamburg tekerlek izi cihazında saf ve atık sıvı lastik katkılı bitümlü sıcak karışım numunelerinin deney öncesi ve deney sonrası durumları Şekil 4.87. ve Şekil 4.88'de verilmiştir.



Şekil 4.87. Tekerlek izi deneyi öncesi ve sonrası numunelerin durumu



Şekil 4.88. Tekerlek izi deneyi sonrası numuneler ve kesitleri

Trafik ve su etkisi asfalt betonu kaplamalarının bozulmasında en önemli faktörlerdendir. Tekerlek izi deneyinde, tekerlek geçişleri ile birlikte su hasarı da deformasyonların artmasında etkili olmuştur. Su, bitüm ile agrega arasındaki adezyonu zayıflatarak deformasyonları hızlandırmaktadır. Şekil 4.89'da bitümlü sıcak karışım numunelerinde tekerlek izi derinliği ve su hasarından kaynaklanan asfalt ve agreganın adezyon kaybı görülmektedir.



Şekil 4.89. Numunelerde oluşan tekerlek izi derinliği ve meydana gelen su hasarı

Deney başladıktan sonra, 30, 50, 100, 200, 300, 500, 1000, 2000, 3000 ve 5000 devirlerde otomatik sensörden alınan katkılı ve katkısız karışım numunelerinin 50 ºC'deki ortalama tekerlek izi derinlikleri Çizelge 4.28'de verilmiştir. Ayrıca, devirlere göre merkezi tekerlek izi derinliğinin, deneye başlamadan önce ölçülen numune kalınlığa bölümü ile bulunan tekerlek izi değerleri Çizelge 4.29'da verilmiştir.

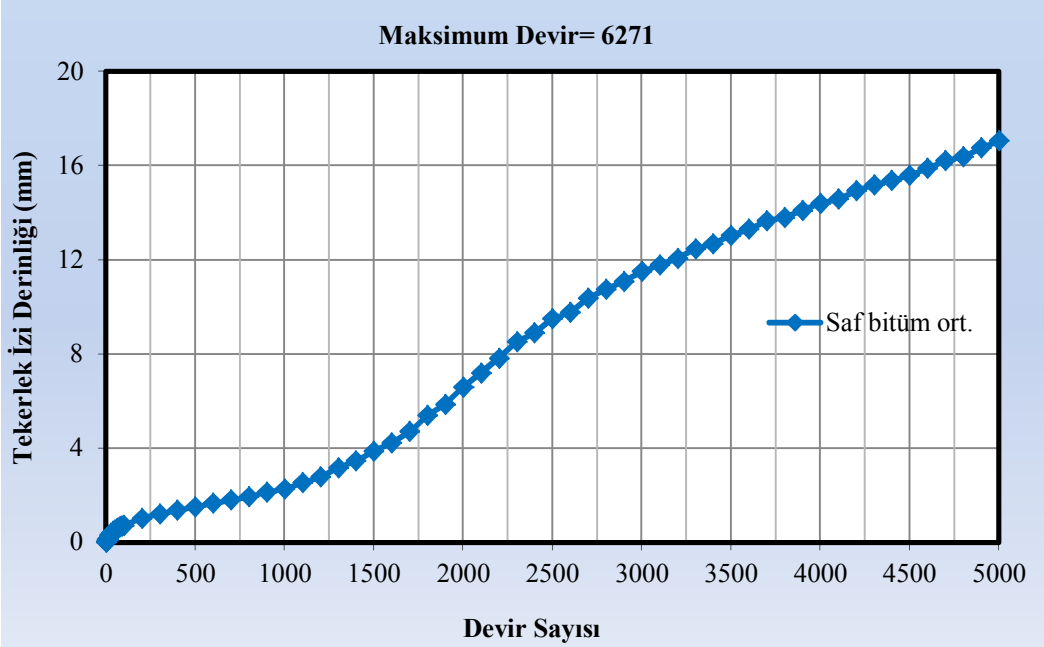
Çizelge 4.28. Katkılı ve katkısız karışım numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi derinlikleri (mm)

Karışım Tipi	Sıcaklık, ºC	Devir Sayıları										
		30	50	100	200	300	500	1000	2000	3000	4000	5000
Saf Bitüm	50	0,372	0,510	0,725	1,019	1,203	1,501	2,250	6,592	11,501	14,396	17,059
% 2 atık sıvı lastik	50	0,022	0,082	0,240	0,377	0,428	0,509	0,920	1,826	6,588	15,857	20,000
% 4 atık sıvı lastik	50	0,240	0,309	0,525	0,809	1,127	1,902	5,164	14,379	20,000	20,000	20,000
% 6 atık sıvı lastik	50	0,302	0,462	0,686	0,849	1,051	3,031	7,949	18,873	20,000	20,000	20,000

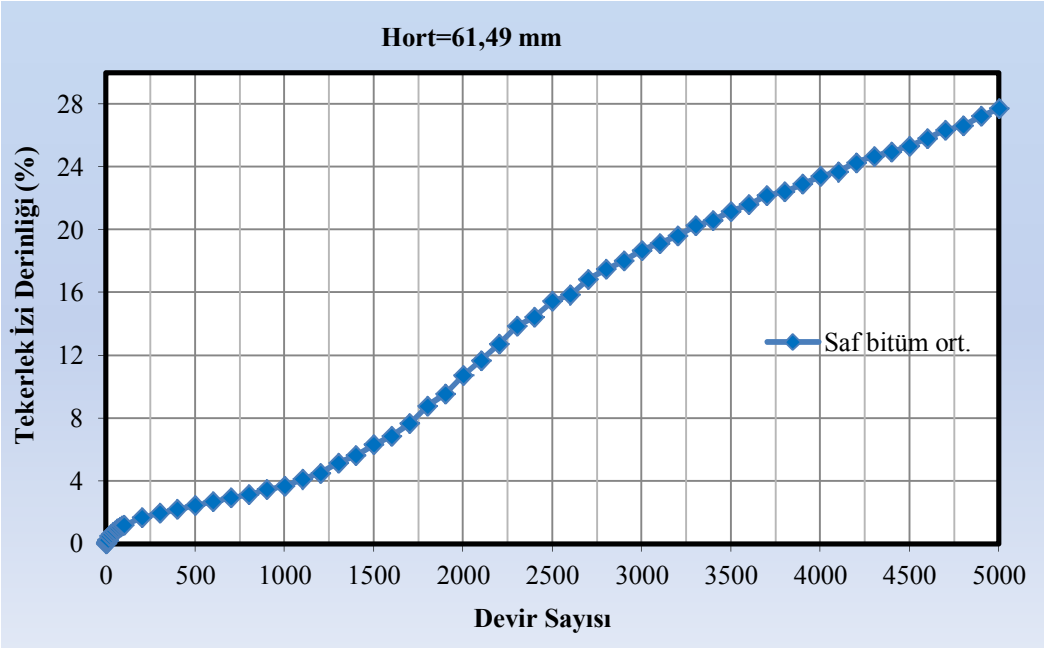
Çizelge 4.29. Katkılı ve katkısız karışım numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri (%)

Karışım Tipi	Numune Kalınlığı, mm	Devir Sayıları										
		30	50	100	200	300	500	1000	2000	3000	4000	5000
Saf Bitüm	61,49	0,606	0,830	1,178	1,658	1,957	2,441	3,659	10,721	18,703	23,412	27,742
% 2 atık sıvı lastik	62,57	0,034	0,131	0,384	0,602	0,685	0,813	1,471	2,918	10,529	25,343	31,492
% 4 atık sıvı lastik	62,48	0,384	0,495	0,840	1,296	1,804	3,044	8,266	23,014	30,858	30,858	30,858
% 6 atık sıvı lastik	62,36	0,484	0,741	1,099	1,361	1,685	4,860	12,747	30,265	31,441	31,441	31,441

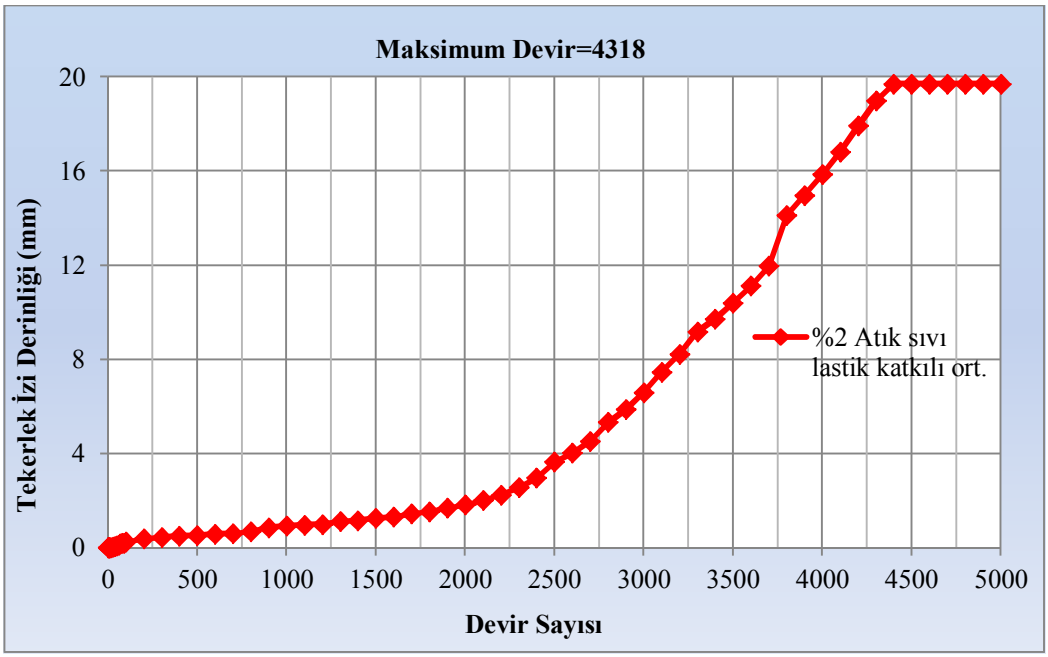
Çalışmada, katkılı ve katkısız bitümlü sıcak karışım tiplerinin PAVELAB DWT Hamburg tekerlek izi cihazında incelenen tekerlek izi oluşma potansiyelleri 50 ºC sıcaklıklar esas alınarak karşılaştırılmıştır. Karışımların 50 ºC sıcaklıklardaki tekerlek izi performansları ve tekerlek izi yüzdeleri aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.91.-4.98.) görülmektedir.



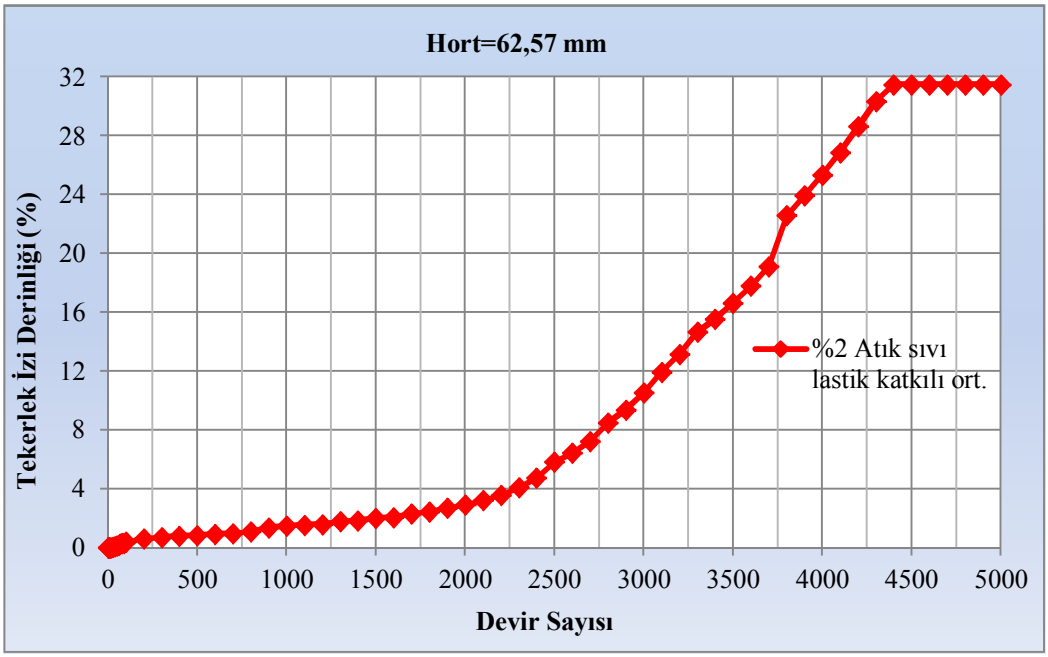
Şekil 4.91. Saf bitüm numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi derinlikleri (mm)



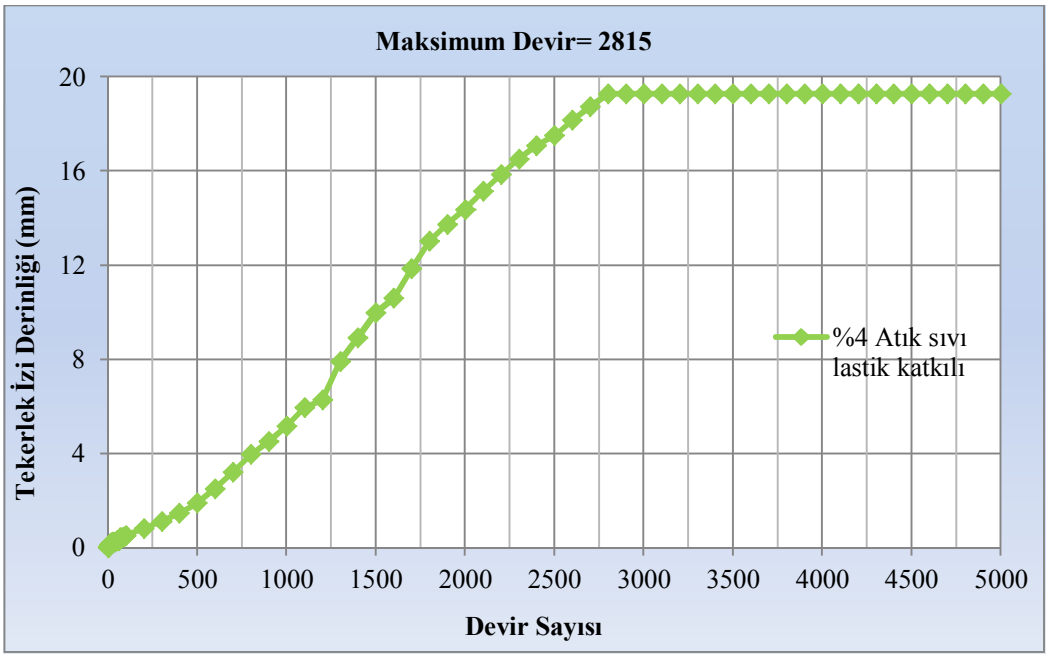
Şekil 4.92. Saf bitüm numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri (%)



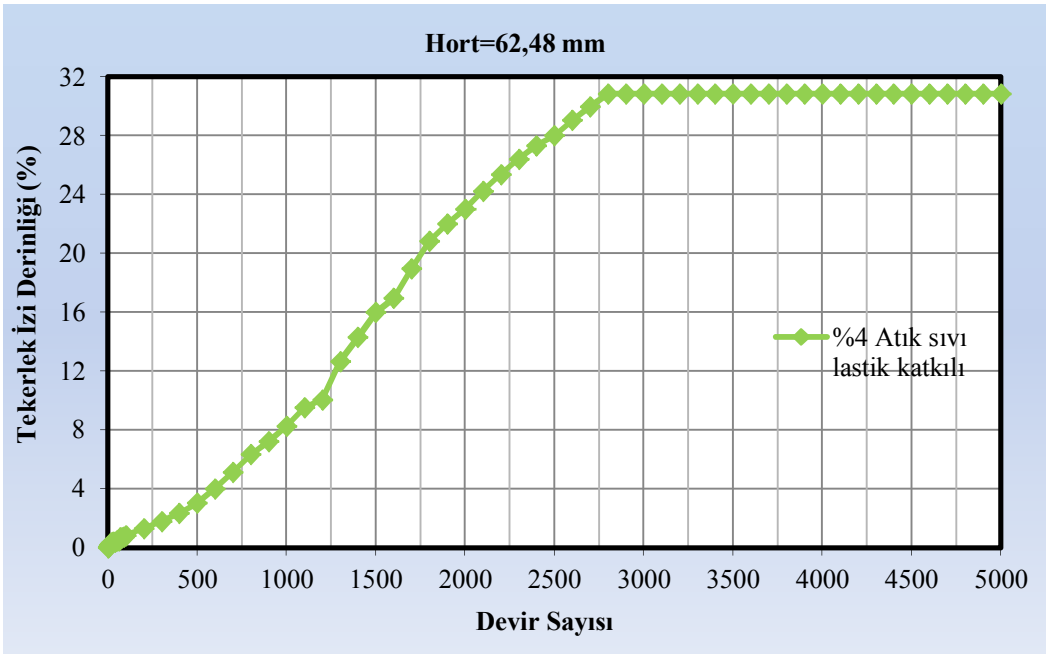
Şekil 4.93. % 2 katkılı bitüm numunelerinde oluşan oratalama tekerlek izi derinlikleri (mm)



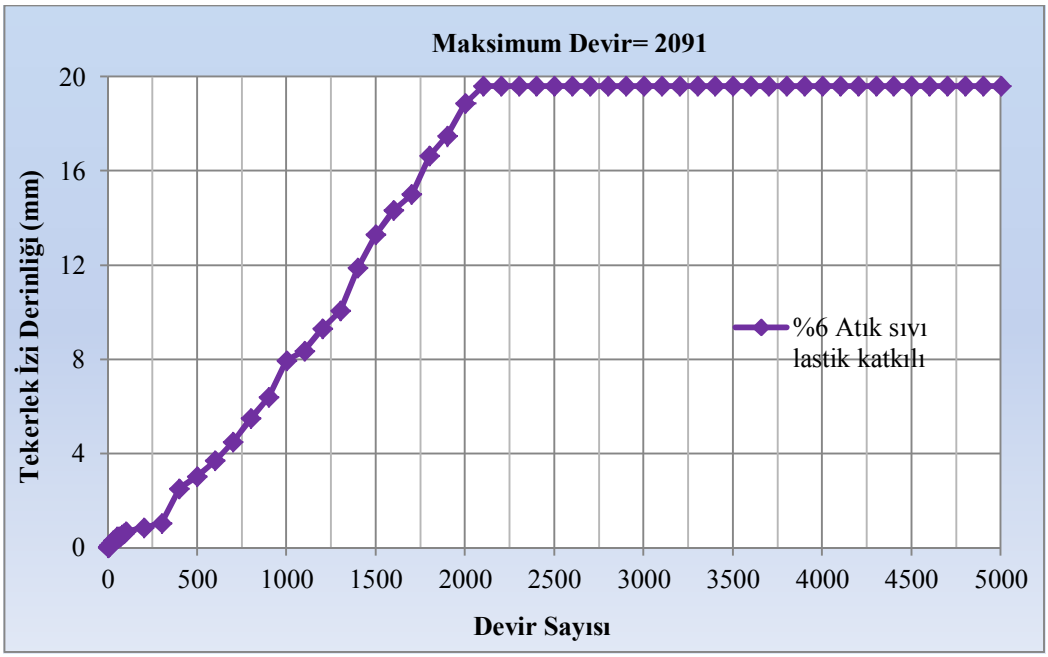
Şekil 4.94. % 2 katkılı bitüm numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri (%)



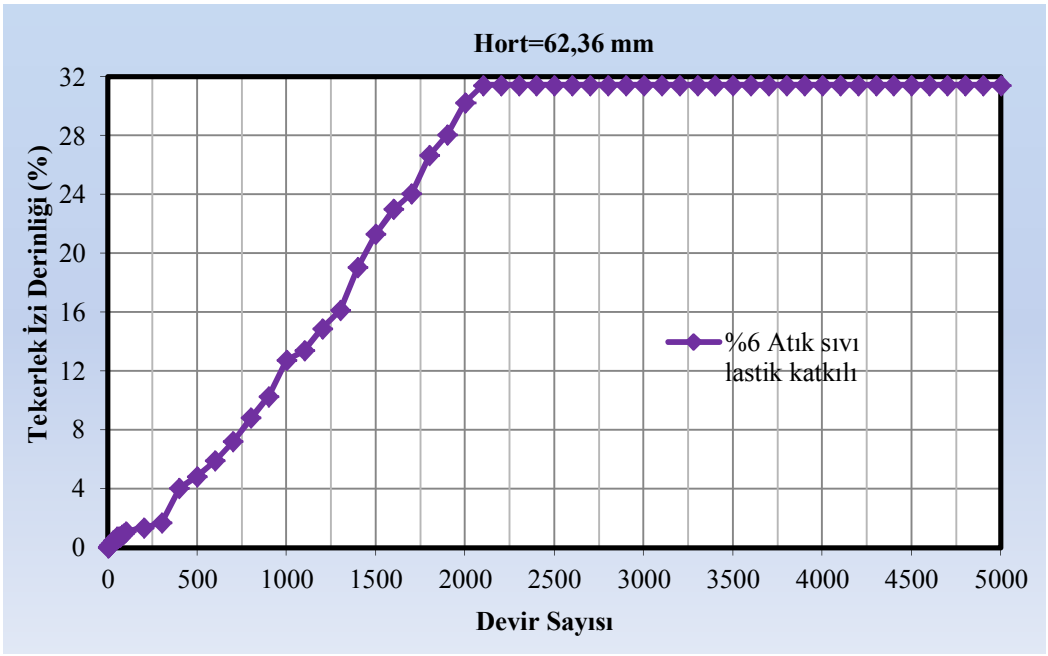
Şekil 4.95. % 4 katkılı bitüm numunelerinde oluşan oratalama tekerlek izi derinlikleri (mm)



Şekil 4.96. % 4 katkılı bitüm numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri (%)



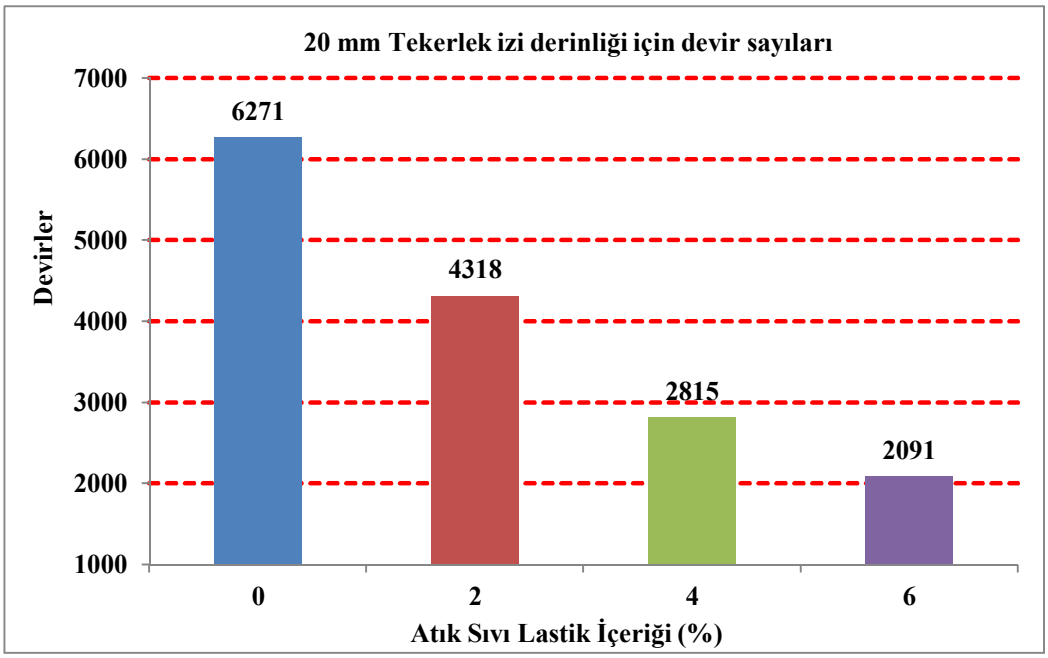
Şekil 4.97. % 6 katkılı bitüm numunelerinde oluşan oratalama tekerlek izi derinlikleri (mm)



Şekil 4.98. % 6 katkılı bitüm numunelerinde oluşan ortalama tekerlek izi değerleri (%)

Tekerlek izi deneylerinde, en yüksek tekerlek izi miktarı %6 atık sıvı lastik katkılı karışım numunelerinde görülmüştür. İkinci sırayı %4 atık sıvı lastik katkılı, üçüncü sırayı %2 atık sıvı lastik katkılı karışım numuneleri almıştır. En az tekerlek izi miktarı ise saf bitümlü karışım numunelerde gözlenmiştir. %6 atık sıvı lastik katkılı bitüm karışım numuneleri 2091 devirde hedeflenen tekerlek izi derinliği 20 mm

ulaşırken, %4 atık sıvı lastik katkılı bitüm karışım numuneleri 2815 devirde, %2 atık sıvı lastik katkılı bitüm karışım numuneleri 4318 devirde ve saf bitümlü karışım numuneleri ise 6271 devirde ulaşmıştır (Şekil 4.99.).



Şekil 4.99. Katkılı ve katkısız bitüm numunelerinin 20 mm tekerlek izi değeri için devir sayıları

Atık sıvı lastik katkılı karışım numuneleri, saf bitümlü karışım numunelerine göre; %2 katkılı numunelerde %31,14; %4 katkılı numunelerde %55,11 ve %6 katkılı numunelerde ise %66.66 daha az tekerlek izi performansı göstermiştir. Saf bitümlü karışımlara göre, katkı oranı artıkça tekerlek izi performansı azalmıştır. Katkılı ve katkısız karışım numunelerinde tekerlek izine etki eden parametreler aşağıda Çizelge 4.30'da verilmiştir.

Çizelge 4.30. Katkılı ve katkısız karışım numunelerinde tekerlek izine etki eden parametreler

Karışım Tipi	Mak. Devir Sayısı	Yumuşama Noktası, ºC	G* / sin(δ), (kPa),
Saf	6271	46,8	2,21040
% 2 atık sıvı lastik katkılı	4318	42,5	1,92900
% 4 atık sıvı lastik katkılı	2815	40,3	1,28370
% 6 atık sıvı lastik katkılı	2091	36,8	1,13880

Yumuşama noktası yüksek bağlayıcıların kullanıldığı karışımlarda, trafik etkisiyle oluşan deformasyonlar daha azdır. Çizelge 4.30. incelendiği zaman, atık sıvı lastik katkısının bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası değerini azalttığı görülmektedir. Yumuşama noktası ile tekerlek izinin birbiri ile oldukça ilişkili olduğu

görülmektedir. Yumuşama noktasında 3 – 5 ºC'lik bir azalmanın saf bitüm numunelerine göre yaklaşık %30 daha fazla tekerlek izine yol açmıştır. Tekerlek izi tahmininde etkili faktörlerin başında bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası gelmektedir.

Çizelge 4.30. incelendiği zaman, bitümlü bağlayıcılardaki atık sıvı lastik oranı artıkça, bitümlü bağlayıcılarda tekerlek izine karşı dayanımın bir göstergesi olan G*/sin(δ) değerinin azaldığı görülmektedir. Superpave bağlayıcı şartnamesinde tekerlek izine dayanımı temsil ettiği düşünülen G*/sin(δ) parametresi ile bitümlü sıcak karışım numunelerinin tekerlek izi sonuçları arasında iyi bir ilişki olduğu ve G*/sin(δ) yaklaşık 0,3 kPa bir azalmanın saf bitüm numunelerine göre yaklaşık %30 daha fazla tekerlek izine yol açtığı sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Piroliz yöntemiyle sıvılaştırılmış atık lastiklerin bir katkı maddesi olarak bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği, performans ve mühendislik özelliklerine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, deneysel çalışmalarda elde edilen veriler değerlendirilmiş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Atık lastiklerin pirolizi 5-59 ºC/dakika ısıtma hızında ve 450 ºC'de gerçekleştirilmiştir. Piroliz sonucunda elde edilen ürünlerin (katı-sıvı-gaz) yüzdelerine bakıldığı zaman katı ürün (char) miktarı % 50,95, sıvı ürün (prolitik oil) miktarı % 32,26 ve gaz ürün miktarı % 16,79 olarak bulunmuştur. Atık lastiklerin pirolizi % 49,05 verimlilik ile tamamlanmıştır. Pirolizden elde edilen prolitik oil daha sonra destile edilerek 4 ayrı ürün elde edilmiştir. Destilasyon sonucu elde edilen petrol ve türevi ürünlerinden en ağır fraksiyon (360 ºC üzeri) bitümü modifiye etmek için kullanılmıştır.
- Destilasyon sonucu elde edilen hafif ürünün (0-180 ºC) GC/MS analiz sonuçları karbon sayısına göre incelendiğinde, C_6 ile C_{10} arasında olduğu gözlenmiştir. Elementel analiz sonuçlarında C,H,N,S yüzdeleri sırasıyla %C=82,3; %H=10,8; %N=4,2; %S=0,9 olarak bulunmuştur. Elde edilen bu hafif ürün, benzin (gasoline) ile kıyaslandığında yakıt değeri olarak hemen hemen aynı olup, azot ve sülfür giderimi yapıldıktan sonra yakıt olarak kullanılması muhtemeldir.
- 180-240 ºC arası elde edilen orta ürünün GC/MS analiz sonuçları karbon sayısına göre incelendiğinde, C_{12}-C_{20} arasında olduğu gözlenmiştir. Elementel analiz sonuçlarında C,H,N,S yüzdeleri sırasıyla, %C=98,3; %H=13,3; %N=3,3; %S=0,9 olarak çıkmıştır. Elde edilen bu orta ürün, dizel yakıt ile kıyaslandığında yakıt değeri olarak hemen hemen aynı olduğu ve karbon yüzdesinin daha fazla olduğu görülmektedir. Orta ürünün, azot ve sülfür giderimi yapıldıktan sonra yakıt olarak kullanılması muhtemeldir.
- 360 ºC sonrası elde edilen bitümün modifikasyonunda kullanılan ağır ürünün GC/MS analiz sonuçlarında ise orijinal bitüm de olduğu gibi kimyasal kompozisyonunun karmaşık olduğu ve aromatik yapıların çoğunlukta olduğu görülmüştür. Elementel analiz sonuçlarında C,H,N,S yüzdeleri sırasıyla, %C=57,4; %H=7,4; %N=0; %S=1,1 olarak çıkmıştır. Elde edilen bu ağır ürün,

bitüm ile kıyaslandığında karbon yüzdesi düşük çıkmasına rağmen sülfür, hidrojen ve nitrojen oranları yönünden orijinal bitüm ile uyum sağlamaktadır.

- 50/70 penetrasyon sınıfı bitümlü bağlayıcıya ağırlığının %2, %4 ve %6 oranlarında atık sıvı lastik ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiş ve bunların performans sonuçları değerlendirilmiştir. Geleneksel bitümlü bağlayıcı deney sonuçlarına göre; atık sıvı lastik katkılı bağlayıcılarda, katkısız bağlayıcılara göre penetrasyon ve düktilite değerlerinde artma, yumuşama noktasında ise azalma meydana gelmiştir. Atık sıvı lastik ilavesiyle bağlayıcıların esnekliğinin ve sıcaklık hassasiyetinin artığı görülmüştür.
- Saf ve atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların, karıştırma ve yapım sırasındaki yaşlanmasını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deneyi sonrası kütle kayıplarının şartnamenin öngördüğü %1 sınırının altında kaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, bitümlü bağlayıcıların kütle kayıpları katkı oranının artmasına paralel olarak artış göstermektedir.
- Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyinden elde edilen sonuçlardan bitümlü bağlayıcılardaki atık sıvı lastik oranı artıkça G* ve G*/sin(δ) değerinin azaldığı, faz açısının (δ) ise artığı belirlenmiştir. Bitümlü bağlayıcılardaki atık sıvı lastik içeriği artıkça tekerlek izine karşı dayanımın azaldığı görülmüştür. Fakat, yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılarda kayma modülü (G*), depolama modülü (G′) ve kayıp modül (G″) atık sıvı lastik oranı % 4'e kadar azalırken, atık sıvı lastik oranı % 6 olunca yeniden bir artış göstermiş olması malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulması durumunda deformasyonlara karşı yeniden bir direnç göstereceği anlamına gelmektedir.
- Saf bitüme % 4,45 oranında atık sıvı lastik ilave edildiği noktada yaşlanmanın en az olduğu görülmüştür. Atık sıvı lastik katkılı karışımın, RTFOT yaşlandırması sonrasında katkısız malzemeye göre daha iyi sonuçlar verdiği, bitümlü bağlayıcının, yaşlanma etkilerini azaltıp gençleştirdiği düşünülebilir.
- Kiriş eğme reometresi (BBR) deney sonuçlarına göre; saf ve %2 atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcının, düşük sıcaklık performans derecesinin –22 ^{o}C olduğu, %4 ve %6 atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcılarda ise düşük sıcaklık performans derecesinin bir sınıf yükselerek –28 ^{o}C olduğu tespit edilmiştir.

- Dönel viskozimetre (RV) deney sonuçlarına göre; atık sıvı lastik katkısının bağlayıcıların sertliğini azalttığı, yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirliğini ise artırdığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, atık sıvı lastik içeriğinin oranı artıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcılarla, üretim sırasında daha az enerji harcanan, ılık asfalt (WMA) uygulamalarında kullanılabileceği araştırılmalıdır.
- Saf bitüm ve %2 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitümün performans sınıfı PG 58-22, % 4 ve % 6 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitümün performans sınıfı ise PG 58-28 olarak belirlenmiştir. Termal çatlama yönünden, katkısız bitüm ve %2 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitüm -22 ºC' ye kadar direnç gösterirken, % 4 ve % 6 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitüm ise -28 ºC'ye kadar direnç gösterebilmektedir.
- Saf bitüme, % 2-4-6 oranlarında atık sıvı lastik ilave edilerek hazırlanan Marshall numuneleri, Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'de verilen Marshall dayanım değerlerini (900 kg, aşınma tabakası için) ve akma değerlerini (2-4 mm, aşınma tabakası için) sağlamaktadır. Optimum bitümlü bağlayıcı oranında, atık sıvı lastik katkısı ile bir değişiklik gözlenmemiştir. Katkılı ve katkısız numuneler kendi aralarında kıyaslandığında en iyi stabilite değeri ve en düşük akma oranı % 2 atık sıvı lastik katkılı numunelerde elde edilmiştir.
- Asfalt betonunun deformasyon karşısındaki direncinin bir göstergesi olan Marshall oranı (MQ), % 2 atık sıvı lastik ile modifiye edilen bitümlü sıcak karışımlarda en yüksek çıkmıştır. Yüksek bir MQ değeri çıkmış olması karışımın deformasyonlara karşı daha dirençli olma olasılığını göstermektedir.
- Saf bitüm ve yaşlandırmanın en az olduğu %4,45 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitüm bağlayıcısı kullanılarak, Superpave karışım tasarımı yapılmıştır. Tasarımda kabul edilen 3–30 milyon eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısına göre sıkıştırma parametreleri; Nini = 8, Ndes = 100 ve Nmaks =160 olarak alınmıştır. Tasarım bitümlü bağlayıcı içeriği; karışımda % 4 boşluk olacak şekilde, saf bitüm için %4,01 ve %4,45 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitüm için %3,94 olarak tespit edilmiştir. Saf bitüm ve yaşlandırmanın en az olduğu %4,45 atık sıvı lastik katkılı modifiye bitümlü karışımlar, optimum bağlayıcı içeriklerinde Superpave bağlayıcı şartnamesindeki kriterleri sağlamıştır.

Superpave numunelerinin optimum bitüm içeriği, Marshall numunelerinden elde edilen optimum bitüm içeriğinden % 7,5 daha az çıkmıştır.

- Kısa süreli yaşlandırılmış, koşullandırılmamış katkısız ve katkılı numunelerin Marshall oranı (MQ) değerleri incelendiğinde en yüksek MQ değerinin %6 atık sıvı lastik katkılı karışımlarda çıktığı, koşullandırma işleminden sonra ise en yüksek MQ değerinin %4 atık sıvı lastik katkılı karışımlarda olduğu belirlenmiştir.
- Kısa süreli yaşlandırılmış, katkısız ve katkılı karışım numunelerinin nem hasarına karşı dayanımının bir göstergesi olan kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) değerleri incelendiğinde en yüksek değerin %2 atık sıvı lastik katkılı karışımların sahip olduğu görülmüştür. Atık sıvı lastik katkılı karışımların, katkısız karışımlara göre kalıcı deformasyon dayanımlarının daha yüksek olacağı ve nem hasarına karşı dayanımda daha etkili olacağını göstermektedir.
- Uzun süreli yaşlandırılmış, koşullandırılmamış katkısız ve katkılı numunelerin Marshall oranı (MQ) değerleri incelendiğinde en yüksek MQ değerinin katkısız karışımlarda çıktığı, koşullandırma işleminden sonra ise en yüksek MQ değerinin %6 atık sıvı lastik katkılı karışımlarda olduğu belirlenmiştir.
- Uzun süreli yaşlandırılmış, katkısız ve katkılı karışım numunelerinin nem hasarına karşı dayanımının bir göstergesi olan kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) değerleri incelendiğinde, atık sıvı lastik içeriği artıkça kalıcı Marshall stabilitesi değerlerinin artığı belirlenmiştir. Kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) en yüksek değerin %6 atık sıvı lastik katkılı karışımların sahip olduğu görülmüştür. Bu durum atık sıvı lastik kullanımının bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımını artırdığını, kısa süreli yaşlandırılmış karışımlarda olduğu gibi özellikle %4 ve %6 oranında atık sıvı lastik kullanımının nem hasarına karşı dayanımda daha etkin olduğunu göstermektedir.
- Uzun süreli yaşlanmanın etkisini daha net bir şekilde gösterebilmek amacıyla yaşlanmadan sonraki Marshall stabilite değerinin yaşlanmadan önceki Marshall stabilitesi değerine bölümüyle belirlenen "Yaşlanma İndeksi" değerleri incelenmiştir. Koşullandırılmamış karışımlarda en yüksek yaşlanma indeksi değeri saf karışımda görülürken, koşullandırma işlemi sonrasında ise en yüksek yaşlanma indeksi değerleri %6 atık sıvı lastik içeren karışımda görülmüştür. Marshall stabilite değerlerinden genel olarak atık sıvı lastik kullanımının uzun

süreli yaşlanmanın etkilerini azalttığı söylenebilir. Atık sıvı lastik katkılı bitümlü bağlayıcılarla, geri kazanılan asfalt kaplama (RAP) uygulamalarında sertleşmiş yaşlı bitümün viskozitesini düşürmek, işlenebilirliğini kolaylaştırmak, bitümü gençleştirmek için katkı maddesi olarak kullanılabileceği araştırılmalıdır.

- Dünyada, atık lastiklerin geri kazanılması yöntemleri giderek yaygınlaşmaktadır. Atık lastikleri, piroliz yöntemi kullanarak alternatif enerji yaratacak olan tesislerin birincil ürünlerden sonra, dipte kalan ikincil ürünlerinin daha ekonomik kullanılması için, bitümlü sıcak karışımlarda kullanılması, sürdürülebilir bir yaşam ve ülke ekonomisi için olumlu olacaktır. Atık sıvı lastik, bitüm katkı maddelerinden hidrokarbon katagorisine uyum sağladığı, yeniden kullanma ve gençleştirme yağları olarak, katkı maddesi olarak kullanılabileceği görülmektedir. Böylece, bitüme yumuşatma, gençleştirme özelliği kazandıracağı, adezyon ve soyulma mukavemetini artıracağı düşünülmektedir.
- Katkılı ve katkısız bitüm numunelerinin tekerlek izi performansları PAVELAB DWT Hamburg tekerlek izi cihazında incelenmiştir. En az tekerlek izi miktarı saf bitümlü karışım numunelerde gözlenmiştir. %6 atık sıvı lastik katkılı bitüm karışım numuneleri 2091 devirde hedeflenen tekerlek izi derinliği 20 mm ulaşırken, %4 atık sıvı lastik katkılı bitüm karışım numuneleri 2815 devirde, %2 atık sıvı lastik katkılı bitüm karışım numuneleri 4318 devirde ve saf bitümlü karışım numuneleri ise 6271 devirde ulaşmıştır. Saf bitümlü karışımlara göre, katkı oranı artıkça tekerlek izi performansı azalmıştır.
- Yumuşama noktası ile bitümlü karışım numunelerinin tekerlek izi performanslarının birbiri ile oldukça ilişkili olduğu görülmektedir. Yumuşama noktasında 3 – 5 ºC'lik bir azalmanın saf bitüm numunelerine göre yaklaşık %30 daha fazla tekerlek izine yol açtığı, tekerlek izi tahmininde bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası değerlerinin kullanılabileceğini göstermektedir.
- Superpave bağlayıcı şartnamesinde tekerlek izine dayanımı temsil ettiği düşünülen $G^*/\sin(\delta)$ parametresi ile bitümlü karışım numunelerinin tekerlek izi performansları arasında iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. $G^*/\sin(\delta)$ parametresindeki 0,3 kPa bir azalmanın saf bitüm numunelerine göre yaklaşık %30 daha fazla tekerlek izine yol açtığı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

Abojaradeh, M., Jrew, B., Ghragheer, F., Kaloush, K. E., 2010, *Cracking Characteristic of Asphalt Rubber Mixtures*, Jordan Journal of Civil Engineering, 4(3), 205-210.

Aflaki, S., Tabatabaee, N., 2009, *Proposals for Modification of Iranian Bitumen to Meet the Climatic Requirements of Iran*, Construction and Building Materials, 23, 2141–2150.

Ağar, E., Umar, F., 1991, *Yol Üstyapısı*, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

Ahmedzade, P., Geçkil, T., 2007, *Influence of Carbon Black on the Mechanical and Electrical Properties of Asphalt Mixtures*, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, Vol. 14, pp.358-364.

Aksoy, A., Şamlıoğlu, K., Tayfur, S., Özen, H., 2005, *Effects of Various Additives on the Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures*, Construction and Building Materials, 19/1, 11-18.

Almeida Júnior, A.F., Battistelle, R.A., Bezerra, B.S., Castro, R., 2012, *Use of scrap tire rubber in place of SBS in modified asphalt as an environmentally correct alternative for Brazil*, Journal of Cleaner Production, doi:10.1016/j.jclepro.2012.03.039.

Alshamsi, K.S., 2006, *Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures*, Doctor of Philosophy in The Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, United Kingdom, 226p.

Amirkhanian, S., 2001, *Utilization of Crumb Rubber in Asphaltic Concrete Mixtures-South Carolina's Experience*, The South Carolina Department of Transportation, 14 p.

Angın, D., Şensöz, S., 2006, *Aspir Tohumu Pres küspesinin Pirolizinde Sürükleyici Gaz (N_2) Akış Hızının Etkisi ve Sıvı Ürün Karekterizasyonu*, Fırat Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimi Dergisi, 18 (4), 535-542.

Arabani, M., Mirabdolazimi, S.M., Sasani, A.R., 2010, *The Effect of Waste Tire Thread Mesh on the Dynamic Behaviour of Asphalt Mixtures*. Construction and Building Materials, 24; 6, 1060-1068.

ASTM C127, 2012, *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*, Book of Standards Volume: 04.02, DOI: 10.1520/C0127-12, USA, www.astm.org.

ASTM C128, 2012, *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*, Book of Standards Volume: 04.02, DOI: 10.1520/C0128-07A, USA, www.astm.org.

ASTM C535, 2012, *StandardTest Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*, Book of Standards Volume: 04.02, DOI: 10.1520/C0535-12, USA, www.astm.org.

ASTM C88, 2013, *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*, Book of Standards Volume: 04.02, DOI: 10.1520/C0088, USA, www.astm.org.

ASTM D113, 2007, *Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials*, Book of Standards Volume: 04.03, DOI: 10.1520/D0113-07, USA, www.astm.org.

ASTM D36, 2012, *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen*, Book of Standards Volume: 04.04, DOI: 10.1520/D0036_D0036M-12, USA, www.astm.org.

ASTM D4123-82, 1995, *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*, DOI: 10.1520/D4123-82R95, USA, www.astm.org.

ASTM D5, 2013, *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*, Book of Standards Volume: 04.03, DOI:10.1520/D0005_D0005M-13, USA, www.astm.org.

ASTM D6114, 2009, *Standard Specification for Asphalt rubber Binder*, Book of Standards Volume: 04.03, DOI: 10.1520/D6114_D6114M-09, USA, www.astm.org.

ASTM D854, 2010, *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, Book of Standards Volume: 04.08, DOI: 10.1520/D0854-10, USA, www.astm.org.

Bell, C.A., Sosnovske, D., 1994, *Aging: Binder Validation, Strategic Highway Research Program*, Report No. SHRP-A-384, National Research Council, Washington D.C., 85 p.

Bell, C.A., Wahab, A.Y., Cristi, M.E., Sosnovske, D., 1994a, *Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt-Aggregate Mixtures*, Strategic Highway Research Program, Report No. SHRP-A-383, National Research Council, Washington D.C., 92 p.

Bell, C.A., Wieder, J.A., Fellin, J.M., 1994b, *Laboratory Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures*, Strategic Highway Research Program, Report No. SHRP-A-390, National Research Council, Washington D.C., 204 p.

Bridgwater, A. V., 2003, *Renewable fuel and chemicals by thermal processing of biomass*, Chemical Engineering Journal, 91, 87-102

Brown, E.R., Kandhal, P.S., Zhang, J., 2001, *Performance Testing for Hot Mix Asphalt*, NCAT Report 01-05, Auburn, 79p.

BS 812, 1989, British Standard Testing aggregates Part 102, Methods for sampling, http://www.bsigroup.com

Cao, W., 2007, *Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process*, Construction and Building Materials, 21, 1011-1015.

Chiu, C., 2008, *Use of ground tire rubber in asphalt pavements: Field trial and evaluation in Taiwan*, Resource Conservation and Recycling, 52(3), 522-532.

Chiu, C., Hsu, T., Yang, W., 2008, *Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements*, 52 (3), 545-556.

Chiu, C., Lu, L., 2007, *A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber*, Construction and Building Materials, 21, 1027-1033.

Clyne, T.R., Hanson, M.P., Chadbourn, B., Drescher, A., Newcomb, D.E., 2001, *Superpave Level One Mix Design at the Local Government Level*, Final Report 2002-19, Minnesota Department of Transportation, Minnesota, 198p.

Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W., Anderson, M., 1994, *The Superpave Mix Design Manuel for New Construction and Overlays*, SHRP-A-407, National Research Council, Washington, DC, 184p.

Cooper, B.S. 2008. Jr., *Characterization of HMA Mixtures Containing High Recycled Asphalt Pavement Content With Crumb Rubber Additives*, B.S.C.E. Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana 1980.

Çelik, O. N., 2001, *Öğütülmüş Atık Otomobil Lastiğiyle Modifiye Edilmiş Bitümler ile Yapılan Asfalt Betonunun Yorulma Davranışı*, Turk. J. Engin. Environ. Sci., Tübitak, 25, 487-495.

Çelik, O. N., 2004, *Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği*, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 181-187.

Çelik, O. N., Atiş, C. D., 2008, *Compactibility of hot bituminous mixtures made with crumb rubber-modified binders*, Construction and Building Materials, 22, 1143-1147.

Çelik, O.N., 2003, *Otomobil Lastiğiyle Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcıların Sıcaklık Hassasiyeti ve Viskozite-Penetrasyon Arasındaki İlişki*, 16. Teknik Kongre, Türkiye Mühendislik Haberleri, sayı:427.

Çelik, O.N., Atasağun, N., Taşcı, A., Lorasokkay, M.A., 2011, *Sıvılaştırılmış Atık araç Lastikleri ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcının Reolojik Özellikleri ve Marshall Stabilitesi*, 9. Ulaştırma Kongresi Sürdürülebilir Ulaştırma, Yıldız Teknik Üniversitesi Oditoryumu, Beşiktaş/İstanbul, Bildiriler Kitabı, sy: 71-80.

Çolak H., 2010, Yüksek Lisans Tezi, *Öğütülmüş Araç Lastiğinin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi,* Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Çubuk M., 2007, Doktora Tezi, *Katkı Maddeleri İle Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Dantas Neto, S.A., Farias, M.M., Pais, J.C., Pereira, A.A., 2003, *Optimization of Asphalt Rubber Hot Mixes Based on Performance Laboratory Tests*, Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Guimaraes, Portugal.

Dantas Neto, S. A., Farias, Márcio M., Pais, Jorge C., Pereira, Paulo A.A.,2006, *Influence of Crumb Rubber Gradation on Asphalt-Rubber Properties*, Asphalt Rubber Conference, Palm Springs, USA, p. 679-692.

Dantas Neto, S.A., Márcio M.D.F., Luiz G.R.M., Paulo P., Pais, C.J., 2005, *The Use Of Crumb Rubber In Asphalt Mıxtures Usıng The Dry Process*, Internatıonal Symposium on Pavement Recycling, SP-Brazil, March 14-16.

Deniz, M.T., Sönmez, İ., Yıldırım, S.A., Eren, B.K., 2005, K*ullanılmış Otomobil Lastiklerinin Bitümlü Sıcak Karışım Performansına Etkisi*, 6. Ulaştırma Kongresi, İstanbul.

Druta, C., 2006, *A Micromechanical Approach for Predicting the Complex Shear Modulus and Accumulated Shear Strain of Asphalt Mixtures from Binder and Mastics*, Doctor of Philosophy, Louisiana State University, 250p.

Engle, E., Mujeeb, M., Gansen, E., Prasetyo, A. and Anderson C., 2002, *Evaluation of Recycled Rubber in Asphalt Cement Concrete Field Testing*, Final Report, Iowa Department of Transportation, 73 p.

Er, A., 2011, *Özel öğütülmüş lastik atığı içeren asfalt betonunun performans özelliklerinin belirlenmesi* , Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Ertekin, S. B., 2003, *Polyefin katkıların asfaltın kıvamı ve yumuşama noktasına etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 19-52.

Fındık, F.S., Saltan, M., 2005, *Hafif agregaların esnek üstyapı alttemelinde kullanılabilirliğinin araştırılması*, Antalya yöresinin inşaat mühendisliği sorunları kongresi, Antalya.

Ghile, D.B., 2006, *Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures*, Masters of Science in Road and Railway Engineering from Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 151p.

Gonzales, O., Munoz, M. E., Santamaria, A., Garcia-Morales, M., Navarro, F. J., Partal, P., 2004, *Rheology and stability of bitumen/EVA blends*, European Polymer Journal, 40 (10): 2365-2372.

Gündüz, A., 2011, Yüksek Lisans Tezi, *Asfalt Kaplamalarda Atık Lastik İlavesinin Etkilerinin İncelenmesi,* Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Hamzah, M.O., Mohamed A.A., Ismail, H., 2006*, Laboratory Investigation of The Properties of a Newly Developed Crumb Rubber Modified (CRI1) Asphalt Mixtures*, Emirates Journal for Engineering Research, 11(2), 67-72.

Harman, T., D'Angelo, J., Bukowski, J., 2002, *Superpave Asphalt Mixture Design Workshop*, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington, 33 p.

Harold, R., Paul, P. E., Chris, P. E., 1995, *Pavement distress, Technical Assistance Report*, Louisiana Transportation Research Center, Louisiana, 12-16.

Hınıslıoğlu, S., ve Ağar, E., 2004, *Use of the Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix*, Materials Letters, 58, 267-271.

Hunt, E. A., 2002, *Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete in Oregon*, Final Report, SPR 355, 38 p.

İmamoğlu C.T., 2012, Yüksek Lisans Tezi, *Atık Lastik Katkılı Asfalt Kaplamaların Trafik Gürültüsünü Sönümlemedeki Etkileri,* İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

İsfalt, 2001, *Asfalt ve Uygulamaları*, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:1, İstanbul.

İsfalt, 2002, *Asfalt El Kitabı*, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:2, , ISBN: 975-8183-01-X, İstanbul.

İsfalt, 2004, *Shell Bitüm El Kitabı*, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, ISBN: 975-8183-02-8, İstanbul.

Jin, H., Gao, G., Y., Zhang, Y., Zhang, Sun, K., Fan, Y., 2002, *Improved properties of polystyrene-modified asphalt through dynamic vulcanization*, Polymer Testing, 21 (6): 633-640.

Kandhal, P.S., Chakraborty, S., 1996, *Effect of Asphalt Film Thickness on Short- and Long-Term Aging of Asphalt Paving Mixtures*, Transportation Research Record, No. 1535, pp. 83-90.

Karacasu, M., Bilgiç, Ş., 2009, *Atık Lastik Katkısının Sıcak asfalt Özelliklerine Etkisi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt:XXII, Sayı:2, 46-64.

Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Quintus, H.V., Moulthrop, J.S., 1994, *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of SHRP Asphalt Research Program*, SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC, 170p.

KGM Yayınları, 2013, *Karayolu Teknik Şartnamesi*, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.

Kim, H., Lee, S., Amirkhanian, S., 2010, *Rheology Investigation of Crumb Rubber Modified Asphalt Binders*, KSCE Journal of Civil Engineering, 14 (6), 839-843.

Kök, B.V., Yılmaz, M., Kuloğlu, N., 2011, *SBS+CR Modifiyeli Bitümün Yüksek Sıcaklık Performansının İncelenmesi*, 9. Ulaştırma Kongresi Sürdürülebilir Ulaştırma, Yıldız Teknik Üniversitesi Oditoryumu, Beşiktaş/İstanbul, Bildiriler Kitabı, sy: 93-103.

Kuloğlu, N., Kök, B. V., Öndaş, M., 2004, *Sathi kaplamalarda kusma olayına etki eden faktörler*, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 141-148.

Kutluhan, S., ve Ağar, E., 2004, *Bitümlü sıcak karısımlarda tekerlek izi oluşumunun incelenmesi*, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, KGM, Ankara, 25-26 Kasım, s. 213-223.

Lee, S.J., Akisetty, C.K., Amirkhanian, S., 2008, *The effect of crumb rubber modifier on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements*, Construction and Building Materials, Vol. 22, No. 7, pp. 1368-1376

Loh, S., Olek, J., 1999, *Contributions of PG Graded Asphalt to low Temperature Cracking Resistance of Pavement*, Joint Transportation Research Program, Final Report FHWA/IN/JHRP-96/22, Perdue University, Indiana, 172p.

MacLeod, D., Ho, S., Wirth, R., Zanzotto, L., 2007, *Study of crumb rubber materials as paving asphalt modifiers*, Canadian Journal of Civil Engineering, 34 (10): 1276-1288.

Maharaj, R., George, A., Russell, S. N., Singh-Ackbarali, D., 2009, *The Influence of Recycled Tyre Rubber on the Rheological Properties of Trinidad Lake Asphalt and Trinidad Petroleum Bitumen*, International Journal of Applied Chemistry, 5, 181-191.

Mashaan, N.S., Ali, A.H., Karim, M.R., Mahrez, A., 2012, *An overview of crumb rubber modified asphalt*, International Journal of the Physical Sciences Vol. 7(2), pp. 166 – 170.

Mashaan, N.S., Karim, M.R., 2013, *Investigating the Rheological Properties of Crumb Rubber Modified Bitumen and its Correlation with Temperature Susceptibility*, DOI:10.1590/S1516-14392012005000166, *Materials Research*, 16(1): 116-127

McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W., Solaimanian, M., 1995, *Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis*, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No: FHWA-SA-95-003, 172p.

McGennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U., 1994, *Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods*, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington, KY, 104p.

Mortazavi, S.B., Rasoulzadeh, Y., Yousefi, A.A., Khavanin, A., 2010, *Properties of Modified Bitumen Obtained from Vacuum Bottom by Adding Recycled Waste Polymers and Natural Bitumen*, Iranian Polymer Journal 19 (3), 197-205.

Nadkarni, V. M., Shenoy, A. V., Mathew, J., 1985, *Thermomechanical behavior of modified asphalts*, Ind. Eng. Chem. Pord. Res. Dev.,24: 478-484.

Navarro, F. J., Partal, P., Martinez-Boza, F., Gallegos C., 2004, *Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens*, Fuel, 83, 2041-2049.

Navarro, F.J., Partal, P., Mart´ınez-Boza, F., Valencia, C., Gallegos, C., 2002, *Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens*, Chemical Engineering Journal, 89, 53–61

Önal, M. A., Kahramangil, M., 2012, *Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı*, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.

Önal, M.A. ve Karaca, S., 1990, *Asfalt Betonu ve Diğer Karışım Tipleri İçin Karışım Dizayn Metotları*, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Öztürk, E.A., Çubuk, M.K., 2004, *Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama*, Gazi Üniv. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 19, No 2, 175-184.

Paje, S.E., Bueno, M., Terán, F., Miró, R., Pérez-Jiménez, F., Martínez, A.H., 2010, *Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber*, Applied Acoustics, 71, 578–582.

Pereira, A.A. P., Pais, C.J., Triches, G., 2006, *Performance of Wet Process Method Alternatives: Terminal or Continuous Blend*, Asphalt Rubber Conference, Palm Springs, Califórnia, USA, pp. 545- 562.

Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., Harnsberger P.M., Duvall, J.J., Kim, S.S., 1994, *Binder Characterization and Evaluation*, Volume 4: Test Methods, SHRP-A-370, Strategic Highway Research Program National Research Council, Washington, DC, 197p.

Phetcharat, S., Kongsuwan, S., 2003, *Use of Reclaimed Rubber to Develop Slurry Seal*, Fourth Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, Bangkok, Thailand, 6 p.

Ping, W.V., Xiao, Y., 2007, *Evaluation of the Dynamic Complex Modulus Test and Indirect Diametral Test for Implementing the AASHTO 2002 Design Guide for Pavement Structures in Florida*, Final Report for the Florida Department of Transportation, FSU Project No.: OMNI 008664, Tallahassee, FL 32310, 253p.

Putman, B. J., Thompson, J. U., Amirkhanian, S. N., 2005, *High Temperature Properties of Crumb Rubber Modified Binders*, the Fourth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control.

Reubush, S.D., 1999, *Effects of Storage on the Linear Viscoelastic Response of Polymer- Modified Asphalt at Intermediate to High Temperatures*, Master of Science in Vivil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 351p.

Romero, P. and Stuart, K., 1998, *Evaluating Accelerated Rut Testers*, *Public Roads*, 62, n1, 50-55.

Roque, R., Birgisson, B., Tia, M., Nukunya, B., 2002, *Evaluation of Superpave TM Criteria for VMA and Fine Aggregate Angularity*, Final Report, UF Project No.: 4910-4504-619- 12, University of Florida, 261p.

Shatanawi, K.M., Biro, S., Geiger, A., Amirkhanian, S.N., 2012, *Effects of furfural activated crumb rubber on the properties of rubberized asphalt*, Construction and Building Materials, 28, 96–103.

Shen, J., Amirkhanian, S., Xiao, F., Tang, B., 2009, *Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders*, Construction and Building Materials, 23, 304-310.

Sienkiewicz M, Kucinska-Lipka J, Janik H, Balas A., 2012, *Progress in used tyres management in the European Union: a review*, Waste Manage ;32: 1742–51.

Skok, E. A., Chadbourn, B.A., Crow, B. L., Spindler, S., 2000, *The effect of voids in mineral aggregate (VMA) on hot-mix asphalt pavements*, MN/RC 2000-13, Minnesota Department of Transportation Research Service, Minnesota, 1-13.

Stastna, J., Zanzotto, L., Vacin, O. J., 2003, *Vicosity function in polymer-modified asphalts*, Journal of Colloid and Interface Science, 259: 200-207.

Superpave-2000, 1999, *Improved Standards for a New Millennium*, Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP), C-SHRP Technical Brief # 17, Ontario, 8p.

Şengöz, B., Ağar, E., 2005, *Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına etkisi*, İTÜ Dergisi, 4 (1), 71-82.

Taute, A., Verhaeghe, B.M.J.A., Visser, A.T., 2001., *Interim guidelines for the design of Hot-Mix Asphalt in South Africa*, 157p.

The Asphalt Institute, 2007, *The Asphalt Handbook*, ISBN: 978-1-934154-27-4, Ms-4, 7 th Edition Printed in U.S.A.

Tığdemir, M., 1999, *Bitümlü malzemelerin mekanik özelliklerinin parametrik incelenmesi*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tiftik, B. E., 2006, Ç*ay Fabrikası Atığının Pirolizi ve Piroliz Ürünlerinin İncelenmesi*, Yüksek lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tortum, A., Çelik, C., Aydın, A. C., 2005, *Determination of the optimum conditions for tire rubber in asphalt concrete*, Building and Environment, 40,1492-1504.

Tunç A., 2001, *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.

Tunç, A., 2004, *Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı*, Asil Yayın Dağıtım, Ankara.

Uluçaylı, M., 1998, *Modifiye bitüm ve modifikasyon katkıların kullanımı*, 2.Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 15-18.

Wang, H., Dang, Z., Li, L., You, Z., 2013, *Analysis on fatigue crack growth laws for crumb rubber modified (CRM) asphalt mixture*, Construction and Building Materials, 47, 1342-1349.

Wang, H., Dang, Z., You, Z., Cao, D., 2012, *Effect of warm mixture asphalt (WMA) additives on high failure temperature properties for crumb rubber modified (CRM) binders*, Construction and Building Materials, 35, 281–288.

Wayne, J., and Magdy, A., 2006, *Crumb Rubber in Performance-Graded Asphalt Binders*, University of Nebraska-Lincoln, North Dakota State University.

Wong, C.C., Wong, W.G., 2007, *Effect of crumb rubber modifiers on high temperature susceptibility of wearing course mixtures*, Construction and Building Materials, 21, 1741–1745.

Xiao F., Amirkhanian S.N., Shen J.N., 2009a, *Effects of Long Term Aging on Laboratory Prepared Rubberized Asphalt Binders*, Journal of Testing and Evaluation (ASTM), DOI: 10.1520/JTE101706.

Xiao F., Amirkhanian, S., Juang, C.H., 2007, *Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures*, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 19, No. 6, pp. 475-483.

Xiao, F., Amirkhanian, S., 2010, *Laboratory investigation of utilizing high percentage of RAP in rubberized asphalt mixture*, Materials and Structures, Vol. 43, No1-2, pp. 223-233.

Xiao, F., Amirkhanian, S.N., Putman, B.J., Juang, H., 2012, *Feasibility of Superpave gyratory compaction of rubberized asphalt concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement*, Construction and Building Materials, 27, 432–438.

Xiao, F., Zhao, P. E. W., Amirkhanian, S., 2009b, *Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives*, Construction and Building Materials, 23, 3144-3151.

Yıldırım, Y., 2007, *Polymer modified asphalt binders*, Construction and Building Materials, 21, 66-72.

Yılmaz, M., Kök, B.V., 2009, *Effects of Ferrochromium Slag with Neat and Polymer Modified Binders in Hot Bituminous Mix*, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 16 (5), 310- 318.

Zaniewski, J.P., Padula, M., 2003, *Automation of the Superpave Mix Design Process for the West Virginia Division of Highways*, Asphalt Technology Program, West Virginia, 154p.

Zaniewski, J.P., Pumphrey, M.E., 2004, *Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol*, West Virginia University, Morgantown, 109p.

Zaniewski, J.P., Srinivasan, G., 2004, *Evaluation of Indirect Tensile Strength to Identify Asphalt Concrete Rutting Potential*, Technical Report, West Virginia University, 73p.

URL1:http://www.lasder.org.tr/anasayfa.aspx?MenuID=14 (Ziyaret Tarihi13.06.2013)

URL2:http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Kurumsal/StratejikPlan/sp12_16.pdf (Ziyaret Tarihi 13.06.2013)

URL3:http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=15898 (Ziyaret Tarihi 11.07.2014)

URL4:http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Istatistikler/DevletveIlYolEnvanteri.aspx (Ziyaret 11.07.2014)

URL5:http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=3050339&contentId=3050388 (Ziyaret Tarihi 13.06.2013)

URL6:http://etrainternational.com/Haberler.aspx (Ziyaret Tarihi 13.06.2013)

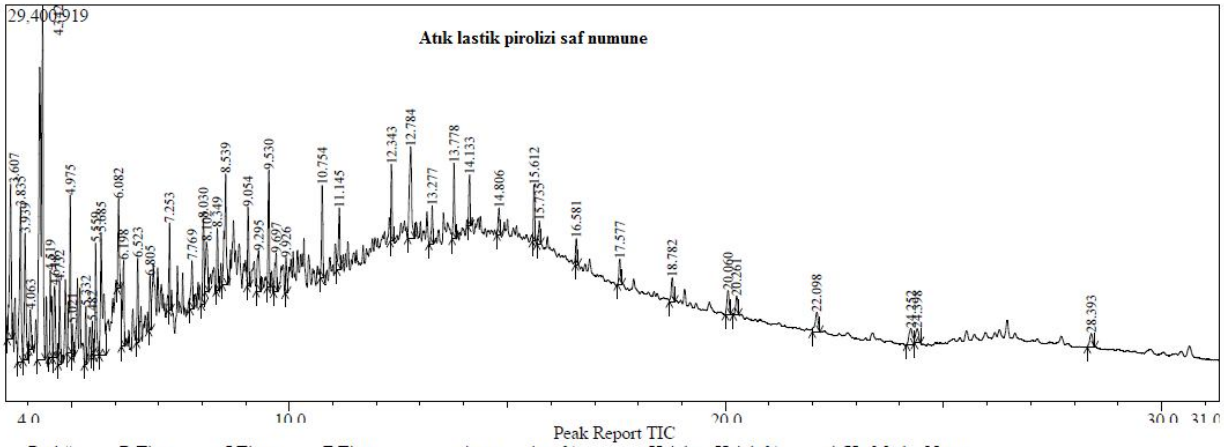
URL7:http://www.tupras.com.tr/detailpage.tr.php?redirect=sales.tr.php&lRedirectPageID=217 (Ziyaret Tarihi 11.07.2014)

URL8:http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/98julaug/evaluating.cfm (Ziyaret Tarihi 13.06.2013)

URL9: http://www.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/hampetrol_ids_adana.pdf (Ziyaret Tarihi 16.01.2014)

EKLER

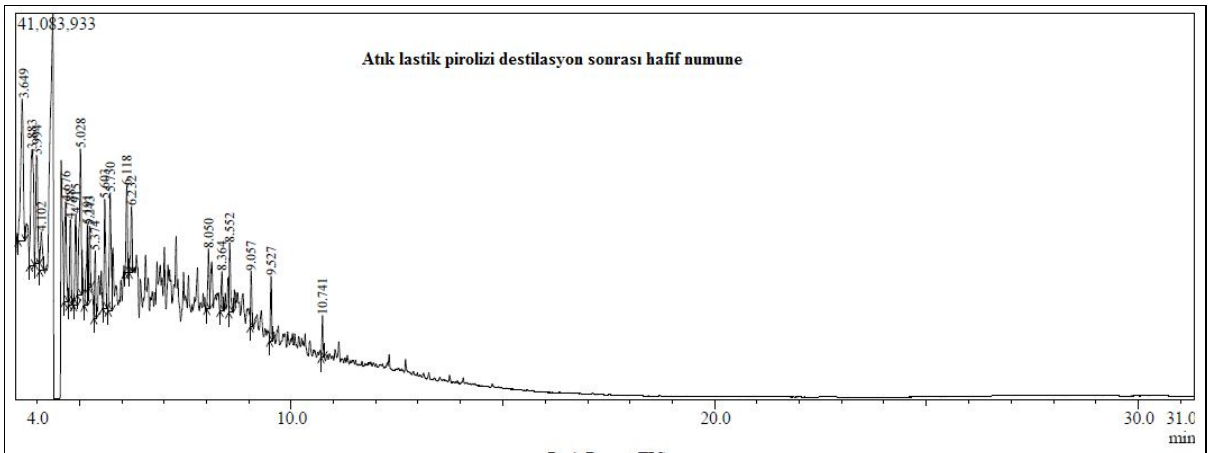
EK-1 Gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC/MS) kromatogramları



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Mark	Name
1	3.607	3.533	3.642	31267258	4.54	11476223	4.51	2.72	MI	Benzene, 1-ethyl-3-methyl- (CAS) m-Etl
2	3.835	3.767	3.883	33744581	4.90	11498584	4.52	2.93	MI	Tricyclo[3.1.0.0(2,4)]hex-3-ene-3-carbo
3	3.939	3.892	3.992	23990841	3.48	9412888	3.70	2.55	MI	Benzene, 1,3,5-trimethyl- (CAS) 1,3,5-T
4	4.063	4.025	4.100	7205256	1.05	2899442	1.14	2.49	MI	3,3-Dimethyl-6-methylenecyclohexene
5	4.342	4.217	4.400	129161263	18.75	26323188	10.36	4.91	MI	dl-Limonene
6	4.519	4.492	4.575	16861985	2.45	6428645	2.53	2.62	MI	Phenol, 2-methyl- (CAS) o-Cresol
7	4.618	4.575	4.675	13879453	2.01	5330409	2.10	2.60	MI	Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl- (CAS) Pre
8	4.732	4.700	4.775	11336029	1.65	6144880	2.42	1.84	MI	Phenol, 4-methyl- (CAS) p-Cresol
9	4.975	4.900	5.000	25827492	3.75	11665008	4.59	2.21	MI	Benzene, methyl(1-methylethenyl)-
10	5.021	5.000	5.067	4043591	0.59	2399715	0.94	1.69	MI	Dodecane (CAS) n-Dodecane
11	5.332	5.300	5.358	6653793	0.97	4321294	1.70	1.54	MI	Benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-
12	5.482	5.458	5.508	3446719	0.50	2408665	0.95	1.43	MI	Benzene, ethyl-1,2,4-trimethyl-
13	5.559	5.525	5.642	16891133	2.45	8325432	3.28	2.03	MI	Benzene, 1-butenyl- (CAS) 1-Butene, 1-
14	5.685	5.642	5.792	35964261	5.22	9095540	3.58	3.95	MI	Benzene, 2-ethenyl-1,3-dimethyl- (CAS)
15	6.082	6.050	6.125	13282662	1.93	6617660	2.60	2.01	MI	N-Methyl-9-aza-tricyclo[6.2.2.0(2,7)]do
16	6.198	6.150	6.233	15058307	2.19	6359341	2.50	2.37	MI	1H-Indene, 2,3-dihydro-1,6-dimethyl-
17	6.523	6.492	6.550	10986274	1.59	6198643	2.44	1.77	MI	Benzothiazole (CAS) Vangard BT
18	6.805	6.775	6.833	8911751	1.29	4003278	1.57	2.23	MI	Naphthalene, 1,2-dihydro-4-methyl-
19	7.253	7.225	7.283	11188847	1.62	6461048	2.54	1.73	MI	Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methyl
20	7.769	7.725	7.808	8467643	1.23	3572442	1.41	2.37	MI	2-Ethoxy-4-methyl-pent-2-enoic acid
21	8.030	7.983	8.067	15836307	2.30	6362354	2.50	2.49	MI	1,1,3-TRIMETHYLINDENE
22	8.102	8.067	8.150	11310300	1.64	3719953	1.46	3.04	MI	1,1,3-TRIMETHYLINDENE
23	8.349	8.317	8.392	9015826	1.31	4631471	1.82	1.95	MI	Naphthalene, 1,6-dimethyl-
24	8.539	8.458	8.575	24266948	3.52	8201859	3.23	2.96	MI	Naphthalene, 1,5-dimethyl- (CAS) 1,5-D
25	9.054	9.025	9.092	10589804	1.54	5827085	2.29	1.82	MI	Hexadecane (CAS) n-Hexadecane
26	9.295	9.233	9.350	10702780	1.55	3011848	1.18	3.55	MI	2,7-Naphthalenediol, decahydro- (CAS)
27	9.530	9.492	9.575	16624277	2.41	8679537	3.41	1.92	MI	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-
28	9.697	9.642	9.733	8199353	1.19	2856140	1.12	2.87	MI	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-
29	9.926	9.900	9.958	5154704	0.75	2592641	1.02	1.99	MI	Hexadecane (CAS) n-Hexadecane
30	10.754	10.717	10.792	13528917	1.96	6830714	2.69	1.98	MI	Heneicosane
31	11.145	11.092	11.183	10062170	1.46	4586041	1.80	2.19	MI	1,4,5,8-Tetramethylnaphthalene
32	12.343	12.308	12.392	10003013	1.45	5700635	2.24	1.75	MI	Hexadecanenitrile (CAS) Palmitonitrile
33	12.784	12.717	12.875	23905722	3.47	6743916	2.65	3.54	MI	l-(+)-Ascorbic acid 2,6-dihexadecanoate
34	13.277	13.200	13.308	5946600	0.86	2814746	1.11	2.11	MI	Bis(2-ethylhexyl) methylphosphonate
35	13.778	13.733	13.825	11272414	1.64	5627118	2.21	2.00	MI	Octadecanenitrile (CAS) Octadecanonitr
36	14.133	14.092	14.167	7846612	1.14	3790199	1.49	2.07	MI	Octadecanoic acid (CAS) Stearic acid
37	14.806	14.758	14.850	4995893	0.73	1988488	0.78	2.51	MI	2-Isopropyl-10-methylphenanthrene
38	15.612	15.575	15.650	8815710	1.28	4191908	1.65	2.10	MI	1,4-Benzenediamine, N-(1,3-dimethylbu
39	15.735	15.675	15.767	4266780	0.62	1696919	0.67	2.51	MI	Tetracosane (CAS) n-Tetracosane
40	16.581	16.558	16.625	3801587	0.55	1913791	0.75	1.99	MI	Hexatriacontane (CAS) n-Hexatriacontar
41	17.577	17.525	17.633	4829347	0.70	1867649	0.73	2.59	MI	Hexatriacontane (CAS) n-Hexatriacontar

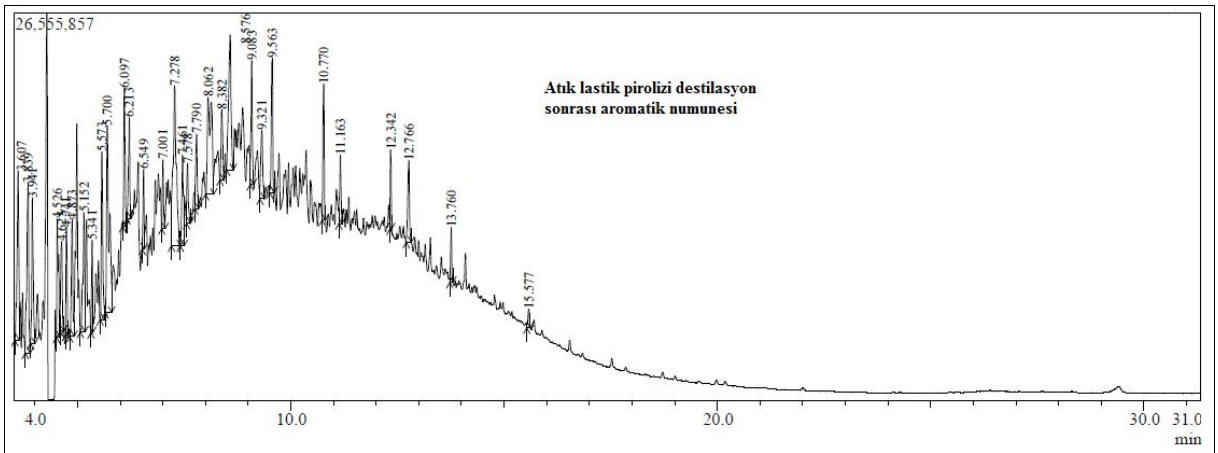
Şekil Ek 1.1. Atık lastik piroliz sıvı ürününün GC-MS kromatogramı



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Mark	Name
1	3.649	3.550	3.717	63474148	12.32	15030182	8.09	4.22	MI	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-
2	3.883	3.825	3.942	56783411	11.03	12392494	6.67	4.58	MI	tricyclo[3.1.0.0(2,6)]hex-3-ene-3-carbon
3	3.994	3.950	4.058	36408470	7.07	11560359	6.23	3.15	MI	Benzene, 1,3,5-trimethyl- (CAS) 1,3,5-T
4	4.102	4.067	4.167	13224459	2.57	4079423	2.20	3.24	MI	Camphene
5	4.676	4.633	4.733	29965253	5.82	10658191	5.74	2.81	MI	Benzene, tert-butyl-
6	4.788	4.750	4.825	22075887	4.29	9047799	4.87	2.44	MI	Phenol, 3-methyl-
7	4.915	4.867	4.958	25437570	4.94	9704611	5.23	2.62	MI	Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-
8	5.028	4.950	5.058	47670658	9.26	15532917	8.37	3.07	MI	Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethenyl)-
9	5.191	5.117	5.200	22314277	4.33	8540885	4.60	2.61	MI	di-tert-Butyl dicarbonate
10	5.243	5.217	5.283	11985445	2.33	6470842	3.49	1.85	MI	BENZENE, 1-METHYL-4-(1-METHYI
11	5.374	5.342	5.408	12598154	2.45	7144941	3.85	1.76	MI	Benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-
12	5.603	5.550	5.658	27661640	5.37	11618720	6.26	2.38	MI	Benzene, 1-butenyl- (CAS) 1-Butene, 1-
13	5.730	5.683	5.775	38333352	7.44	12551339	6.76	3.05	MI	Benzene, 1-methyl-2-(2-propenyl)-
14	6.118	6.075	6.175	19605494	3.81	9195505	4.95	2.13	MI	1H-Indene, 2,3-dihydro-1,6-dimethyl- (C
15	6.232	6.175	6.258	16811247	3.26	7012624	3.78	2.40	MI	1H-Indene, 2,3-dihydro-1,6-dimethyl-
16	8.050	8.008	8.083	15045069	2.92	6368751	3.43	2.36	MI	1,1,3-TRIMETHYLINDENE
17	8.364	8.317	8.408	8756880	1.70	4192124	2.26	2.09	MI	Naphthalene, 1,7-dimethyl- (CAS) 1,7-D
18	8.552	8.525	8.633	16902710	3.28	7425775	4.00	2.28	MI	Naphthalene, 1,6-dimethyl-
19	9.057	9.033	9.100	9929032	1.93	5879232	3.17	1.69	MI	Hexadecane (CAS) n-Hexadecane
20	9.527	9.492	9.558	12485381	2.42	6840019	3.68	1.83	MI	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-
21	10.741	10.708	10.775	7549686	1.47	4429831	2.39	1.70	MI	Heneicosane
				515018223	100.00	185676564	100.00			

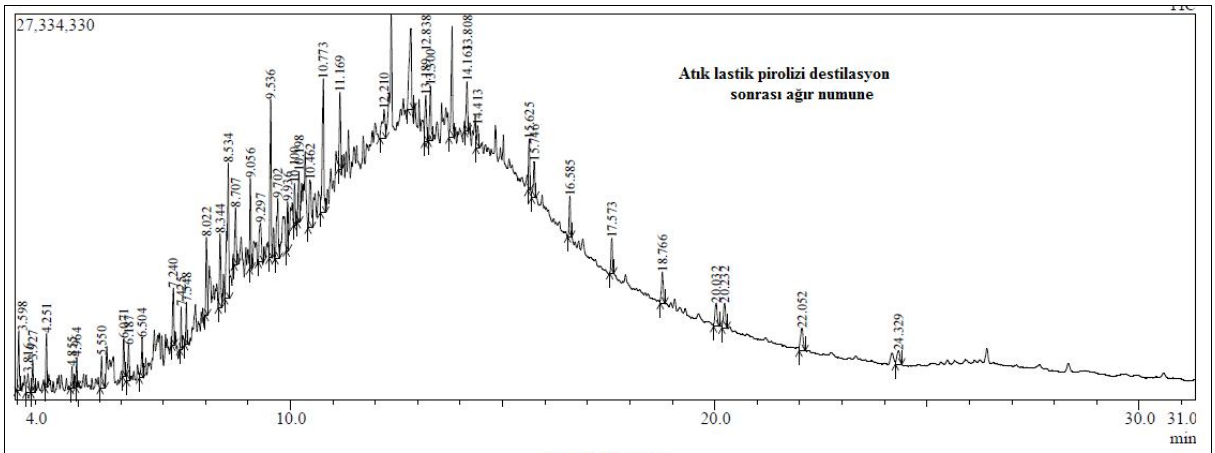
Şekil Ek 1.2. Atık lastik pirolizi destilasyon sonrası hafif numune GC-MS kromatogramı



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Mark	Name
1	3.607	3.533	3.633	32377867	5.11	11612969	5.09	2.79	MI	Benzene, 1-ethyl-3-methyl- (CAS) m-Etl
2	3.839	3.775	3.892	35252971	5.56	11695908	5.13	3.01	MI	Benzonitrile
3	3.941	3.900	4.000	23780325	3.75	9985935	4.38	2.38	MI	Benzene, 1,2,4-trimethyl- (CAS) 1,2,4-T
4	4.526	4.500	4.583	21724278	3.43	8121543	3.56	2.67	MI	Phenol, 2-methyl- (CAS) o-Cresol
5	4.625	4.592	4.675	15340401	2.42	6143107	2.69	2.50	MI	Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)-
6	4.741	4.717	4.775	13117207	2.07	7401286	3.25	1.77	MI	Phenol, 4-methyl- (CAS) p-Cresol
7	4.873	4.817	4.917	18877658	2.98	8024500	3.52	2.35	MI	Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-
8	5.152	5.067	5.175	22295060	3.52	8181588	3.59	2.73	MI	Benzonitrile, 3-methyl-
9	5.341	5.317	5.358	9753669	1.54	6326256	2.78	1.54	MI	Benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-
10	5.573	5.533	5.625	26808170	4.23	11491240	5.04	2.33	MI	Benzene, 1-butenyl- (CAS) 1-Butene, 1-[
11	5.700	5.650	5.800	52549209	8.29	12806806	5.62	4.10	MI	Benzene, 2-ethenyl-1,3-dimethyl- (CAS)
12	6.097	6.058	6.133	20018542	3.16	9454433	4.15	2.12	MI	Naphthalene (CAS) White tar
13	6.213	6.158	6.250	15520987	2.45	6924112	3.04	2.24	MI	1H-Indene, 2,3-dihydro-1,6-dimethyl-
14	6.549	6.517	6.567	9776625	1.54	5448958	2.39	1.79	MI	Benzothiazole (CAS) Vangard BT
15	7.001	6.975	7.058	9747554	1.54	4720397	2.07	2.06	MI	(E)-7-(1-Hydroxy-2-cyclohexen-1-yl)-2,
16	7.278	7.200	7.408	56362145	8.89	10975459	4.81	5.14	MI	Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methyl
17	7.461	7.408	7.500	18192397	2.87	6232013	2.73	2.92	MI	Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methyl
18	7.578	7.558	7.650	8685380	1.37	4094753	1.80	2.12	MI	1H-Indene, 2,3-dihydro-1,4,7-trimethyl-
19	7.790	7.750	7.833	12584811	1.99	5107096	2.24	2.46	MI	Cyclohexanone, 3-(3,3-dimethylbutyl)-
20	8.062	8.000	8.192	45290966	7.14	6640520	2.91	6.82	MI	1H-Indene, 1,1,3-trimethyl-
21	8.382	8.342	8.425	12743431	2.01	4823011	2.12	2.64	MI	Naphthalene, 1,5-dimethyl- (CAS) 1,5-D
22	8.576	8.492	8.650	37278387	5.88	9248314	4.06	4.03	MI	Naphthalene, 1,3-dimethyl-
23	9.083	9.050	9.125	17618734	2.78	8508225	3.73	2.07	MI	Hexadecane (CAS) n-Hexadecane
24	9.321	9.275	9.383	14712137	2.32	4682610	2.05	3.14	MI	2,7-Naphthalenediol, decahydro- (CAS)
25	9.563	9.508	9.608	21094417	3.33	9224167	4.05	2.29	MI	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-
26	10.770	10.733	10.808	19454204	3.07	9335868	4.10	2.08	MI	Heneicosane
27	11.163	11.125	11.200	10343905	1.63	4692284	2.06	2.20	MI	NAPHTHALENE, 1,2,3,4-TETRAMET.
28	12.342	12.325	12.367	7656111	1.21	5422956	2.38	1.41	MI	Hexadecanenitrile (CAS) Palmitonitrile
29	12.766	12.708	12.825	15176635	2.39	5594159	2.45	2.71	MI	l-(+)-Ascorbic acid 2,6-dihexadecanoate
30	13.760	13.725	13.800	6754816	1.07	3759824	1.65	1.80	MI	Octadecanenitrile (CAS) Octadecanonitr
31	15.577	15.533	15.617	3047308	0.48	1286915	0.56	2.37	MI	1,4-Benzenediamine, N-(1,3-dimethylbu
				633936307	100.00	227967212	100.00			

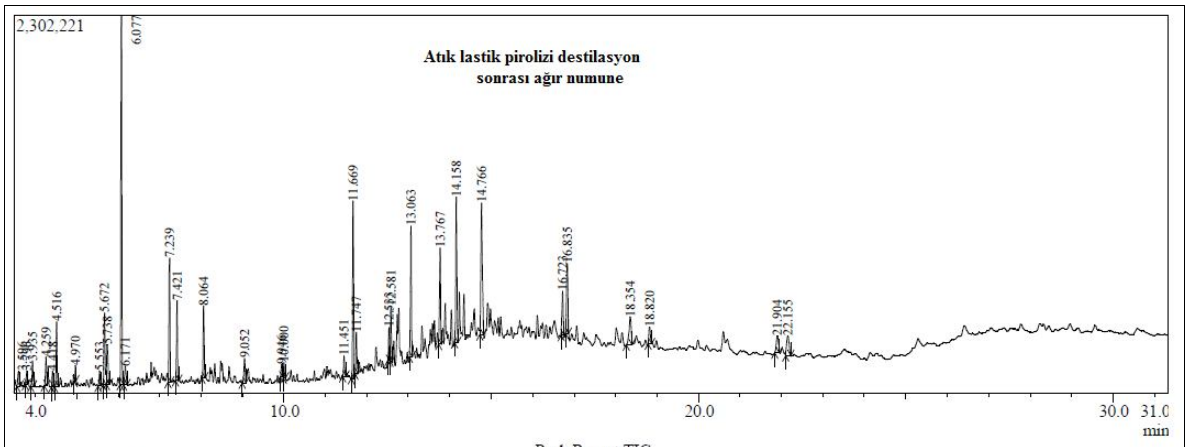
Şekil Ek 1.3. Atık lastik pirolizi destilasyon sonrası orta numune GC-MS kromatogramı



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Mark	Name
1	3.598	3.558	3.633	8469814	2.19	4155021	2.60	2.04	MI	Benzene, 1-ethyl-3-methyl- (CAS) m-Etl
2	3.816	3.767	3.883	4157603	1.07	1327045	0.83	3.13	MI	Octadecanoic acid, 3-hydroxy-, methyl e
3	3.927	3.883	3.983	4956426	1.28	2267387	1.42	2.19	MI	Benzene, 1,3,5-trimethyl- (CAS) 1,3,5-T
4	4.251	4.208	4.283	6485867	1.67	3809546	2.38	1.70	MI	Benzene, 2-ethyl-1,4-dimethyl-
5	4.855	4.817	4.892	2814654	0.73	1524697	0.95	1.85	MI	Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-
6	4.964	4.942	4.992	3102122	0.80	2088046	1.31	1.49	MI	Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethenyl)-
7	5.550	5.517	5.633	5229154	1.35	2254353	1.41	2.32	MI	Benzene, 1-butenyl- (CAS) 1-Butene, 1-
8	6.071	6.042	6.117	5205330	1.34	2649811	1.66	1.96	MI	1H-Indene, 2,3-dihydro-1,6-dimethyl- (C
9	6.187	6.133	6.225	5862401	1.51	2514193	1.57	2.33	MI	1H-Indene, 2,3-dihydro-4,7-dimethyl- (C
10	6.504	6.442	6.533	5916552	1.53	2824336	1.77	2.09	MI	Benzothiazole (CAS) Vangard BT
11	7.240	7.208	7.275	8052699	2.08	4012354	2.51	2.01	MI	Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methyl
12	7.425	7.392	7.450	4672263	1.21	2999785	1.88	1.56	MI	Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methyl
13	7.548	7.508	7.583	4855925	1.25	2958880	1.85	1.64	MI	1H-Indene, 2,3-dihydro-1,4,7-trimethyl-
14	8.022	7.992	8.050	11117047	2.87	5488107	3.43	2.03	MI	1H-Indene, 1,1,3-trimethyl-
15	8.344	8.300	8.383	11761578	3.03	5231964	3.27	2.25	MI	Naphthalene, 1,5-dimethyl- (CAS) 1,5-D
16	8.534	8.450	8.567	29579035	7.63	9588426	5.99	3.08	MI	Naphthalene, 1,5-dimethyl- (CAS) 1,5-D
17	8.707	8.675	8.750	9299081	2.40	4031794	2.52	2.31	MI	Quinoline, 2,4-dimethyl-
18	9.056	9.033	9.100	10500738	2.71	6388429	3.99	1.64	MI	Hexadecane (CAS) n-Hexadecane
19	9.297	9.242	9.367	9553553	2.47	2724952	1.70	3.51	MI	2,7-Naphthalenediol, decahydro- (CAS)
20	9.536	9.500	9.567	23437680	6.05	11202606	7.00	2.09	MI	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-
21	9.702	9.642	9.742	12628262	3.26	4239179	2.65	2.98	MI	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-
22	9.936	9.900	9.958	6543624	1.69	3441332	2.15	1.90	MI	Hexadecane (CAS) n-Hexadecane
23	10.100	10.075	10.125	5054550	1.30	2924651	1.83	1.73	MI	OCTYL PHENOL ISOMER
24	10.198	10.158	10.225	7656743	1.98	3555770	2.22	2.15	MI	1,1'-Biphenyl, 2-methyl- (CAS) 2-Methy
25	10.462	10.417	10.517	11283770	2.91	3369042	2.11	3.35	MI	Phenol, 2-methyl-4-(1,1,3,3-tetramethylb
26	10.773	10.708	10.833	25375238	6.55	9454742	5.91	2.68	MI	Heneicosane
27	11.169	11.133	11.217	11095048	2.86	5435531	3.40	2.04	MI	NAPHTHALENE, 1,2,3,4-TETRAMET
28	12.210	12.108	12.250	9204237	2.37	2040435	1.28	4.51	MI	1,1'-Biphenyl, 2,2',5,5'-tetramethyl-
29	12.838	12.758	12.900	19484561	5.03	5705796	3.57	3.41	MI	l-(+)-Ascorbic acid 2,6-dihexadecanoate
30	13.189	13.158	13.242	8643322	2.23	3316217	2.07	2.61	MI	2,4-Diphenyl-2,3-dihydro-1,5-benzothia:
31	13.300	13.250	13.342	9386972	2.42	3864456	2.42	2.43	MI	Bis(2-ethylhexyl) methylphosphonate
32	13.808	13.733	13.858	18090665	4.67	7879307	4.93	2.30	MI	Heptadecanenitrile (CAS) Heptadecanon
33	14.163	14.108	14.192	8356930	2.16	3498514	2.19	2.39	MI	Octadecanoic acid (CAS) Stearic acid
34	14.413	14.375	14.458	3988797	1.03	1561954	0.98	2.55	MI	Phenanthrene, 2,3,5-trimethyl-
35	15.625	15.592	15.658	7224768	1.86	3627434	2.27	1.99	MI	1,4-Benzenediamine, N-(1,3-dimethylbu
36	15.746	15.683	15.783	6529048	1.68	2542735	1.59	2.57	MI	Dotriacontane (CAS) n-Dotriacontane
37	16.585	16.533	16.625	6056122	1.56	2863349	1.79	2.12	MI	Dotriacontane (CAS) n-Dotriacontane
38	17.573	17.525	17.617	5776420	1.49	2456926	1.54	2.35	MI	Hexatriacontane (CAS) n-Hexatriacontai
39	18.766	18.717	18.825	6199520	1.60	2197270	1.37	2.82	MI	Hexatriacontane (CAS) n-Hexatriacontai
40	20.032	19.975	20.108	5945611	1.53	1633750	1.02	3.64	MI	2-N-PENTYLBENZOTHIAZOLE

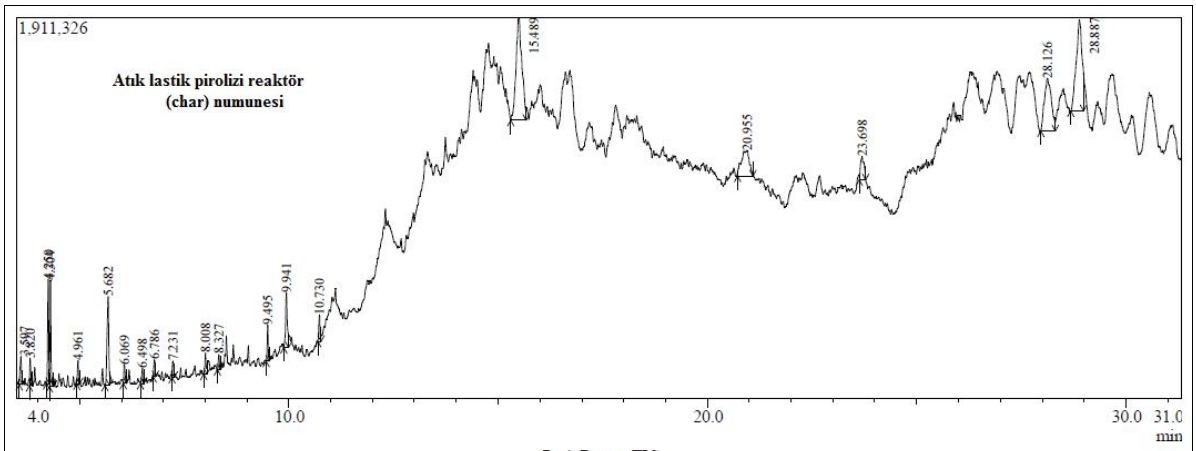
Şekil Ek 1.4. Atık lastik pirolizi destilasyon sonrası aromatik numune GC-MS kromatogramı



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Mark	Name
1	3.596	3.558	3.633	215724	0.93	92441	0.74	2.33	MI	Benzene, 1-ethyl-3-methyl- (CAS) m-Etl
2	3.796	3.758	3.817	126053	0.54	79587	0.64	1.58	MI	Benzene, 1,1'-(1-ethenyl-1,3-propanediy
3	3.935	3.892	3.958	262693	1.14	155867	1.25	1.69	MI	Benzene, 1,3,5-trimethyl- (CAS) 1,3,5-T
4	4.259	4.217	4.283	316467	1.37	176943	1.42	1.79	MI	Benzene, 1,4-diethyl- (CAS) p-Diethylbe
5	4.418	4.392	4.450	142435	0.62	97962	0.79	1.45	MI	1H-Indene, 2,3-dihydro- (CAS) 2,3-Dihy
6	4.516	4.467	4.567	619258	2.68	395818	3.17	1.56	MI	1H-Indene, 1-chloro-2,3-dihydro-
7	4.970	4.942	4.983	117310	0.51	94173	0.76	1.25	MI	Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethenyl)-
8	5.553	5.517	5.592	159746	0.69	91566	0.73	1.74	MI	1H-Indene, 2,3-dihydro-5-methyl-
9	5.672	5.642	5.708	810077	3.50	436745	3.50	1.85	MI	Benzene, (1-methyl-2-cyclopropen-1-yl)
10	5.738	5.717	5.792	511866	2.21	237504	1.90	2.16	MI	2-Methylindene
11	6.077	6.050	6.125	3519067	15.21	2247923	18.03	1.57	MI	Naphthalene (CAS) White tar
12	6.171	6.133	6.217	290368	1.26	112483	0.90	2.58	MI	Benzo[b]thiophene
13	7.239	7.200	7.275	1265833	5.47	757036	6.07	1.67	MI	Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methyl
14	7.421	7.383	7.467	790405	3.42	487693	3.91	1.62	MI	Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methyl
15	8.064	8.025	8.100	705310	3.05	440360	3.53	1.60	MI	1,1'-Biphenyl (CAS) Biphenyl
16	9.052	8.992	9.083	319142	1.38	147771	1.19	2.16	MI	1,1'-Biphenyl, 4-methyl- (CAS) 4-Methy
17	9.946	9.908	9.975	144329	0.62	77205	0.62	1.87	MI	1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl es
18	10.000	9.983	10.042	140527	0.61	93071	0.75	1.51	MI	9H-Fluorene (CAS) Fluorene
19	11.451	11.417	11.500	230959	1.00	124236	1.00	1.86	MI	Dibenzothiophene (CAS) 9-Thiafluorene
20	11.669	11.625	11.700	1860648	8.04	1080908	8.67	1.72	MI	Phenanthrene (CAS) Phenanthren
21	11.747	11.717	11.792	474924	2.05	253318	2.03	1.87	MI	
22	12.533	12.508	12.550	291998	1.26	200724	1.61	1.45	MI	Anthracene, 9-methyl- (CAS) 9-Methyla
23	12.581	12.558	12.608	507308	2.19	329152	2.64	1.54	MI	Anthracene, 9-methyl- (CAS) 9-Methyla
24	13.063	13.025	13.092	1375211	5.94	796050	6.38	1.73	MI	2-Phenylnaphthalene
25	13.767	13.733	13.800	1006579	4.35	584625	4.69	1.72	MI	Fluoranthene (CAS) 1,2-BENZACENAI
26	14.158	14.117	14.200	1633328	7.06	885888	7.10	1.84	MI	Fluoranthene (CAS) 1,2-BENZACENAI
27	14.766	14.725	14.817	1938714	8.38	803024	6.44	2.41	MI	2-Isopropyl-10-methylphenanthrene
28	16.723	16.692	16.758	582583	2.52	268550	2.15	2.17	MI	Triphenylene
29	16.835	16.792	16.867	987335	4.27	425305	3.41	2.32	MI	Triphenylene (CAS) Isochrysene
30	18.354	18.258	18.400	613633	2.65	170933	1.37	3.59	MI	2,2'-Binaphthalene (CAS) 2,2'-Binaphthyl
31	18.820	18.783	18.867	281576	1.22	101786	0.82	2.77	MI	2,2'-Binaphthalene (CAS) 2,2'-Binaphthyl
32	21.904	21.842	21.950	389603	1.68	101840	0.82	3.83	MI	Perylene (CAS) Perilene
33	22.155	22.100	22.225	501624	2.17	120743	0.97	4.15	MI	Benz[e]acephenanthrylene (CAS) 3,4-Be
				23132633	100.00	12469230	100.00			

Şekil Ek 1.5. Atık lastik pirolizi destilasyon sonrası ağır numune GC-MS kromatogramı



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Mark	Name
1	3.597	3.558	3.633	316397	1.50	139476	3.11	2.27	MI	Benzene, 1-ethyl-3-methyl- (CAS) m-Et
2	3.820	3.800	3.867	235446	1.12	138067	3.07	1.71	MI	Benzonitrile
3	4.250	4.208	4.275	835910	3.98	523342	11.66	1.60	MI	Benzene, 2-ethyl-1,4-dimethyl-
4	4.304	4.283	4.375	899751	4.28	533338	11.88	1.69	MI	D-Limonene
5	4.961	4.933	5.000	176697	0.84	116925	2.60	1.51	MI	Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethenyl)-
6	5.682	5.608	5.717	1272364	6.05	445302	9.92	2.86	MI	Benzoic acid (CAS) Retardex
7	6.069	6.042	6.117	179223	0.85	93453	2.08	1.92	MI	1H-Indene, 2,3-dihydro-1,6-dimethyl- (C
8	6.498	6.450	6.533	139746	0.66	77224	1.72	1.81	MI	Benzothiazole (CAS) Vangard BT
9	6.786	6.758	6.817	139055	0.66	84616	1.88	1.64	MI	Benzoic acid, 4-methyl-
10	7.231	7.208	7.267	146777	0.70	81870	1.82	1.79	MI	Naphthalene, 2-methyl- (CAS) 2-Methyl
11	8.008	7.967	8.042	212862	1.01	105092	2.34	2.03	MI	1,1,3-TRIMETHYLINDENE
12	8.327	8.292	8.358	142978	0.68	76079	1.69	1.88	MI	Naphthalene, 1,7-dimethyl- (CAS) 1,7-D
13	9.495	9.458	9.525	296723	1.41	181889	4.05	1.63	MI	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-
14	9.941	9.883	9.992	786962	3.74	275556	6.14	2.86	MI	1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl es
15	10.730	10.692	10.767	267179	1.27	131518	2.93	2.03	MI	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- (CA
16	15.489	15.300	15.667	5090433	24.21	515036	11.47	9.88	MI	1-(Trimethylsilyl)-1-propyne
17	20.955	20.725	21.092	1698116	8.08	129508	2.88	13.11	MI	Borinic acid, diethyl-, (2-ethyl-1,3,2-dio
18	23.698	23.633	23.783	678594	3.23	119188	2.65	5.69	MI	Hexacontane
19	28.126	27.967	28.317	3074272	14.62	265229	5.91	11.59	MI	.beta.-Carotene
20	28.887	28.683	28.992	4436751	21.10	457354	10.19	9.70	MI	HEXACONTAN
				21026236	100.00	4490062	100.00			

Şekil Ek 1.6. Atık lastik pirolizi reaktör (char) numunesi GC-MS kromatogramı

EK-2 Marshall Deney Sonuçları

Çizelge Ek 2.1. Numune boyutlarının ve ağırlıklarının ölçülmesi (saf bitüm)

NUMUNE NO	BİTÜM ORANI (%)	KURU AĞIRLIK (gr)	SUDAKİ AĞIRLIK (gr)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H_3 (cm)	R (cm)	H ort (cm)	DÜZELTME KATSAYISI	ORTALAMA DÜZELTME
1	3,5	1227,0	730,0	64,90	63,78	63,03	10,16	63,90	0,9900	1,0049
2		1235,3	736,5	63,21	62,88	62,88	10,16	62,99	1,0128	
3		1236,0	735,5	63,36	63,27	63,43	10,16	63,35	1,0038	
4		1226,9	733,5	63,25	62,83	63,18	10,16	63,09	1,0130	
1	4,0	1241,8	742,0	62,99	62,50	62,99	10,16	62,83	1,0168	1,0079
2		1243,7	746,0	62,61	62,29	62,40	10,16	62,43	1,0268	
3		1243,4	742,5	63,37	64,62	63,68	10,16	63,89	0,9903	
4		1233,2	733,0	63,84	63,12	63,82	10,16	63,59	0,9978	
1	4,5	1246,5	750,5	62,89	62,05	62,34	10,16	62,43	1,0268	1,0560
2		1122,5	672,0	56,83	56,43	56,21	10,16	56,49	1,1753	
3		1236,1	737,5	64,01	63,66	64,19	10,16	63,95	0,9888	
4		1217,5	727,0	62,36	61,97	62,20	10,16	62,18	1,0330	
1	5,0	1248,5	748,0	63,56	62,51	62,71	10,16	62,93	1,0143	1,0023
2		1231,9	734,0	63,34	63,36	63,36	10,16	63,35	1,0038	
3		1252,8	749,0	64,04	63,44	63,42	10,16	63,63	0,9968	
4		1250,8	747,0	63,98	63,69	63,53	10,16	63,73	0,9943	
1	5,5	1248,8	741,5	64,53	64,26	63,91	10,16	64,23	0,9818	1,0040
2		1222,0	726,5	62,89	61,93	62,44	10,16	62,42	1,0270	
3		1254,9	749,0	65,20	64,87	64,30	10,16	64,79	0,9678	
4		1205,3	716,5	62,04	62,39	61,37	10,16	61,93	1,0393	

Çizelge Ek 2.2. Grafik değerlerinin bulunması (saf bitüm)

NUMUNE NO	BİTÜM ORANI (%)	GERÇEK HACİM D2	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI D1	ORT. KÜÇÜK BİRİM HACİM AĞIRLIK	TEORİK BİRİM HACİM AĞIRLIK	STABİLİTE (kN)	ORT. STABİLİTE (kN)	DÜZ ORT. STABİLİTE (kN)	BOŞLUK ORANI (%)	AKMA (mm)	ORT. AKMA (mm)	VMA (%)	Vb	Vfb
1	3,5	2,370	2,469	2,399	2,561	21,60	21,384	24,053	6,329	1,44	1,908	14,56	8,49	0,58
2		2,420	2,477			23,90	24,206			2,76				
3		2,408	2,470	2,475		25,10	25,195		3,361	1,84				
4		2,400	2,487			25,10	25,426			1,59				
1	4,0	2,439	2,485	2,423	2,542	24,20	24,607	24,944	4,661	2,41	2,955	14,16	9,74	0,69
2		2,458	2,499			24,90	25,567			3,41				
3		2,402	2,482	2,483		25,00	24,758		2,312	2,40				
4		2,393	2,465			24,90	24,845			3,60				
1	4,5	2,464	2,513	2,430	2,522	18,70	19,201	20,164	3,666	6,18	4,345	14,38	10,99	0,76
2		2,452	2,492			20,10	23,624			3,49				
3		2,385	2,479	2,492		18,20	17,996		1,207	3,46				
4		2,416	2,482			19,20	19,834			4,25				
1	5,0	2,448	2,495	2,425	2,503	17,80	18,055	17,639	3,106	4,43	4,245	14,99	12,18	0,81
2		2,400	2,474			16,40	16,462			5,45				
3		2,430	2,487	2,485		18,30	18,241		0,725	2,92				
4		2,422	2,483			17,90	17,798			4,18				
1	5,5	2,399	2,462	2,402	2,484	25,60	25,134	17,028	3,297	8,79	5,540	16,25	13,31	0,82
2		2,416	2,466			15,70	16,124			6,65				
3		2,390	2,481	2,469		14,00	13,549		0,609	3,44				
4		2,402	2,466			12,80	13,303			3,28				

Çizelge Ek 2.3. Numune boyutlarının ve ağırlıklarının ölçülmesi (% 2 atık sıvı lastik katkılı)

NUMUNE NO	BİTÜM ORANI (%)	KURU AĞIRLIK (gr)	SUDAKİ AĞIRLIK (gr)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H_3 (cm)	R (cm)	H ort (cm)	DÜZELTME KATSAYISI	ORTALAMA DÜZELTME
1	3,5	1232,5	731,5	64,03	63,49	63,18	10,16	63,57	0,9887	0,9784
2		1225,8	731,0	62,89	62,13	63,21	10,16	62,74	1,0043	
3		1239,3	739,0	64,38	64,15	64,89	10,16	64,47	0,9718	
4		1277,6	761,0	66,01	65,24	65,85	10,16	65,70	0,9488	
1	4,0	1245,0	745,5	64,17	63,02	62,96	10,16	63,38	0,9923	0,9933
2		1247,4	746,0	63,06	62,72	63,33	10,16	63,04	0,9986	
3		1239,8	740,0	62,86	63,02	63,63	10,16	63,17	0,9962	
4		1242,1	742,5	64,05	63,66	63,45	10,16	63,72	0,9859	
1	4,5	1249,7	747,5	63,46	63,86	63,51	10,16	63,61	0,9879	1,0002
2		1238,9	739,5	62,61	63,26	62,55	10,16	62,81	1,0029	
3		1250,6	750,0	63,86	62,80	63,76	10,16	63,47	0,9906	
4		1209,4	723,5	61,61	62,12	62,08	10,16	61,94	1,0193	
1	5,0	1250,7	746,5	63,79	63,34	63,67	10,16	63,60	0,9881	0,9883
2		1232,9	737,0	62,32	62,81	61,92	10,16	62,35	1,0116	
3		1249,5	747,0	63,77	64,13	63,97	10,16	63,96	0,9814	
4		1250,5	745,0	64,68	64,41	64,26	10,16	64,45	0,9722	
1	5,5	1249,2	743,5	64,20	63,60	63,12	10,16	63,64	0,9874	0,9810
2		1227,7	728,5	62,70	62,60	62,75	10,16	62,68	1,0054	
3		1248,8	741,5	64,69	64,13	64,50	10,16	64,44	0,9724	
4		1258,3	747,5	65,54	64,92	65,01	10,16	65,16	0,9589	

Çizelge Ek 2.4. Grafik değerlerinin bulunması (% 2 atık sıvı lastik katkılı)

NUMUNE NO	BİTÜM ORANI (%)	GERÇEK HACİM D2	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI D1	ORT. KÜÇÜK BİRİM HACİM AĞIRLIK	TEORİK BİRİM HACİM AĞIRLIK	STABİLİTE (kN)	ORT. STABİLİTE (kN)	DÜZ ORT. STABİLİTE (kN)	BOŞLUK ORANI (%)	AKMA (mm)	ORT. AKMA (mm)	VMA (%)	Vb	Vfb
1	3,5	2,393	2,460	2,394	2,561	25,00	24,718	24,509	6,541	1,64	2,185	14,76	8,48	0,61
2		2,411	2,477			25,10	25,208			2,15				
3		2,372	2,477	2,472		25,00	24,295		3,496	2,83				
4		2,400	2,473			25,10	23,815			2,12				
1	4,0	2,424	2,492	2,423	2,542	25,00	24,808	24,532	4,648	1,94	2,850	14,15	9,75	0,73
2		2,442	2,488			25,00	24,965			3,09				
3		2,422	2,481	2,487		23,80	23,710		2,155	2,98				
4		2,406	2,486			25,00	24,648			3,39				
1	4,5	2,425	2,488	2,425	2,522	24,30	24,006	22,292	3,845	3,17	3,555	14,54	10,98	0,80
2		2,434	2,481			20,40	20,459			4,51				
3		2,431	2,498	2,489		22,80	22,586		1,303	2,56				
4		2,410	2,489			21,70	22,119			3,98				
1	5,0	2,427	2,481	2,418	2,503	18,30	18,082	17,609	3,378	4,73	3,990	15,23	12,17	0,84
2		2,440	2,486			19,70	19,929			3,99				
3		2,411	2,487	2,482		16,20	15,899		0,835	2,68				
4		2,394	2,474			17,00	16,527			4,56				
1	5,5	2,422	2,470	2,404	2,484	15,80	15,601	13,968	3,226	5,54	4,648	16,19	13,28	0,86
2		2,417	2,459			14,70	14,779			5,07				
3		2,392	2,462	2,464		13,00	12,641		0,806	3,42				
4		2,383	2,463			13,40	12,849			4,56				

Çizelge Ek 2.5. Numune boyutlarının ve ağırlıklarının ölçülmesi (% 4 atık sıvı lastik katkılı)

NUMUNE NO	BİTÜM ORANI (%)	KURU AĞIRLIK (gr)	SUDAKİ AĞIRLIK (gr)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H_3 (cm)	R (cm)	H ort (cm)	DÜZELTME KATSAYISI	ORTALAMA DÜZELTME
1	3,5	1236,8	734,5	64,50	64,03	64,20	10,16	64,24	0,9761	0,9824
2		1241,9	741,0	62,75	63,80	62,28	10,16	62,94	1,0005	
3		1237,5	739,5	64,64	65,35	64,11	10,16	64,70	0,9675	
4		1232,7	738,0	63,54	63,90	63,78	10,16	63,74	0,9855	
1	4,0	1242,0	740,0	63,80	64,19	63,33	10,16	63,77	0,9849	0,9910
2		1229,4	734,5	63,24	62,10	62,10	10,16	62,48	1,0091	
3		1244,8	751,0	63,57	63,60	63,43	10,16	63,53	0,9894	
4		1244,1	747,5	64,19	63,72	64,11	10,16	64,01	0,9804	
1	4,5	1246,7	745,5	63,76	63,89	63,50	10,16	63,72	0,9859	0,9816
2		1273,3	759,5	64,91	64,20	64,60	10,16	64,57	0,9699	
3		1246,9	752,5	64,03	63,65	63,68	10,16	63,79	0,9846	
4		1244,7	749,5	63,25	64,28	63,61	10,16	63,71	0,9861	
1	5,0	1249,8	746,0	63,21	63,16	63,46	10,16	63,28	0,9941	0,9908
2		1238,2	738,0	62,81	63,58	62,87	10,16	63,09	0,9977	
3		1252,4	754,5	63,82	63,90	63,51	10,16	63,74	0,9855	
4		1234,2	741,0	63,41	63,70	64,05	10,16	63,72	0,9859	
1	5,5	1252,7	748,5	64,22	63,94	63,49	10,16	63,88	0,9829	0,9784
2		1225,2	724,5	63,67	62,79	63,39	10,16	63,28	0,9941	
3		1253,4	752,5	65,39	64,90	65,02	10,16	65,10	0,9600	
4		1244,3	745,5	64,20	63,89	64,53	10,16	64,21	0,9767	

Çizelge Ek 2.6. Grafik değerlerinin bulunması (% 4 atık sıvı lastik katkılı)

NUMUNE NO	BİTÜM ORANI (%)	GERÇEK HACİM D2	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI D1	ORT. KÜÇÜK BİRİM HACİM AĞIRLIK	TEORİK BİRİM HACİM AĞIRLIK	STABİLİTE (kN)	ORT. STABİLİTE (kN)	DÜZ ORT. STABİLİTE (kN)	BOŞLUK ORANI (%)	AKMA (mm)	ORT. AKMA (mm)	VMA (%)	Vb	Vfb
1	3,5	2,376	2,462	2,389	2,561	25,10	24,500	24,561	6,716	1,87	2,228	14,91	8,51	0,57
2		2,435	2,479			25,10	25,113			1,60				
3		2,360	2,485	2,480		24,80	23,994		3,196	2,86				
4		2,387	2,492			25,00	24,638			2,58				
1	4,0	2,403	2,474	2,412	2,542	24,80	24,426	24,406	5,095	2,87	3,353	14,55	9,79	0,67
2		2,428	2,484			25,00	25,228			3,34				
3		2,418	2,521	2,496		25,00	24,735		1,789	2,76				
4		2,399	2,505			23,70	23,235			4,44				
1	4,5	2,415	2,487	2,418	2,522	21,40	21,098	20,489	4,128	3,86	3,775	14,79	11,03	0,75
2		2,434	2,478			21,60	20,950			4,62				
3		2,412	2,522	2,500		20,20	19,889		0,859	3,93				
4		2,411	2,514			20,30	20,018			2,69				
1	5,0	2,437	2,481	2,419	2,503	17,10	16,999	16,821	3,358	3,96	4,763	15,21	12,22	0,80
2		2,422	2,475			17,70	17,659			7,60				
3		2,425	2,515	2,493		16,80	16,556		0,367	3,40				
4		2,390	2,502			16,30	16,070			4,09				
1	5,5	2,420	2,485	2,394	2,484	18,70	18,380	14,974	3,604	5,26	3,710	16,51	13,38	0,81
2		2,389	2,447			14,40	14,315			2,65				
3		2,376	2,502	2,482		14,60	14,016		0,063	4,25				
4		2,392	2,495			13,50	13,185			2,68				

Çizelge Ek 2.7. Numune boyutlarının ve ağırlıklarının ölçülmesi (% 6 atık sıvı lastik katkılı)

NUMUNE NO	BİTÜM ORANI (%)	KURU AĞIRLIK (gr)	SUDAKİ AĞIRLIK (gr)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H_3 (cm)	R (cm)	H ort (cm)	DÜZELTME KATSAYISI	ORTALAMA DÜZELTME
1	3,5	1238,1	738,0	63,86	62,59	63,42	10,16	63,29	0,9939	0,9902
2		1215,3	723,5	62,06	62,71	61,75	10,16	62,17	1,0149	
3		1237,5	741,5	64,40	63,76	64,15	10,16	64,10	0,9788	
4		1241,6	744,0	64,41	64,31	64,46	10,16	64,39	0,9733	
1	4,0	1244,9	744,0	63,18	63,21	62,38	10,16	62,92	1,0009	0,9961
2		1236,4	739,0	62,77	62,62	62,52	10,16	62,64	1,0061	
3		1240,2	745,5	63,41	63,56	63,88	10,16	63,62	0,9878	
4		1237,3	743,5	63,51	63,97	63,11	10,16	63,53	0,9894	
1	4,5	1243,6	743,5	63,55	62,38	62,96	10,16	62,96	1,0001	0,9811
2		1279,9	764,5	65,93	65,00	65,02	10,16	65,32	0,9559	
3		1248,2	753,0	63,53	63,74	63,97	10,16	63,75	0,9853	
4		1231,1	739,0	63,25	63,88	64,50	10,16	63,88	0,9829	
1	5,0	1247,5	744,5	62,85	63,70	63,03	10,16	63,19	0,9958	0,9988
2		1230,9	735,0	63,73	61,50	62,38	10,16	62,54	1,0080	
3		1250,2	752,5	63,72	63,46	63,40	10,16	63,53	0,9894	
4		1244,1	749,0	63,24	62,68	62,68	10,16	62,87	1,0018	
1	5,5	1262,4	752,0	63,65	64,10	63,37	10,16	63,71	0,9861	0,9893
2		1214,8	721,5	62,99	62,86	62,12	10,16	62,66	1,0058	
3		1247,2	746,0	64,41	64,13	63,74	10,16	64,09	0,9789	
4		1253,6	752,5	63,72	63,78	63,57	10,16	63,69	0,9864	

Çizelge Ek 2.8. Grafik değerlerinin bulunması (% 6 atık sıvı lastik katkılı)

NUMUNE NO	BİTÜM ORANI (%)	GERÇEK HACİM D2	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI D1	ORT. KÜÇÜK BİRİM HACİM AĞIRLIK	TEORİK BİRİM HACİM AĞIRLIK	STABİLİTE (kN)	ORT. STABİLİTE (kN)	DÜZ ORT. STABİLİTE (kN)	BOŞLUK ORANI (%)	AKMA (mm)	ORT. AKMA (mm)	VMA (%)	Vb	Vfb
1	3,5	2,414	2,476	2,397	2,561	25,00	24,848	24,756	6,418	0,88	1,928	14,64	8,52	0,62
2		2,412	2,471			25,00	25,373			1,61				
3		2,382	2,495	2,484		25,00	24,470		3,015	2,17				
4		2,379	2,495			25,00	24,333			3,05				
1	4,0	2,442	2,485	2,422	2,542	25,00	25,023	24,031	4,716	3,71	3,163	14,21	9,79	0,73
2		2,436	2,486			23,90	24,046			3,20				
3		2,406	2,507	2,496		23,70	23,411		1,796	3,34				
4		2,403	2,506			23,90	23,647			2,40				
1	4,5	2,437	2,487	2,413	2,522	17,90	17,902	19,100	4,335	2,68	3,450	14,98	11,02	0,78
2		2,418	2,483			19,60	18,736			3,72				
3		2,416	2,521	2,498		21,60	21,282		0,947	3,48				
4		2,378	2,502			18,80	18,479			3,92				
1	5,0	2,436	2,480	2,434	2,503	12,90	12,846	15,330	2,743	3,63	3,585	14,67	12,24	0,87
2		2,429	2,482			15,60	15,725			2,38				
3		2,429	2,512	2,497		17,00	16,820		0,236	4,24				
4		2,442	2,513			15,90	15,929			4,09				
1	5,5	2,445	2,473	2,417	2,484	16,50	16,271	13,125	2,679	3,10	4,143	15,71	13,38	0,89
2		2,393	2,463			11,40	11,466			2,97				
3		2,401	2,488	2,482		12,30	12,040		0,087	4,99				
4		2,429	2,502			12,90	12,725			5,51				

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet Ali LORASOKKAY
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : KONYA 18.04.1974
Telefon : 0332-223 23 68
Faks : 0332-241 01 85
e-mail : mlorasokkay@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:	Konya Meram Gazi Lisesi, Meram, Konya	09.09.1991
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O. İnşaat Bölümü, Selçuklu, Konya	06.09.1995
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi Müh-Mim Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya	28.01.2000
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuklu, Konya	08.08.2007
Doktora	:	Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuklu, Konya	26.12.2014

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
01.12.2000-27.08.2009	S. Ü. Kulu Meslek Yüksekokulu	Öğr. Görevlisi
28.08.2009-……	S. Ü. Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu	Öğr. Görevlisi

UZMANLIK ALANI İnşaat Mühendisliği (Ulaştırma A.D.)

YABANCI DİLLER İngilizce

YAYINLAR

1-) Lorasokkay, M.A., Ağırdır, M.L., 2009, Konya Kentiçi Ulaşımda Yaya ve Yayalaştırma, UMYOS'09 1. Uluslararası 5. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sempozyumu, Sunumlu Bildiriler Kitabı, Sy: 1246-1255, ISBN: 978-975-448-194-5, 27-29 Mayıs 2009, Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Faik İçil Meslek Yüksekokulu, Konya/Türkiye.**(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)**

2-) Lorasokkay, M.A., Ağırdır, M.L., 2009, Tramvayın, Konya Kentiçi Ulaşımdaki Yeri, UMYOS'09 1. Uluslararası 5. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sempozyumu, Sunumlu Bildiriler Kitabı, Sy: 3269-3278, ISBN: 978-975-448-194-5, 27-29 Mayıs 2009, Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Faik İçil Meslek Yüksekokulu, Konya/Türkiye.**(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)**

3-) Lorasokkay, M.A., Ağırdır, M.L., 2011, BICYCLE TRANSPORT IN URBAN TRANSPORT OF KONYA CITY, e-Journal of New World Sciences Academy, Engineering Sciences, 1A0202, Volüme: 6, Issue: 4, Pages: 870–881, ISSN:1306-3111. (www.newwsa.com)].**(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)**

4-) Lorasokkay, M.A., Ağırdır, M.L., 2011,KONYA URBAN MASS TRANSIT BUS SYSTEM PROBLEMS AND SOLUTIONS, e-Journal of New World Sciences Academy, Engineering Sciences, 1A0217, Volüme: 6, Issue: 4, Pages: 1074–1085, ISSN:1306-3111. (www.newwsa.com)].**(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)**

5-) Lorasokkay, M.A., Ağırdır, M.L., 2011, Konya Kentiçi Toplu Taşım Sisteminin Tamamlayıcısı Olarak Minibüs, III. Ulusal Konya-Ereğli Kemal Akman Meslek Yüksek Okulu Tebliğ Günleri, Sayı: 3, No:1, Sunumlu Bildiriler Kitabı, Sy:506-515, 28-29 Nisan 2011, Ereğli/Konya.**(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)**

6-) Lorasokkay, M.A., Çelik, O.N., Ağırdır, M.L., 2011, Konya Kentiçi Ulaşımda Otopark Sorunları, Karayolu Trafik Güvenliği Sempozyumu ve Fuarı, Sunumlu Bildiriler Kitabı, Sy:437-451, 10-12 Mayıs 2011, Polis Akademisi Başkanlığı Anıttepe Yerleşkesi Kongre Salonu, Ankara.**(Yüksek Lisans tezinden faydanılarak yapılmıştır)**

7-) Çelik, O.N., Lorasokkay, M.A., Atasağun, N., 2012, Marshall Stability of Hot Bituminous Mixture Made with Liquefied Waste Vehicle Tires by Pyrolysis Method, 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, 17-19 October 2012 Middle East Technical University, file_1023_celik_etal_ace2012, Ankara, Turkey.**(Doktora tezinden faydanılarak yapılmıştır)**